



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη τοπικών δικτύων που βασίζονται σε ενσύρματα και ασύρματα οπτικά μέσα

Νικόλαος Δ. Ράπτης

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2018



NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS

**SCHOOL OF SCIENCES
DEPARTMENT OF INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS**

PROGRAM OF POSTGRADUATE STUDIES

PhD THESIS

**Survey of short area networks based on optical wired and
wireless media**

Nikolaos D. Raptis

ATHENS

MARCH 2018

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη τοπικών δικτύων που βασίζονται σε ενσύρματα και ασύρματα οπτικά μέσα

Νικόλαος Δ. Ράπτης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ
Αγγελική Αραπογιάννη, Καθηγήτρια ΕΚΠΑ
Ευγενία Ροδίτη, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

(Υπογραφή)

**Δημήτριος Συβρίδης,
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

**Ευγενία Ροδίτη,
Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

**Έκτορας Νισταζάκης,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

**Αθανάσιος Νασιόπουλος,
Καθηγητής ΤΕΙ Αθήνας**

(Υπογραφή)

**Αγγελική Αραπογιάννη,
Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

**Θωμάς Καμαλάκης,
Επίκουρος Καθηγητής Χαροκοπείου
Πανεπιστημίου**

(Υπογραφή)

**Δημήτριος Βαρουτάς,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ**

Ημερομηνία εξέτασης 30/03/2018

PhD Thesis

Survey of short area networks based on optical wired and wireless media

Nikolaos D. Raptis

Supervisor: Dimitris Syvridis, Professor UoA

THREE-MEMBER ADVISORY COMMITTEE:

Dimitris Syvridis, Professor UoA

Aggeliki Arapogianni, Professor UoA

Eugenia Roditi, Assistant Professor UoA

SEVEN-MEMBER EXAMINATION COMMITTEE

(Signature)

(Signature)

**Dimitris Syvridis,
Professor UoA**

**Aggeliki Arapogianni,
Professor UoA**

(Signature)

(Signature)

**Eugenia Roditi,
Assistant Professor UoA**

**Thomas Kamalakis,
Assistant Professor HUA**

(Signature)

(Signature)

**Ektoras Nistazakis,
Associate Professor UoA**

**Dimitrios Varoutas,
Associate Professor UoA**

(Signature)

**Athanasios Nasiopoulos,
Professor TEI of Athens**

Examination Date 30/03/2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διατριβή καλύφθηκαν δύο θεματικές ενότητες στις οποίες εξετάστηκε η δυνατότητα ανάπτυξης ζεύξεων που βασίζονται σε οπτικές τεχνολογίες για την κάλυψη μικρών αποστάσεων. Η πρώτη θεματική ενότητα αφορά ενσύρματες μεταδόσεις. Δεδομένου ότι στο τμήμα των δικτύων πρόσβασης οι ρυθμοί προβλέπεται να αυξηθούν στο κοντινό μέλλον, αντίστοιχη αύξηση ρυθμών θα πρέπει να υποστηριχθεί στον εσωτερικό χώρο όπου θα καταλήξει η ίνα. Σε ένα περιβάλλον όπου επικρατεί η οπτική δικτύωση, τίθεται το ζήτημα της επιλογής του οπτικού καλωδίου για την κάλυψη δεκάδων μέτρων σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον. Μία οικονομικά προσιτή επιλογή είναι η πλαστική οπτική ίνα με πυρήνα διαμέτρου 980 μm κατασκευασμένη από το υλικό PMMA. Παρά τα πλεονεκτήματα που ενσωματώνει ως οπτική λύση, έχει σημαντικούς περιορισμούς που θα δυσκόλευαν τη μαζική εγκατάσταση αυτού του τύπου καλωδίου και έχουν να κάνουν με τις σχετικά υψηλές απώλειες και με το περιορισμένο εύρος ζώνης. Αυτό που εξετάστηκε ήταν κατά πόσο είναι εφικτή η επέμβαση απευθείας στην ίνα από PMMA, ώστε να τροποποιηθούν τα χαρακτηριστικά της. Αυτά που προέκυψαν ήταν η αύξηση του εύρους ζώνης κατά περίπου 40% και μία μικρή μείωση των απωλειών των τμημάτων των ινών που υπέστησαν μία συγκεκριμένη διαδικασία θέρμανσης. Για καθεμία ίνα 50 μέτρων που θερμάνθηκε κατάλληλα, μία αντίστοιχη ίνα αναφοράς ίδιου μήκους από τον ίδιο κατασκευαστή χρησιμοποιήθηκε για τις συγκρίσεις. Τα επικερδή αποτελέσματα προέκυψαν υπό την προϋπόθεση ότι η πηγή laser και η ίνα είναι άμεσα συνδεδεμένες, με τη στενή οπτική δέσμη να εισέρχεται εστιασμένη στο κέντρο του πυρήνα της ίνας. Ωστόσο, όταν η εισερχόμενη δέσμη καλύπτει την επιφάνεια της διατομής του πυρήνα, τότε οι θερμικά κατεργασμένες και οι αντίστοιχες ίνες αναφοράς έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά το εύρος ζώνης, ενώ παρέμεινε μία μικρή μείωση των απωλειών για τις θερμικά κατεργασμένες ίνες. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διάρκεια μεγαλύτερη του ενός έτους, κατά τις οποίες διατηρήθηκε η βελτίωση για τις θερμικά κατεργασμένες ίνες. Η ερμηνεία των φαινομένων επιβεβαιώθηκε μέσω προσομοιώσεων και τα θεωρητικά αποτελέσματα συμβάδιζαν σε μεγάλο βαθμό με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Στη δεύτερη θεματική ενότητα, που αφορά τις οπτικές ασύρματες μεταδόσεις σε εξωτερικό περιβάλλον, ο στόχος ήταν η κάλυψη μικρών αποστάσεων υπό καθεστώς διάχυτων μεταδόσεων σε χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων. Οι οπτικές τεχνολογίες προσφέρουν διέξοδο στους περιορισμούς των συμβατικών συστημάτων μικροκυματικών επικοινωνιών. Οι απαιτήσεις που τέθηκαν ήταν η έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη και η περιορισμένη υποβάθμιση της λειτουργίας μίας ζεύξης από το θόρυβο του περιβάλλοντος, και συγκεκριμένα από τον ήλιο. Η έλλειψη οπτικής επαφής επιβάλλει την ύπαρξη κάποιου μηχανισμού που θα δώσει τη δυνατότητα εγκατάστασης ζεύξεων διάχυτων μεταδόσεων. Αυτός ο μηχανισμός είναι η σκέδαση λόγω των μορίων και των μικροσωματιδίων της ατμόσφαιρας. Μήκη κύματος σε συμβατικά συστήματα οπτικών ασύρματων επικοινωνιών δεν παρουσιάζουν έντονη σκέδαση, ενώ το επίπεδο του θορύβου του ηλίου που φθάνει στην επιφάνεια της γης δεν είναι αμελητέο. Μία μπάντα μηκών κύματος που επιτρέπει τις μεταδόσεις με διάχυτο τρόπο με το επίπεδο της ισχύος που φθάνει από τον ήλιο στην επιφάνεια του γης να είναι ιδιαίτερα χαμηλό βρίσκεται μεταξύ 200 nm και 280 nm και ονομάζεται ηλιακά τυφλό τμήμα της C μπάντας της υπεριώδους ακτινοβολίας. Αρχικά, η μελέτη σε αυτή την ενότητα περιλάμβανε τη μοντελοποίηση των καναλιών για ζεύξεις δύο σημείων με εφαρμογή τεχνικών μονής και πολλαπλών σκεδάσεων φωτονίων σε αυτή την περιοχή μηκών κύματος. Επίσης, θεωρήθηκαν μεταδόσεις παλμικών σημάτων και σημάτων πολλαπλών φερόντων, ενώ μοντελοποιήθηκε και η λειτουργία μίας απλής δικτυακής υποδομής, όπου η πρόσβαση στο μέσο ρυθμιζόταν μέσω ενός σχήματος πολλαπλής

πρόσβασης με διαίρεση κώδικα. Εκτός από τις δυνατότητες μετάδοσης υπό καθαρή ατμόσφαιρα, τέθηκε το ζήτημα της λειτουργίας υπό καθεστώς πυκνότερης ατμόσφαιρας, όπως με την εμφάνιση ομίχλης. Τα αποτελέσματα έδειξαν μία σημαντική μείωση των απωλειών και μία βελτίωση στο εύρος ζώνης. Οι αλλαγές ήταν συνάρτηση της πυκνότητας της ατμόσφαιρας και του μεγέθους των σκεδαστών που λαμβάνονταν υπόψη στις πιο πολύπλοκες εκδοχές των μοντέλων που δοκιμάστηκαν για κάποιους γεωμετρικούς σχηματισμούς. Όσον αφορά τις θεωρητικές μεταδόσεις σημάτων, το αποτέλεσμα της διάδοσης μέσα από το πυκνότερο μέσο ήταν η μείωση των απαιτούμενων επιπέδων ισχύος εκπομπής για τη λειτουργία των ζεύξεων και η μείωση της αλληλοπαρεμβολής συμβόλων σε κάποιες περιπτώσεις όπου υπό καθαρή ατμόσφαιρα το εύρος ζώνης ήταν περιορισμένο. Τα χαμηλότερα απαιτούμενα επίπεδα ισχύος εκπομπής για την επίτευξη συγκεκριμένων ρυθμών σφαλμάτων bits υπό πυκνή σε σχέση με την αραιή ατμόσφαιρα επιβεβαιώθηκαν και στην περίπτωση του δικτυακού σεναρίου όπου πολλαπλοί κόμβοι εκπέμπουν με κάποια πιθανότητα ταυτόχρονα με κάποιον επιθυμητό κόμβο. Στο πειραματικό κομμάτι, εγκαταστάθηκαν ζεύξεις δύο σημείων. Στο οπτικό τμήμα, ο πομπός αποτελούνταν από LEDs και ο δέκτης από ένα φίλτρο και ένα φωτοπολλαπλασιαστή. Το πρώτο στάδιο περιλάμβανε τη μέτρηση των απωλειών υπό καθαρή ατμόσφαιρα μέχρι και τα 20 μέτρα, για ένα μεγάλο πλήθος γωνιών ανύψωσης του πομπού και του δέκτη. Με την εισαγωγή τεχνητής ομίχλης στο μέσο χρησιμοποιώντας μία μηχανή ομίχλης, προέκυψε καθαρή πτώση των απωλειών, η οποία, ωστόσο, ήταν διαφορετική για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη και διαφορετικά ζεύγη γωνιών ανύψωσης για γεωμετρικούς σχηματισμούς ζεύξεων χωρίς οπτική επαφή. Σε κάποιες ζεύξεις, η μείωση των απωλειών ξεπέρασε τα 7 dB σε μεγάλο πλήθος διαδοχικών δειγμάτων σήματος που λαμβάνονταν, ενώ υπήρχαν και περιπτώσεις σχηματισμών όπου οι ελάχιστες τιμές των απωλειών ήταν ακόμα και πάνω από 10 dB μικρότερες σε σχέση με την καθαρή ατμόσφαιρα. Το δεύτερο στάδιο των πειραματικών μετρήσεων περιλάμβανε την αξιολόγηση των επιδόσεων των ζεύξεων όσον αφορά τον ρυθμό σφαλμάτων bits για μεταδόσεις σήματος διαμορφωμένου κατά ένα παλμικό (4-PPM) και κατά ένα σχήμα πολλαπλών φερόντων (Flip-OFDM) σε ρυθμούς λίγων kilobit/s. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τη μέτρηση των απωλειών, για το μεγαλύτερο δυνατό πλήθος ζευγών γωνιών ανύψωσης και για τις ίδιες αποστάσεις, μετρήθηκε ο ρυθμός σφαλμάτων bits για ρυθμό 10 kbit/s, όπου φάνηκε η ανωτερότητα του 4-PPM λόγω της βέλτιστης διαδικασίας φώρασης. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε ξανά η μηχανή ομίχλης για την αξιολόγηση της επίδρασης της πύκνωσης του μέσου στις επιδόσεις της υπό εξέταση ζεύξης κάθε φορά. Με την εμφάνιση τεχνητής ομίχλης προέκυψε και πειραματικά η αναμενόμενη πτώση του ρυθμού σφαλμάτων bits για ρυθμούς 10 kbit/s για το 4-PPM και το Flip-OFDM και 4 kbit/s για το Flip-OFDM, για διάφορους γεωμετρικούς σχηματισμούς της ζεύξης, χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Η πτώση αυτή ξεπερνούσε σε κάποιες περιπτώσεις ζεύξεων ακόμα και τις δύο τάξεις μεγέθους. Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση της ομίχλης σε ζεύξεις με οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη όπου φίλτρο και φωτοπολλαπλασιαστής αντικαταστάθηκαν από ένα κατάλληλο φακό και μία φωτοδίοδο pin. Η επίδραση της ομίχλης ήταν αρνητική επιδεινώνοντας τόσο τις απώλειες όσο και το ρυθμό σφαλμάτων bits.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Οπτικές Επικοινωνίες και Οπτικά Δίκτυα

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Θερμική κατεργασία πλαστικών οπτικών ινών, εύρος ζώνης, ρυθμός σφαλμάτων bits, διαμόρφωση με βάση τη θέση του παλμού, ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα, ασύρματες οπτικές επικοινωνίες, σκέδαση, απορρόφηση

ABSTRACT

In the present dissertation, two sections were covered that concerned the investigation of the potential deployment of links for short distances that are based on optical technologies. The first section concerns wired transmissions. Provided that data rates in the access network segment are expected to increase in the near future, a respective increase of rates must be supported in an indoor environment where the fiber will terminate. In an environment where optical cabling dominates, an issue that emerges is the type of fiber cable that will be selected for covering tens of meters in indoor areas. A cost-effective choice is the plastic optical fiber with 980 μm core diameter manufactured by PMMA material. Despite the advantages of such fibers as an optical solution, they have significant limitations that would prohibit the massive installation of such a type of cable. These limitations are related to the increased power losses and the limited bandwidth. The question that was answered was how feasible is the direct intervention in the optical fiber, in order its attributes to be modified. The results were a bandwidth increase of almost 40% and a slight decrease of power losses of the plastic optical fibers that went through a specific heating procedure. For each 50 meters plastic optical fiber segment that was thermally treated, a respective reference fiber of equal length from the same manufacturer was used for the comparisons. The profitable results appeared under the condition of direct connection of the laser with the plastic optical fiber, with the narrow optical beam launched focused in the center of the fiber core. However, under overfilled launching conditions, the thermally treated plastic optical fibers gave similar results to those of the respective reference fibers in terms of the bandwidth values that were measured, whereas a slight decrease of the power losses of the thermally treated fibers was measured again. During a longer than a year interval of occasional measurements, the improvement of the thermally treated fibers was preserved. The explanation of the phenomena was confirmed through simulations and the theoretical results were compatible with the respective experimental results.

In the second section, which concerns the optical wireless transmissions in an outdoor environment, the target was the coverage of short distances under the regime of diffuse transmissions with low data rates. The commonly used optical alternatives mitigate the limitations of the conventional microwave communications. The requirements that were defined were the absence of Line-Of-Sight (LOS) components between the transmitter and the receiver and the insignificant degradation of the operation of the link due to the ambient noise, especially by the sun. The Non-Line-Of-Sight (NLOS) regime imposes the existence of a mechanism that will give the opportunity to install links where diffused transmissions are applied. This mechanism is the scattering due to the molecules and the aerosols in the atmosphere. Wavelengths of conventional optical wireless communication systems do not scatter intensely, whereas the noise level of the sun that reaches the earth surface is not negligible. A band that allows the realization of transmissions in a diffused way with a particularly low power level from the sun on the earth surface lies between 200 nm and 280 nm and is called solar blind Ultraviolet C (UV-C) band. Initially, the survey included the channel modeling of point-to-point links applying single and multi-scattering schemes for this range of wavelengths. Moreover, transmissions of pulsed and multicarrier signals were considered and the operation of a simple network infrastructure was modeled, as well. In the network scenario, the access to the medium was regulated by a Code Division Multiple Access (CDMA) scheme. Apart from the transmission under clear atmosphere conditions, the issue of the operation under a thicker atmosphere regime, like when fog appears, was also investigated. According to the results, a significant decrease of the power losses and an amelioration of the bandwidth appeared. The deviation from the initial results obtained

under clear sky conditions was a function of the atmosphere density and the size of the scattering centers' radii that were taken into account in the more complex version of the models that were regarded for some geometric configurations. In terms of the theoretical transmissions of signals, the propagation through a medium with larger density resulted in the reduction of the required power levels for the operation of the links in specific performance boundaries and the limitation of the intersymbol interference in some cases where the bandwidth was low under a clear atmosphere regime. Furthermore, in the networking scenario, when multiple nodes transmit simultaneously according to a probability, the lower optical power levels required in order to achieve specific Bit Error Rate (BER) values under a thick atmosphere case compared to the case of clear atmosphere were verified. In the experimental part, point-to-point links were deployed. In the optical part, the transmitter consisted of Light Emitting Diodes (LEDs) and at the receiving side an optical filter was followed by a Photo-Multiplier Tube (PMT). The first stage included the measurement of the power losses under clear atmosphere conditions up to 20 meters baseline range, for a large number of transmitter and receiver elevation angles. When artificial fog appeared in the wireless medium using a fog machine, a clear decrease of the power losses was measured, which was different for several distances between the transmitter and the receiver and several elevation angle pairs for non-line-of-sight configurations. For some links that were tested, the reduction of the power losses was over 7 dB during a large number of successive signal samples that were received. The lower values of the losses measured for some configurations were more than 10 dB lower compared to clear atmosphere. The second stage of the experimental measurements included the performance evaluation of the links in terms of the BER for transmissions of a 4-PPM modulated signal and a Flip-OFDM modulated signal for kilobit/s rates. The bit error rate for 10 kbit/s data rate was measured for the largest number of elevation angle pairs that could be settled and for the same distances as in the losses measurements set. The optimum demodulation process of 4-PPM was the reason of its superiority. Then, the fog machine was used for the evaluation of the impact of the medium thickening on the performance of the link under investigation each time. When the artificial fog appeared, the expected decrease of bit error rate at 10 kbit/s data rate for 4-PPM and Flip-OFDM and at 4 kbit/s data rate for Flip-OFDM was verified for several non-line-of-sight geometric configurations. The amelioration was over two orders of magnitude for some link cases than the respective measurements under clear sky conditions. Finally, the impact of fog on line-of-sight links was investigated. For these links, the filter and the Photo-Multiplier Tube were replaced by a proper lens and a pin photodiode. The appearance of fog had a devastating impact on performance, as a significant deterioration of the losses and the bit error rate appeared.

SUBJECT AREA: Optical Communications and Optical Networks

KEYWORDS: thermal treatment of plastic optical fibers, bandwidth, bit error rate, pulse position modulation, solar-blind UV-C band, optical wireless communications, scattering, absorption

Στη μητέρα μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατά τη διάρκεια της μακροχρόνιας διαδικασίας ολοκλήρωσης αυτής της εργασίας υπήρξε η ανάγκη ενός ευχάριστου κλίματος στο χώρο όπου αυτή πραγματοποιήθηκε, γι' αυτό και θέλω να ευχαριστήσω τους Αλέξανδρο Καψάλη, Χάρη Μεσαριτάκη, Βαγγέλη Γρίβα, Μιχάλη Μπούρμπο, Μαρία Καβρουλάκη, Απόστολο Αργύρη, Αντώνη Μπόγρη, Ηρακλή Σίμο, Χρήστο Σίμο, Θωμά Νίκα, Βαγγέλη Πικάση, Αλέξανδρο Φράγκο και Χρήστο Τσεκρέκο, όπως και τους Χαρίσιο Χριστόδουλο και Κωνσταντίνο Ντιρογιάννη που βοήθησαν σε αυτή την κατεύθυνση.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Αλέξανδρο Φράγκο, Βαγγέλη Πικάση και Βαγγέλη Γρίβα για ένα ακόμα λόγο, διότι αν δεν αναπτύσσονταν οι πειραματικές διατάξεις από αυτούς εντός του εργαστηρίου οπτικών επικοινωνιών οι διατάξεις των πομπών και των δεκτών για την εκτέλεση των πειραμάτων, απλά δε θα ολοκληρωνόταν αυτή η εργασία. Επιπλέον, η βοήθεια στην εκτέλεση των πειραμάτων σε εξωτερικό περιβάλλον από τον Βαγγέλη Πικάση ήταν παραπάνω από ουσιαστική για να εξαχθούν τα πειρατικά αποτελέσματα. Όμοια, την ίδια ευγνωμοσύνη οφείλω να αποδώσω και στον κύριο Χρήστο Σίμο που έδωσε τεχνογνωσία κρίσιμης σημασίας για να αναπτυχθούν κάποια πειράματα που έδωσαν κάποια πολύ χρήσιμα αποτελέσματα. Κι αυτή η βοήθεια αποκτά μεγαλύτερη σημασία όταν δίνεται με απόλυτη ανιδιοτέλεια.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Σεραφείμ Καραμπογιά για τις συμβουλές και το ενδιαφέρον που έδειχνε για την εξέλιξη της εργασίας σε όλη τη διάρκειά της.

Τρεις ανθρώπους που δεν πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω είναι οι φίλοι Μιχάλης Γιαννιάς, Δημήτρης Τσολάκος και Χρήστος Βεϊνίδης. Έχοντας κοινή αφετηρία, υπάρχει από παλιά αμοιβαία κατανόηση για τα προβλήματα και τις δυσκολίες, αλλά συγχρόνως χαρά και ευχαρίστηση όταν υπάρχει πρόοδος για τον καθένα μας. Το ίδιο, φυσικά, ισχύει και για τους Βαγγέλη Πικάση και Αλέξανδρο Φράγκο με τους οποίους εκτός από τη συνεργασία αναπτύχθηκε και μία φιλία όλα αυτά τα χρόνια και οι οποίοι επίσης συμπαραστάθηκαν σε όλη αυτή τη διαδικασία, έχοντας οι ίδιοι πλήρη εικόνα για τη δυσκολία της, αφού ολοκλήρωσαν τις διδακτορικές διατριβές τους παλαιότερα με επιτυχία.

Η ανάγκη αποσυμφόρησης από την πίεση της εργασίας και της καθημερινότητας πολλές φορές καλύπτεται και από το οικογενειακό περιβάλλον. Σε αυτό συνέβαλαν και οι αδερφές μου Βίκυ και Άννα Ράπτη ίσως χωρίς να το συνειδητοποιήσουν και γι' αυτό τις ευχαριστώ.

Ένας άνθρωπος στο οποίο πρακτικά οφείλεται η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας είναι ο επιβλέπων καθηγητής Δημήτρης Συβρίδης. Πρώτα από όλα, έδωσε την ευκαιρία για να ξεκινήσει αυτή η εργασία παρά τις αδυναμίες μου, ενώ συνέχισε να δίνει την ευκαιρία παρά τα λάθη στα οποία υπέπεσα κατά τη διάρκειά της. Το να τον ευχαριστήσω είναι το λιγότερο που μπορώ να κάνω, αλλά σίγουρα αυτό δεν αρκεί επειδή επένδυσε χρόνο και κόπο σε εμένα.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ πρέπει να δοθεί στον άνθρωπο που μου συμπαραστάθηκε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας, και όποτε χρειάστηκε ή χρειάζεται έδωσε ή δίνει συμβουλές με μόνο κριτήριο την αγάπη της για τα παιδιά της. Κι αυτός ο άνθρωπος δεν είναι άλλος από τη μητέρα μου.

ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά

- ⇒ N. Raptis, E. Pikasis, T. Nikas, M.-A. Fragkos, and D. Syvridis, “Experimental evaluation of modulation formats’ performance in diffuse UV channels,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 11, Jun. 2017.
- ⇒ N. Raptis, E. Pikasis, and D. Syvridis, “Power losses in diffuse ultraviolet optical communications channels,” *Optics Letters*, Vol. 41, No. 18, pp. 4421–4424, Sep. 2016.
- ⇒ N. Raptis, E. Pikasis, and D. Syvridis, “Performance evaluation of modulation and multiple access schemes in ultraviolet optical wireless connections for two atmosphere thickness cases,” *Journal of Optical Society of America A*, Vol. 33, No. 8, pp. 1628–1640, Jul. 2016.
- ⇒ N. Raptis and D. Syvridis, “Bandwidth enhancement of step index plastic optical fibers through a thermal treatment,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 16, pp. 1642–1645, Aug. 2013.
- ⇒ E. Pikasis, S. Karabetsos, N. Raptis, and D. Syvridis, “Performance evaluation of CDMA-DMT for 1-mm SI-POF short-range transmission links,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24, No. 22, pp. 2042–2045, Nov. 2012.
- ⇒ N. Raptis, E. Grivas, E. Pikasis, and D. Syvridis, “Space-time block code based MIMO encoding for large core step index plastic optical fiber transmission systems,” *Optics Express*, Vol. 19, No. 11, pp. 10336–10350, May 2011.
- ⇒ E. Grivas, N. Raptis, and D. Syvridis, “An optical mode filtering technique for the improvement of the large core SI-POF link performance,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, No. 12, pp. 1796–1801, Jun. 2010.
- ⇒ H. Simos, A. Bogris, N. Raptis, and D. Syvridis, “Dynamic properties of a WDM switching module based on active microring resonators,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 22, No. 4, pp. 206–208, Feb. 2010.

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά συνέδρια

- ⇒ N. Raptis, E. Pikasis, and D. Syvridis, “Performance evaluation of non-line-of-sight optical communication system operating in the solar-blind ultraviolet spectrum,” in *Proceedings of SPIE Conference on Advanced Free-Space Optical Communication Techniques and Applications*, Edinburgh, UK, paper 9991-3, pp. 1–13, Sep. 2016.
- ⇒ N. Raptis, E. Roditi, and D. Syvridis, “Power-spectrum requirements in ultraviolet optical wireless networks,” in *Proceedings of SPIE Conference on Free Space Laser Communications and Atmospheric Propagation XXVII, Photonic West, LASE*, San Francisco, CA, US, paper 9354-2, pp. 1–15, Feb. 2015.
- ⇒ N. Raptis, E. Grivas, E. Pikasis, and D. Syvridis, “Space-time block codes application in large core step-index plastic optical fibers,” in *Proceedings of the 20th International Conference on Plastic Optical Fibers*, Bilbao, Spain, pp. 31–36, Sep. 2011.
- ⇒ E. Pikasis, N. Raptis, E. Grivas, and D. Syvridis, “A space-frequency block encoded OFDM scheme for short area POF networks,” in *Proceedings of the*

20th International Conference on Plastic Optical Fibers, Bilbao, Spain, pp. 537–541, Sep. 2011.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	21
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	31
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	33
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	35
1.1 Ενσύρματη οπτική δικτύωση – δυνατότητες χρήσης της πλαστικής οπτικής ίνας σε τοπικά και ενδο-οικιακά δίκτυα	35
1.2 Ασύρματες διάχυτες οπτικές μεταδόσεις σε εξωτερικούς χώρους – δυνατότητα χρήσης της «ηλιακά τυφλής» μπάντας υπεριώδους ακτινοβολίας	41
1.3 Σύντομη αναφορά ερευνητικών θεμάτων που καλύφθηκαν	44
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ	53
2.1 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και δυνατότητες αξιοποίησης	53
2.1.1 Πεδία όπου υπάρχει ενδιαφέρον χρήσης ή χρησιμοποιούνται ήδη POFs	62
2.2 Κάλυψη αποστάσεων μεταξύ 50 και 100 μέτρων με χρήση πλαστικών οπτικών ινών για ρυθμούς μετάδοσης τουλάχιστον 1 Gbit/s	66
2.3 Περιγραφή συστημάτων επικοινωνιών με χρήση πλαστικών οπτικών ινών	76
2.3.1 Γενική περιγραφή καναλιού πλαστικής οπτικής ίνας – περιορισμοί και προέλευση αυτών	76
2.3.2 Περιορισμοί λόγω απωλειών	77
2.3.3 Περιορισμοί λόγω διασποράς των τρόπων	80
2.3.4 Σύζευξη των τρόπων	81
2.4 Θερμική κατεργασία – Βελτιώσεις	82
2.4.1 Θεωρητική περιγραφή φαινομένων	83
2.4.2 Πειραματική μελέτη	88
2.4.3 Θεωρητική επιβεβαίωση των πειραματικών μετρήσεων	115
2.4.4 Αποτελέσματα διάδοσης	126
2.5 Συμπεράσματα που προέκυψαν	129
3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΔΙΑΧΥΤΟΥ ΦΩΤΟΣ	135
3.1 Γενική εικόνα συστημάτων επικοινωνιών διάχυτων μεταδόσεων	135
3.2 Θεωρητική περιγραφή του καναλιού διάδοσης και του συστήματος μεταδόσεων	150
3.2.1 Ατμόσφαιρα, σκέδαση, απορρόφηση	150
3.2.2 Μοντέλο καναλιού	155
3.2.2.1 Εφαρμογή μοντέλου μονής σκέδασης	155
3.2.2.2 Εφαρμογή μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων. Τεχνική Monte Carlo	157
3.2.3 Μοντέλο συστήματος	163
3.2.3.1 Σχήματα διαμόρφωσης που εξετάστηκαν	163
3.2.3.2 Εκτιμήσεις του ρυθμού σφαλμάτων bits μέσω αναλυτικών τύπων	171
3.2.4 Αριθμητικά αποτελέσματα για το κανάλι	178
3.2.4.1 Εκτιμήσεις κρουστικών αποκρίσεων, αποκρίσεων συχνότητας και απωλειών καναλιών με εφαρμογή του μοντέλου μονής σκέδασης	178
3.2.4.2 Εκτιμήσεις απωλειών καναλιών με εφαρμογή του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων – συγκριτική μελέτη των θεωρητικών μοντέλων	182

3.2.5	Αριθμητικά αποτελέσματα για το τηλεπικοινωνιακό σύστημα	199
3.2.5.1	Λεπτομέρειες σεναρίου ζεύξης σημείου-προς-σημείου	199
3.2.5.2	Λεπτομέρειες δικτυακού σεναρίου	201
3.2.5.3	Αριθμητικά Αποτελέσματα για τη ζεύξη σημείου-προς-σημείο	204
3.2.5.4	Αριθμητικά αποτελέσματα για το δικτυακό σενάριο	209
3.2.5.5	Αριθμητικά αποτελέσματα σεναρίου ζεύξης σημείου-προς-σημείο με εφαρμογή τεχνικής πολλαπλών σκεδάσεων για το κανάλι	213
3.3	Πειραματικά αποτελέσματα	219
3.3.1	Χαρακτηριστικά καναλιού όσον αφορά τις απώλειες	221
3.3.2	Επιδόσεις συστήματος διάδοσης	233
3.3.3	Απώλειες καναλιού και επιδόσεις συστήματος για δέκτη με SiC φωτοδίοδο	250
3.4	Συμπεράσματα – Συγκρίσεις	255
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	261
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	271
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	273
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	277
Π.1	Οριακές συνθήκες για την επίλυση της εξίσωσης ροής ισχύος στις SI-POFs	277
Π.2	Βοηθητικά θεωρήματα για Γεννήτριες Συναρτήσεις Πιθανοτήτων	279
Π.3	Υπολογισμοί για τη μέση οπτική ισχύ διαμορφωμένων σημάτων κατά ACO-OFDM και σύνδεση με την ηλεκτρική ισχύ του αντίστοιχου (αρχικού) DMT σήματος	283
Π.4	Τυπικές κατανομές μεγέθους σταγονιδίων ομίχλης, σχετικές συναρτήσεις φάσης, εκτίμηση και στάθμιση της συνάρτησης φάσης για καθαρή ατμόσφαιρα με εφαρμογή του αστικού μοντέλου	285
Π.5	Σύγκριση κατανομών Poisson και Gaussian	291
Π.6	Επίδραση της θερμοκρασίας στο κέρδος και στην αποκρισιμότητα του PMT	292
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	297

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ 1, 2 ΚΑΙ 3

Σχήμα 1.1. Ιεραρχία του διαδικτύου και εκδοχές δικτύων πρόσβασης. O/E Optical-to-Electrical Conversion, E/O Electrical-to-Optical Conversion.....	35
Σχήμα 1.2. Ποσοστιαίο μερίδιο αγοράς των τεχνολογιών δικτύων πρόσβασης για σταθερές ευρυζωνικές συνδέσεις στην Ευρωπαϊκή Ένωση σε εξαμηνιαία εξέλιξη έντεκα ετών [7].	37
Σχήμα 1.3. Δείσδυση ευρυζωνικών συνδέσεων ταχυτήτων τουλάχιστον 30 Mbit/s και τουλάχιστον 100 Mbit/s στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σαν ποσοστό του πληθυσμού για το διάστημα από τον Ιούλιο του 2010 μέχρι και τον Ιούλιο του 2016 [7].	38
Σχήμα 1.4. Προβλέψεις της Cisco για (α) την παγκόσμια IP κίνηση με διάκριση βάσει του τομέα στον οποίο γεννάται η κίνηση ή απαιτείται η μεταφορά κίνησης σε Exabytes ανά μήνα, (β) την IP κίνηση καταναλωτών με κατανομή αυτής ανά τύπο κίνησης για το 2021.....	39
Σχήμα 2.1. (α) Πολύτροπη οπτική ίνα με βηματικό προφίλ του δείκτη διάθλασης, (β) πολύτροπη οπτική ίνα με βαθμιαίο προφίλ του δείκτη διάθλασης, (γ) μονότροπη οπτική ίνα. Η διάμετρος του πυρήνα είναι $2 \times r_{co}$ και η διάμετρος της ίνας είναι $2 \times r_f$	54
Σχήμα 2.2. Οπτική δικτύωση εντός σπιτιού με χρήση πλαστικών οπτικών ινών.	60
Σχήμα 2.3. Απεικόνιση με αναλογία μεγεθών της διατομής πλαστικών ινών και ινών διοξειδίου του πυριτίου.	62
Σχήμα 2.4. Τυπικά διαγράμματα συντελεστών απωλειών συναρτήσει του μήκους κύματος για ίνες PMMA SI-POF, Perfluorinated Polymer (PF) GI-POF PF και μονότροπη ίνα διοξειδίου πυριτίου (Single Mode Fiber – SMF). Το τμήμα πριν τα 1271 nm για την SMF περιλαμβάνει μόνο το αποτέλεσμα της σκέδασης Rayleigh.	67
Σχήμα 2.5. Πηγές εξασθένησης σε εξάρτηση με τη γωνία θ εξαιτίας (α) της διάδοσης, (β) των απωλειών στις ανακλάσεις και (γ) του φαινομένου Goos-Haenchen.	79
Σχήμα 2.6. Σύζευξη των τρόπων μέσα στην ίνα σε κέντρα σκέδασης είτε μέσα στον πυρήνα είτε στα όρια πυρήνα-μανδύα.	81
Σχήμα 2.7. Κανονικοποιημένη γωνιακή κατανομή της στενής δέσμης μέσα στην ίνα προτού ξεκινήσει η διάδοση.....	85
Σχήμα 2.8. Μέτρο της απόκρισης συχνότητας που παράγεται για διάφορες τιμές του συντελεστή σύζευξης (D). $R_{refl} = 0.99985$	85
Σχήμα 2.9. Μέτρο της απόκρισης συχνότητας που παράγεται για διάφορες τιμές του παράγοντα ανακλάσεων (R_{refl}). $D = 3 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$	87
Σχήμα 2.10. Πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις του μέτρου της απόκρισης συχνότητας της πλαστικής οπτικής ίνας (optical-to-optical) κατά τη διαδικασία θέρμανσης.	91
Σχήμα 2.11. Μεταβολή του οπτικού εύρους ζώνης με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα LUCEAT PMMA SI-POF 50 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.	92
Σχήμα 2.12. Μεταβολή του συντελεστή εξασθένησης στο DC με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα LUCEAT PMMA SI-POF 50 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.	93

Σχήμα 2.13. Μεταβολή του οπτικού εύρους ζώνης με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα TORAY PMMA SI-POF 50 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.	94
Σχήμα 2.14. Μεταβολή του συντελεστή εξασθένισης στο DC με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα TORAY PMMA SI-POF 50 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.	95
Σχήμα 2.15. Μεταβολή του οπτικού εύρους ζώνης με τη θερμοκρασία για ένα τμήμα ίνας TORAY PMMA SI-POF 50 μέτρων. Οι θερμοκρασίες κάλυψαν το εύρος από 22.5°C μέχρι 120°C, θερμοκρασία στην οποία η SI-POF καταστράφηκε. Δίνονται και οι καμπύλες προσαρμογής.....	97
Σχήμα 2.16. Μεταβολή του συντελεστή εξασθένισης στο DC με τη θερμοκρασία για ένα τμήμα ίνας TORAY PMMA SI-POF 50 μέτρων. Οι θερμοκρασίες κάλυψαν το εύρος από 22.5°C μέχρι 120°C, θερμοκρασία στην οποία η SI-POF καταστράφηκε. Δίνονται και οι καμπύλες προσαρμογής.....	98
Σχήμα 2.17. Πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις του μέτρου της απόκρισης συχνότητας (optical-to-optical) τόσο της SI-POF που υπέστη τη θέρμανση όσο και της SI-POF αναφοράς. Οι συνδέσεις μεταξύ ίνας και πηγής και μεταξύ ίνας και δέκτη είναι άμεσες (underfilled launching), χωρίς κάποια πρόσθετη διάταξη που διεγείρει πρόσθετους τρόπους.....	99
Σχήμα 2.18. Ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας για καθεμία SI-POF από το ζεύγος της LUCEAT των 50 μέτρων, 7460 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου και ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας της SI-POF πριν την εκκίνηση της θερμικής κατεργασίας.	100
Σχήμα 2.19. Βελτίωση του οπτικού εύρους ζώνης σε συνάρτηση του χρόνου μετά το σβήσιμο του φούρνου για την θερμικά κατεργασμένη LUCEAT SI-POF 50 μέτρων σε σύγκριση με την SI-POF αναφοράς του ίδιου κατασκευαστή με εφαρμογή άμεσης σύνδεσης της πηγής με την ίνα.....	101
Σχήμα 2.20. Ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας για καθεμία SI-POF από το ζεύγος της TORAY των 50 μέτρων, 4633 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου και ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας της SI-POF πριν την εκκίνηση της θερμικής κατεργασίας.	103
Σχήμα 2.21. Βελτίωση του οπτικού εύρους ζώνης σε συνάρτηση του χρόνου μετά το σβήσιμο του φούρνου για την θερμικά κατεργασμένη TORAY SI-POF 50 μέτρων σε σύγκριση με την SI-POF αναφοράς του ίδιου κατασκευαστή με εφαρμογή άμεσης σύνδεσης της πηγής με την ίνα.....	104
Σχήμα 2.22. Πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις του μέτρου της απόκρισης συχνότητας (optical-to-optical) τόσο της SI-POF που υπέστη τη θέρμανση όσο και της SI-POF αναφοράς. Η σύνδεση μεταξύ ίνας και δέκτη είναι άμεση, ενώ μεταξύ ίνας και πομπού χρησιμοποιήθηκε μία διάταξη τύπου scrambler για τη διέγερση όλων των τρόπων κατά την είσοδο της δέσμης στην ίνα καλύπτοντας την επιφάνεια του πυρήνα (overfilled launching) και ένας συνδετήρας για τη σύνδεση του scrambler με την ίνα. .	105
Σχήμα 2.23. Ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας για καθεμία εκ των δύο LUCEAT SI-POFs 50 μέτρων, με το scrambler συνδεδεμένο στην πειραματική διάταξη, 7460 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου.....	106
Σχήμα 2.24. Ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας για καθεμία εκ των δύο TORAY SI-POFs 50 μέτρων, με το scrambler συνδεδεμένο στην πειραματική διάταξη, 4633 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου.....	107

Σχήμα 2.25. Μεταβολή του οπτικού εύρους ζώνης με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα TORAY PMMA SI-POF 100 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.	108
Σχήμα 2.26. Βελτίωση του οπτικού εύρους ζώνης σε συνάρτηση του χρόνου μετά το σβήσιμο του φούρνου για την θερμικά κατεργασμένη TORAY SI-POF 100 μέτρων σε σύγκριση με τον εαυτό της προτού υποστεί τη θερμική κατεργασία με εφαρμογή άμεσης σύνδεσης της πηγής με την ίνα.....	109
Σχήμα 2.27. Πρότυπα κοντινού πεδίου για τις SI-POFs της TORAY. (α) NFP για την ίνα αναφοράς και (β) NFP για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 193 ώρες από τη στιγμή που τέθηκε εκτός λειτουργίας ο φούρνος.	111
Σχήμα 2.28. Πρότυπα κοντινού πεδίου για τις SI-POFs της TORAY σε τρισδιάστατη απεικόνιση. (α) NFP για την ίνα αναφοράς από το Σχήμα 2.27(α), (β) NFP για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα Σχήμα 2.27(β). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 193 ώρες από τη στιγμή που τέθηκε εκτός λειτουργίας ο φούρνος.	112
Σχήμα 2.29. Πρότυπα μακρινού πεδίου για τις SI-POFs 50 μέτρων της LUCEAT σε απεικόνιση δύο διαστάσεων. (α) FFP για την ίνα αναφοράς, (β) FFP για τη θερμικά κατεργασμένη. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 3237 ώρες από τη στιγμή που τέθηκε εκτός λειτουργίας ο φούρνος.	114
Σχήμα 2.30. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας καθεμίας από τις δύο ίνες 50 μέτρων της LUCEAT, 11897 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).....	116
Σχήμα 2.31. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας καθεμίας από τις δύο ίνες 50 μέτρων της TORAY, 9002 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).	118
Σχήμα 2.32. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας της POF 100 μέτρων της TORAY, πριν τη θερμική κατεργασία και 397 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).....	119
Σχήμα 2.33. Κανονικοποιημένη γωνιακή κατανομή της στενής δέσμης μέσα στην ίνα προτού ξεκινήσει η διάδοση με ενσωματωμένο το scrambler για (α) ίνα με $NA = 0.46$ όπως οι ίνες της LUCEAT και (β) ίνα με $NA = 0.50$ όπως οι ίνες της TORAY.	121
Σχήμα 2.34. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας καθεμίας από τις δύο ίνες 50 μέτρων της LUCEAT υπό την παρουσία του scrambler, 11897 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).....	122
Σχήμα 2.35. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας καθεμίας από τις δύο ίνες 50 μέτρων της TORAY υπό την παρουσία του scrambler, 9002 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).....	122
Σχήμα 2.36. Εκτίμηση του εύρους ζώνης από 50 ως 100 μέτρα για μία συμβατική και μία θερμικά κατεργασμένη POF τόσο της TORAY όσο και της LUCEAT. Τα διακριτά σημεία αφορούν τις πειραματικές τιμές εύρους ζώνης που προέκυψαν από τις σχετικές μετρήσεις των μέτρων των αποκρίσεων συχνότητας.....	125
Σχήμα 2.37. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση BER και διαγραμμάτων οφθαλμού.	126

Σχήμα 2.38. (α) Καμπύλες BER συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης bits για την POF αναφοράς και για την θερμικά κατεργασμένη POF της LUCEAT, 11946 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου. Διαγράμματα οφθαλμού για ρυθμούς μετάδοσης ίσους με (β) 1000 Mbit/s και (γ) 1400 Mbit/s για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα. Οι αντίστοιχες χρονικές κλίμακες ήταν 350 ps/div και 250 ps/div. (δ) Διάγραμμα οφθαλμού για ρυθμό μετάδοσης ίσο με 1000 Mbit/s χρησιμοποιώντας ως μέσο την ίνα αναφοράς. Η χρονική κλίμακα ήταν 350 ps/div. Η κλίμακα πλάτους ήταν 40 mV/div και στα τρία διαγράμματα οφθαλμού.....	127
Σχήμα 2.39. (α) Καμπύλες BER συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης bits για την POF αναφοράς και για την θερμικά κατεργασμένη POF της TORAY, 9359 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου. Διαγράμματα οφθαλμού για ρυθμούς μετάδοσης ίσους με (β) 550 Mbit/s και (γ) 750 Mbit/s για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα. Οι αντίστοιχες χρονικές κλίμακες ήταν 600 ps/div και 400 ps/div. (δ) Διάγραμμα οφθαλμού για ρυθμό μετάδοσης ίσο με 550 Mbit/s χρησιμοποιώντας ως μέσο την ίνα αναφοράς. Η χρονική κλίμακα ήταν 525 ps/div. Η κλίμακα πλάτους ήταν 30 mV/div και στα τρία διαγράμματα οφθαλμού.	129
Σχήμα 3.1. (α) Οπτικός δέκτης υπό γωνία ανύψωσης 90° και λήψη οπτικού θορύβου λόγω του ηλίου. (β) Συνιστώσες λαμβανόμενης ακτινοβολίας.	137
Σχήμα 3.2. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα.....	138
Σχήμα 3.3. Συντελεστής απορρόφησης του όζοντος συναρτήσει (α) του ύψους από την επιφάνεια της θάλασσας για μήκος κύματος ίσο με 265 nm και (β) του μήκους κύματος για τρία υψόμετρα.	140
Σχήμα 3.4. (α) Ποσοστιαία διέλευση φωτός (transmittance) από τον κερατοειδή χιτώνα, το υδατινό διάλυμα (aqueous humor), το φακό και το υαλοειδές διάλυμα που έχει μορφή ζελέ του ματιού. (β) Προσπίπτουσα ακτινοβολία (ξεκινώντας από το 100% εκτός του ματιού) διαδοχικά μετά το πέρασμα από το κερατοειδή χιτώνα πάνω στο υδατινό διάλυμα, μετά το πέρασμα από το υδατινό διάλυμα πάνω στο φακό, μετά το πέρασμα από το φακό πάνω στο υαλοειδές διάλυμα, μετά το υαλοειδές διάλυμα πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.	142
Σχήμα 3.5. Απλοποιημένη απεικόνιση της δομής του ματιού και ποιοτική απεικόνιση της διέλευσης φωτός σε διαφορετικές μπάντες μηκών κύματος.....	143
Σχήμα 3.6. (α) Ανώτατα όρια έκθεσης και (β) αντίστοιχοι συντελεστές φασματικού βάρους συναρτήσει του μήκους κύματος για ασύμφωνη ακτινοβολία μεταξύ 180 και 400 nm.....	144
Σχήμα 3.7. Γενική εικόνα της τοπολογίας μίας ζεύξης σημείου προς σημείου. Ο άξονας της δέσμης του πομπού και ο άξονας της γωνίας θέασης του δέκτη βρίσκονται στο επίπεδο xz.	145
Σχήμα 3.8. Καλυμμένος PMT μαζί με οπτικό φίλτρο και PMT ακάλυπτος τοποθετημένος στην κατάλληλη υποδοχή.	147
Σχήμα 3.9. PMT (α) με πλευρική λήψη φωτονίων, φωτοκάθοδο με ανάκλαση και δυνόδους διευθετημένες σε μορφή κυκλικού κελιού, (β) με φωτοκάθοδο με μετάδοση.	148
Σχήμα 3.10. (α) Συναρτήσεις φάσεις για τις σκεδάσεις Rayleigh και Mie. Για τη Mie σκέδαση χρησιμοποιήθηκε η γενίκευση της συνάρτησης της Henyey-Greenstein με $g = 0.72$ και $f = 0.5$. (β) Συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie από 250 nm μέχρι 2170 nm στην επιφάνεια της θάλασσας, σε 5 km και σε 23 km από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι τιμές των συντελεστών στη επιφάνεια της θάλασσας έχουν προκύψει για θερμοκρασία 15°C, ατμοσφαιρική πίεση 1013.25 mb και για καθαρή ατμόσφαιρα με ορατότητα 25 km.....	153

Σχήμα 3.11. Αλληλεπίδραση φωτονίου με μόριο ή μικροσωματίδιο για τις συνθήκες υπό τις οποίες προέκυψαν οι καμπύλες για μηδενικό υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας στο Σχήμα 3.10(β) και για μήκος κύματος 260 nm.....	155
Σχήμα 3.12. Απλοποιημένη απεικόνιση της ζεύξης χωρίς οπτική επαφή με έμφαση στην περιγραφή του μοντέλου μονής σκέδασης.	156
Σχήμα 3.13. Σχηματικές απεικονίσεις της θέσης και της κατεύθυνσης φωτονίου μετά από n σκεδάσεις, της θέσης και του προσανατολισμού του φωτοφωρατή (PMT), καθώς και των γωνιών που απαιτούνται για τον υπολογισμό της πιθανότητας το φωτόνιο να φθάσει στο δέκτη εντός του FOV του μετά από n σκεδάσεις.	161
Σχήμα 3.14. Απλοποίηση των σχηματικών απεικονίσεων της θέσης και της κατεύθυνσης φωτονίου μετά από n σκεδάσεις και της θέσης του φωτοφωρατή από το Σχήμα 3.13.	162
Σχήμα 3.15. Χρονικά οπτικά σήματα υπό διαμόρφωση (α) ΟΟΚ με NRZ παλμούς, (β) ΟΟΚ με RZ παλμούς με FWHM = 33%, (γ) ΟΟΚ με RZ παλμούς με FWHM = 67%, (δ) 4-PPM, (ε) ACO-OFDM με 17 περιπτώσεις υποφέροντα με δεδομένα και (στ) Flip-OFDM με 34 υποφέροντα με δεδομένα με απόσταση υποφερόντων 312.5 Hz για τις περιπτώσεις (ε) και (στ). R_s είναι ο ρυθμός των συμβόλων για το 4-PPM και $T_{o. s.}$ είναι η διάρκεια ενός ACO ή Flip-OFDM συμβόλου μαζί με το κυκλικό πρόθεμα.....	165
Σχήμα 3.16. Μέτρο του φάσματος των οπτικών σημάτων υπό διαμόρφωση (α) ΟΟΚ με NRZ παλμούς, (β) ΟΟΚ με RZ παλμούς με FWHM = 33%, (γ) ΟΟΚ με RZ παλμούς με FWHM = 67%, (δ) 4-PPM, (ε) ACO-OFDM με 17 περιπτώσεις υποφέροντα με δεδομένα και (στ) Flip-OFDM με 34 υποφέροντα με δεδομένα με απόσταση υποφερόντων 312.5 Hz για τις περιπτώσεις (ε) και (στ).	166
Σχήμα 3.17. Φιλτράρισμα Integrate-and-dump και φώραση για τρία σύμβολα που αφορούν σήμα διαμορφωμένο κατά 4-PPM.	168
Σχήμα 3.18. (α) Πομπός και (β) δέκτης για το σχήμα ACO-OFDM.....	169
Σχήμα 3.19. (α) Πομπός και (β) δέκτης για το σχήμα Flip-OFDM.....	170
Σχήμα 3.20. (α) Απλοποιημένη απεικόνιση της ζεύξης χωρίς οπτική επαφή με έμφαση στην περιγραφή του μοντέλου μονής σκέδασης για FOV = 180°. (β) Κάτοψη της ζεύξης.	179
Σχήμα 3.21. (α) Κρουστικές αποκρίσεις και (β) μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας για τρία περιβάλλοντα σκέδασης στα 265 nm.	180
Σχήμα 3.22. (α) Οπτικό εύρος ζώνης και (β) απώλειες σε συνάρτηση της απόστασης για γωνίες ανύψωσης του πομπού 45° και 60°, γωνία απόκλισης της δέσμης του πομπού 10°, FOV του δέκτη 180° (γωνία ανύψωσης του δέκτη 90°), για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.....	182
Σχήμα 3.23. Κατανομή μεγεθών μικροσωματιδίων αστικού μοντέλου αερολυμάτων σε $\text{cm}^{-3} \times \mu\text{m}^{-1}$ για σχετική υγρασία και ορατότητα (α) 30%, 15 km και (β) 98%, 2 km, αντίστοιχα.	184
Σχήμα 3.24. (α) Θεωρητική εκτίμηση των απωλειών ισχύος (Power Losses – PL) για διαφορετικές αποστάσεις κάλυψης και για διαφορετικές ακτίνες σταγονιδίων ομίχλης ξεκινώντας από συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας (ακτίνες σταγονιδίων ομίχλης ίση με 0) μέχρι πολύ πυκνή ατμόσφαιρα (ακτίνες σταγονιδίων ίση με 10 μm). (β) Εκτιμήσεις των συντελεστών σκέδασης Rayleigh ($k_{s,Ray}$), Mie ($k_{s,Mie}$), απορρόφησης (k_{abs}) του μέσου εφαρμόζοντας το αστικό μοντέλο για καθεστώς αραιής ατμόσφαιρας με RH = 30%, Vis. = 15 km και οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης αποκλειστικά λόγω της ομίχλης με συγκέντρωση 50 σταγονιδίων ανά cm^3	190

Σχήμα 3.25. Κανονικοποιημένες κρουστικές αποκρίσεις των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 50 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για (α) αραιή και (β) πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.....	192
Σχήμα 3.26. (α) Μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 50 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Όλες οι αποκρίσεις συχνότητας έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη τιμή τους. (β) Σωρευτικές απώλειες συναρτήσεως του πλήθους των σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο βάσει του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.....	193
Σχήμα 3.27. Κανονικοποιημένες κρουστικές αποκρίσεις των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 100 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για (α) αραιή και (β) πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.....	194
Σχήμα 3.28. (α) Μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 100 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Όλες οι αποκρίσεις συχνότητας έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη τιμή τους. (β) Σωρευτικές απώλειες συναρτήσεως του πλήθους των σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο βάσει του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.....	195
Σχήμα 3.29. Κανονικοποιημένες κρουστικές αποκρίσεις των καναλιών για απόσταση 100 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για (α) αραιή και (β) πολύ πυκνή ατμόσφαιρα με πολύ στενή γωνία απόκλισης της δέσμης (φ_{Tr}) και ακραίες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη.	197
Σχήμα 3.30. (α) Μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 100 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Όλες οι αποκρίσεις συχνότητας έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη τιμή τους. (β) Σωρευτικές απώλειες συναρτήσεως του πλήθους των σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο βάσει του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Και στα δύο σχήματα θεωρήθηκε πολύ στενή γωνία απόκλισης της δέσμης (φ_{Tr}) και ακραίες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη.	198
Σχήμα 3.31. Διαμορφώσεις της υποδομής που αφορούν μικρό δίκτυο με (α) 4 ή 6 κόμβους τοποθετημένοι στα 50 μέτρα από τον κεντρικό και (β) 6 κόμβους με 2 στα 10 μέτρα και 3 στα 50 μέτρα από τον κεντρικό κόμβο. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι κόμβοι που προκαλούν παρεμβολές μεταδίδουν με πιθανότητα $p_{prob.TR}$	203
Σχήμα 3.32. BER σαν συνάρτηση (α) της μέσης εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος (P_{TR}) και (β) του ηλεκτρικού SNR (SNR_{el}) για τα σχήματα διαμόρφωσης του υπομνήματος, θεωρώντας μεταδόσεις σε αραιή ατμόσφαιρα. Το ίδιο υπόμνημα ισχύει για τα (α) και (β).	206
Σχήμα 3.33. BER σαν συνάρτηση (α) της μέσης εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος (P_{TR}) και (β) του ηλεκτρικού SNR (SNR_{el}) για τα σχήματα διαμόρφωσης του υπομνήματος, θεωρώντας μεταδόσεις σε πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Το ίδιο υπόμνημα ισχύει για τα (α) και (β). Στο (β) απεικονίζονται και οι αντίστοιχοι θεωρητικοί τύποι της υποενότητας 3.2.3.2.....	207

Σχήμα 3.34. (α) BER και (β) ηλεκτρικό SNR ($SNR_{el.}$) σε συναρτήσεις του παράγοντα μ για το ACO και το Flip-OFDM σε αραιή ατμόσφαιρα.....	209
Σχήμα 3.35. Απαιτούμενα επίπεδα μέσης οπτικής ισχύος ως προς την πιθανότητα $\rho_{prob. TR}$ (α) υπό καθεστώς καθαρής και (β) υπό καθεστώς πολύ πυκνής ατμόσφαιρας, για BER 10^{-3} και 10^{-4} , για κωδικοποιημένα OOK και 4-PPM μέσα σε ένα δίκτυο 4 κόμβων με 3 να εκπέμπουν. Οι μεταδόσεις ενός εξ αυτών αξιολογήθηκαν. Το ίδιο υπόμνημα και ο ίδιος κατακόρυφος άξονας ισχύουν για τα (α) και (β).....	211
Σχήμα 3.36. Απαιτούμενα επίπεδα μέσης οπτικής ισχύος ως προς την πιθανότητα $\rho_{prob. TR}$ (α) υπό καθεστώς καθαρής και (β) υπό καθεστώς πολύ πυκνής ατμόσφαιρας για BER = 10^{-3} . Α: Κωδικοποιημένο OOK, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, 5 κόμβοι στα 50 μέτρα, Β: Κωδικοποιημένο OOK, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, 2 από τους 5 κόμβους στα 10 μέτρα, Γ: Κωδικοποιημένο 4-PPM, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, 5 κόμβοι στα 50 μέτρα, Δ: Κωδικοποιημένο 4-PPM, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, 2 από τους 5 κόμβους στα 10 μέτρα, Ε: Κωδικοποιημένο OOK, $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, 5 κόμβοι στα 50 μέτρα, ΣΤ: Κωδικοποιημένο OOK, $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, 2 από τους 5 κόμβους στα 10 μέτρα, Ζ: Κωδικοποιημένο 4-PPM, $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, 5 κόμβοι στα 50 μέτρα, Η: Κωδικοποιημένο 4-PPM, $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, 2 από τους 5 κόμβους στα 10 μέτρα. Το ίδιο υπόμνημα και ο ίδιος κατακόρυφος άξονας ισχύουν για τα (α) και (β).....	212
Σχήμα 3.37. (α) Συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie ως pdf για καθαρή ατμόσφαιρα εκφρασμένη μέσω του αποτελέσματος της αριθμητικής επίλυσης του τελευταίου ολοκληρώματος στην (3.31) και μέσω της συνάρτησης της Henyey-Greenstein. (β) Αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής για το μέσο μετά τη στάθμιση όλων των συναρτήσεων φάσης υπό καθαρή ατμόσφαιρα και υπό καθεστώς ομίχλης με σταγονίδια διαφόρων ακτίνων και πυκνότητα αυτών 50 dr./cm^3	215
Σχήμα 3.38. Αριθμητική εκτίμηση του SNR για διαφορετικές αποστάσεις ζεύξεων ($r = 20$ και 50 m) και διαφορετικές ακτίνες σταγονιδίων λόγω ομίχλης εκκινώντας από συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας ($r_D = 0$) μέχρι την περίπτωση πολύ πυκνής ατμόσφαιρας ($r_D = 10 \mu\text{m}$), για 4-PPM και Flip-OFDM. Οι δύο συγκεντρώσεις σταγονιδίων για τις οποίες έγιναν οι εκτιμήσεις του SNR ήταν 50 και 200 dr./cm^3	217
Σχήμα 3.39. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση των απωλειών και των επιδόσεων των σημάτων.....	222
Σχήμα 3.40. Απώλειες ισχύος στα 265 nm , όταν η γωνία ανύψωσης του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) κυμαίνεται μεταξύ 0° και 80° , για γωνία ανύψωσης πομπού ίση με $\theta_{Tr. elev.} = 30^\circ$ και 60° . Οι απώλειες μετρήθηκαν για μήκη ζεύξης 5 , 10 και 20 μέτρα.....	224
Σχήμα 3.41. Απώλειες οπτικού καναλιού στα 265 nm , με τη $\theta_{Tr. elev.}$ στον οριζόντιο άξονα να κυμαίνεται μεταξύ 10° και 80° και με τη $\theta_{Rec. elev.}$ στον κατακόρυφο άξονα να κυμαίνεται μεταξύ 0° και 80° . Οι αποστάσεις κάλυψης ήταν (α) 5 , (β) 10 και (γ) 20 μέτρα, αντίστοιχα.....	225
Σχήμα 3.42. Πειραματική διάταξη με την προσθήκη της μηχανής παραγωγής ομίχλης. Ισχύουν όσα αναφέρονται στο Σχήμα 3.39.....	226
Σχήμα 3.43. Εξέλιξη των απωλειών του ασύρματου καναλιού διάχυτων μεταδόσεων όταν το μέσο είναι αραιό και όταν εισάγεται τεχνητά ομίχλη από τη σχετική μηχανή, με (α) $\theta_{Tr. elev.} = 70^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 70^\circ$, μήκος ζεύξης 7 μέτρων και με (β) $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, μήκος ζεύξης 10 μέτρων.....	227
Σχήμα 3.44. Οι μέσες τιμές των απωλειών (σε δεκαδικές τιμές) μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις με και χωρίς ομίχλη, για τα 5 σενάρια γεωμετρικών σχηματισμών των ζεύξεων δύο σημείων που εξετάστηκαν. Τα πρώτα δύο αφορούν απόσταση 7 μέτρων, τα επόμενα δύο απόσταση 10 μέτρων και το τελευταίο απόσταση 20 μέτρων.....	229

Σχήμα 3.45. Μέσες απώλειες (σε dB) σε αραιό και πυκνό μέσο λόγω απουσίας ή παρουσίας ομίχλης, αντίστοιχα, και ελάχιστες απώλειες υπό καθεστώς παρουσίας ομίχλης, για 6 γεωμετρικούς σχηματισμούς ζεύξεων που εξετάστηκαν. Οι πρώτες δύο αφορούν απόσταση 7 μέτρων, οι επόμενες δύο αφορούν απόσταση 10 μέτρων και οι τελευταίες δύο αφορούν 20 μέτρα.....	231
Σχήμα 3.46. Πέντε περίοδοι του ημιτονικού σήματος όταν το μέσο ήταν αραιό και όταν η μηχανή παραγωγής ομίχλης τέθηκε σε λειτουργία και οι απώλειες ήταν στην ελάχιστη τιμή τους. Η εξέλιξη των απωλειών ήταν αυτή στο Σχήμα 3.43(β) ($\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, μήκος ζεύξης 10 μέτρων).....	233
Σχήμα 3.47. Ρυθμός σφαλμάτων bits σε συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) για τρία μήκη ζεύξεων ($r = 5$ m, 10 m και 20 m), με μεταδόσεις στα 265 nm και $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$	236
Σχήμα 3.48. Ρυθμός σφαλμάτων bits σε συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) για τρία μήκη ζεύξεων ($r = 5$ m, 10 m και 20 m), με μεταδόσεις στα 265 nm και $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$	236
Σχήμα 3.49. Δεκαδικός λογάριθμος του ρυθμού σφαλμάτων bits σε συνάρτηση των γωνιών ανύψωσης του πομπού ($\theta_{Tr. elev.}$) και του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) για (α) 10 μέτρα και Flip-OFDM, (β) 10 μέτρα και 4-PPM, (γ) 20 μέτρα και Flip-OFDM, (δ) 20 μέτρα και 4-PPM, όλα στα 265 nm και υπό συνθήκες αραιής ατμόσφαιρας.	239
Σχήμα 3.50. Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων bits για $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, απόσταση πομπού-δέκτη $r = 10$ m και ρυθμό μετάδοσης bits $R_b = 10$ kbit/s, όταν μεταδόθηκε (α) Flip-OFDM και (β) 4-PPM.	241
Σχήμα 3.51. Δέκα 4-PPM σύμβολα σαν σήμα τάσης, μετά από διάδοση σε ένα μέσο πυκνό σε σκεδαστές λόγω ομίχλης (μαύρη καμπύλη). Η μετάδοση σε ένα αραιό μέσο οδήγησε σε σήμα σημαντικά μικρότερου πλάτους. Οι συνθήκες με και χωρίς ομίχλη ήταν αυτές υπό τις οποίες προέκυψε το Σχήμα 3.50(β). $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, $r = 10$ m, $R_b = 10$ kbit/s.	243
Σχήμα 3.52. Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων μετά από μετάδοση (α) Flip-OFDM και (β) 4-PPM με $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, απόσταση πομπού-δέκτη $r = 20$ m, $R_b = 10$ kbit/s.	244
Σχήμα 3.53. (α) Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων μετά από μετάδοση 4-PPM και (β) δέκα 4-PPM σύμβολα σαν σήμα τάσης, μετά από διάδοση σε ένα μέσο πυκνό σε σκεδαστές λόγω ομίχλης (μαύρη καμπύλη). Η μετάδοση σε ένα αραιό μέσο οδήγησε σε σήμα σημαντικά μικρότερου πλάτους. Τα αποτελέσματα προέκυψαν για $\theta_{Tr. elev.} = 50^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 25^\circ$, απόσταση πομπού-δέκτη $r = 20$ m, $R_b = 10$ kbit/s.	246
Σχήμα 3.54. Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων μετά από μετάδοση Flip-OFDM σε ρυθμό 4 kbit/s με γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 50^\circ$, αντίστοιχα, για αποστάσεις πομπού-δέκτη (α) $r = 7$ m, (β) $r = 5$ m.	248
Σχήμα 3.55. Διαγράμματα αστερισμών για τα σύμβολα μετά τον FFT στο δέκτη μετά από μετάδοση Flip-OFDM σε ρυθμό 4 kbit/s με γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, αντίστοιχα, για απόσταση πομπού-δέκτη $r = 7$ m. (α) Το εσωτερικό διάγραμμα περιλαμβάνει τα Q-PSK σύμβολα που έλαβε ο δέκτης με μεταδόσεις σε καθαρή ατμόσφαιρα και το εξωτερικό διάγραμμα περιλαμβάνει τα Q-PSK σύμβολα υπό καθεστώς εμφάνισης ομίχλης. Τα εσωτερικά σύμβολα έχουν πολλαπλασιαστεί επί 5. (β) Διάγραμμα αστερισμού των Q-PSK συμβόλων στο Σχήμα 3.55(α) για την περίπτωση αραιού μέσου χωρίς ομίχλη χωρίς παρέμβαση στις διαστάσεις των αξόνων.	249

Σχήμα 3.56. Διαγράμματα αστερισμών για τα σύμβολα μετά τον FFT στο δέκτη μετά από μετάδοση Flip-OFDM σε ρυθμό 4 kbit/s με γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, αντίστοιχα, για απόσταση πομπού-δέκτη $r = 5$ m. (α) Το εσωτερικό διάγραμμα περιλαμβάνει τα Q-PSK σύμβολα που έλαβε ο δέκτης με μεταδόσεις σε καθαρή ατμόσφαιρα και το εξωτερικό διάγραμμα περιλαμβάνει τα Q-PSK σύμβολα υπό καθεστώς εμφάνισης ομίχλης. Τα εσωτερικά σύμβολα έχουν πολλαπλασιαστεί επί 4. (β) Διάγραμμα αστερισμού των Q-PSK συμβόλων στο Σχήμα 3.56(α) για την περίπτωση αραιού μέσου χωρίς ομίχλη χωρίς παρέμβαση στις διαστάσεις των αξόνων.....250

Σχήμα 3.57. (α) Χρονική εξέλιξη της οπτικής ισχύος όταν το μέσο ήταν αραιό και όταν εμφανίστηκε τεχνητή ομίχλη χρησιμοποιώντας τη σχετική μηχανή για $\theta_{Tr. elev.} = 10^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 5^\circ$. Η εμβέλεια της ζεύξης ήταν 5 μέτρα. (β) Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων μετά από μετάδοση Flip-OFDM, για $\theta_{Tr. elev.} = 10^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 0^\circ$, με την εμβέλεια της ζεύξης στα 7 μέτρα. Η μηχανή ομίχλης τοποθετήθηκε στη μέση της ζεύξης και στις δύο περιπτώσεις.....252

Σχήμα 3.58. Διαγράμματα αστερισμού για Q-PSK σύμβολα υπό (α) συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας, (β) την παρουσία τεχνητής ομίχλης, (γ) συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας μετά τη διάλυση της ομίχλης. Η γεωμετρική τοπολογία για τη ζεύξη ήταν αυτή για την οποία προέκυψε το διάγραμμα συσσώρευσης σφαλμάτων συναρτήσεως των bits που μεταδόθηκαν και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.57(β).253

Σχήμα 3.59. Απώλειες ισχύος συναρτήσεως της απόστασης της ζεύξης για μεταδόσεις σε εσωτερικό διάδρομο υπό καθεστώς οπτικής επαφής πομπού και δέκτη και μηδενικές γωνίες ανύψωσης. Στο δέκτη χρησιμοποιήθηκε η φωτοδίοδος SiC μαζί με το φακό...254

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

Σχήμα Π - 1. (α) Κατανομές μεγέθους σταγονιδίων για δύο μοντέλα ομίχλης από ακτινοβολία και ενός από κίνηση αέριων μαζών. (β) Αντίστοιχες συναρτήσεως φάσεις σαν pdf για τα τρία μοντέλα ομίχλης. Στο διάγραμμα απεικονίζεται και η Henyey-Greenstein συνάρτηση φάσης με παράγοντα ασυμμετρίας $g = 0.871$ που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις της υποπαραγράφου 3.2.5.5 για την περίπτωση όπου θεωρείται ότι υπάρχει και ομίχλη στο μέσο με ακτίνες σταγονιδίων $r_D = 10$ μm . Το υπόμνημα αφορά και τα δύο διαγράμματα όσον αφορά τα τρία μοντέλα ομίχλης.287

Σχήμα Π - 2. (α) Οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης αποκλειστικά λόγω της ομίχλης με συγκέντρωση 50 σταγονιδίων ανά cm^3 από το Σχήμα 3.24(β), μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης για τα τρία μοντέλα ομίχλης από το Σχήμα Π - 1. (β) Αθροιστικές συναρτήσεως κατανομής για το μέσο μετά τη στάθμιση όλων των συναρτήσεων φάσης υπό καθαρή ατμόσφαιρα και υπό καθεστώς ομίχλης με σταγονίδια ακτίνας $r_D = 10$ μm και πυκνότητα αυτών 50 dr./cm^3 από το Σχήμα 3.37(β). Περιλαμβάνονται και οι 3 αθροιστικές συναρτήσεως κατανομής υπό καθεστώς ομίχλης για το μέσο μετά τη στάθμιση όλων των συναρτήσεων φάσης θεωρώντας τα χαρακτηριστικά για τα 3 μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα Π - 1. Για τα αρχικά ισχύουν τα εξής: MRF: Moderate Radiation Fog, HRF: Heavy Radiation Fog, HAF: Heavy Advection Fog.....288

Σχήμα Π - 3. (α) Συναρτήσεως φάσης για τη σκέδαση Mie για καθαρή ατμόσφαιρα ως pdf εκφρασμένες μέσω του αποτελέσματος της αριθμητικής επίλυσης του τελευταίου ολοκληρώματος στην (3.31) και μέσω της συνάρτησης της Henyey-Greenstein για $g \approx 0.74$ από το Σχήμα 3.37(α). Συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie για καθαρή ατμόσφαιρα ως pdf εκφρασμένη μέσω του αποτελέσματος της ακριβέστερης αριθμητικής επίλυσης του τελευταίου ολοκληρώματος στην (3.31). Βοηθητικά δίνεται η

συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Rayleigh και οι μεμονωμένες συναρτήσεις φάσης που αφορούν τα μεγάλα και μικρά αερολύματα του αστικού μοντέλου για σχετική υγρασία 30% και ορατότητα 15 km. (β) Αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής για το μέσο υπό καθαρή ατμόσφαιρα μετά τη στάθμιση όλων των συναρτήσεων φάσης (για τα μόρια και για τα μικροσωματίδια) έχοντας χρησιμοποιήσει τη συνάρτηση Henyey-Greenstein με $g = 0.74$ για τη σκέδαση Mie, τη συνάρτηση μετά την αριθμητική ολοκλήρωση στην (3.31), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.37(β) για καθαρή ατμόσφαιρα, και τη συνάρτηση μετά την ακριβέστερη ολοκλήρωση των εξισώσεων για τη σκέδαση Mie στην (3.31)..290

Σχήμα Π - 4. Συνάρτηση Πιθανότητας Μάζας (PMF) και Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (PDF) για τις κατανομές Poisson και Gaussian, αντίστοιχα, για μέσο πλήθος και διακύμανση φωτοηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο ίσο με (α) $n_{ph-e} = (\sigma_{ph-e})^2 = 4$, (β) $n_{ph-e} = (\sigma_{ph-e})^2 = 16$ και (γ) $n_{ph-e} = (\sigma_{ph-e})^2 = 64$292

Σχήμα Π - 5. Αποκρισιμότητα σε συνάρτηση (α) του μήκους κύματος για τρεις τιμές θερμοκρασίας και (β) της θερμοκρασίας για τα 265 nm.....293

Σχήμα Π - 6. Κέρδος του PMT σε συνάρτηση (α) της τάσης ελέγχου του PMT για τρεις τιμές θερμοκρασίας (β) της θερμοκρασίας για τάση ελέγχου 2.5 V.....294

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ 1, 2 ΚΑΙ 3

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά ινών διοξειδίου πυριτίου βηματικού και βαθμιαίου διάθλασης. OFL: Overfilled Launching, HP-EMB: High-Performance Effective Modal Bandwidth.....	55
Πίνακας 2.2. Χαρακτηριστικά πλαστικών ινών βηματικού και βαθμιαίου διάθλασης. OFL: Overfilled Launching, UFL: Underfilled Launching.....	58
Πίνακας 2.3. Τιμές οπτικού εύρους ζώνης από τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας στο Σχήμα 2.8 και στο Σχήμα 2.9 για τις τιμές του συντελεστή σύζευξης (D) και του παράγοντα ανακλάσεων (R_{refl}) που εξετάστηκαν, αντίστοιχα.	86
Πίνακας 2.4. Συγκεντρωτικός πίνακας θεωρητικών και αντίστοιχων πειραματικών τιμών εύρους ζώνης όπως προέκυψαν για τις ίνες της LUCEAT και της TORAY για μήκη 50 και 100 μέτρα (αν υπήρχε διαθεσιμότητα).	123
Πίνακας 3.1. Πυκνότητα μορίων τυπικής ατμόσφαιρας χειμώνα στις ΗΠΑ στην επιφάνεια της θάλασσας.	151
Πίνακας 3.2. Συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie και απορρόφησης, καθώς και εκτιμήσεις του εύρους ζώνης και των απωλειών για τις τρεις περιπτώσεις ατμόσφαιρας που εξετάστηκαν για ζεύξη με $r = 50$ m, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$, $\varphi_{Tr.} = 10^\circ$, $\varphi_{Rec.} = 180^\circ$	181
Πίνακας 3.3. Παράμετροι αστικού μοντέλου αερολυμάτων παραδείγματος 1 και 2 από το Σχήμα 3.23(α) και (β). Οι δείκτες διάθλασης προέκυψαν για μήκος κύματος ίσο με 265 nm.....	185
Πίνακας 3.4. Συγκεντρωτικός πίνακας για απώλειες και εύρος ζώνης των καναλιών των τριών ζεύξεων, για τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας του μέσου σε σκεδαστές όπως εκτιμήθηκαν από τα δύο θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν από το Σχήμα 3.25 ως και το Σχήμα 3.30.....	199

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

Πίνακας Π - 1. Τιμές παραμέτρων στην (Π.35) για περιπτώσεις ομίχλης από κίνηση αέριων μαζών και από ακτινοβόληση [170].	286
--	-----

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία διενεργήθηκε στα πλαίσια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής του υποψήφιου διδάκτορα Ράππη Νικολάου, αφορούσε τη μελέτη δικτύων βραχείας εμβέλειας που βασίζονται σε ενσύρματα και ασύρματα οπτικά μέσα και πραγματοποιήθηκε υπό την εποπτεία του καθηγητή Δημητρίου Συβρίδη. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας, οι μετρήσεις που αφορούσαν το δεύτερο κεφάλαιο και πιο συγκεκριμένα, τις πλαστικές οπτικές ίνες, πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο οπτικών επικοινωνιών και δικτύων επικεφαλής του οποίου είναι ο καθηγητής Δημήτριος Συβρίδης. Το εργαστήριο βρίσκεται εντός του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Οι μετρήσεις που αφορούσαν τις διάχυτες μεταδόσεις στη μπάντα μεταξύ 200 nm και 280 nm, όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3, πραγματοποιήθηκαν στον προαύλιο χώρο του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών. Όσον αφορά τις προσομοιώσεις οι οποίες βασίστηκαν στα θεωρητικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στις δύο ενότητες, αυτές εκτελέστηκαν σε υπολογιστές του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών. Οι δύο θεματικές ενότητες καλύφθηκαν σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα με μικρή επικάλυψη μεταξύ τους. Χρονικά, αρχικά καλύφθηκε το τμήμα των ενσύρματων και έπειτα το τμήμα των ασύρματων μεταδόσεων.

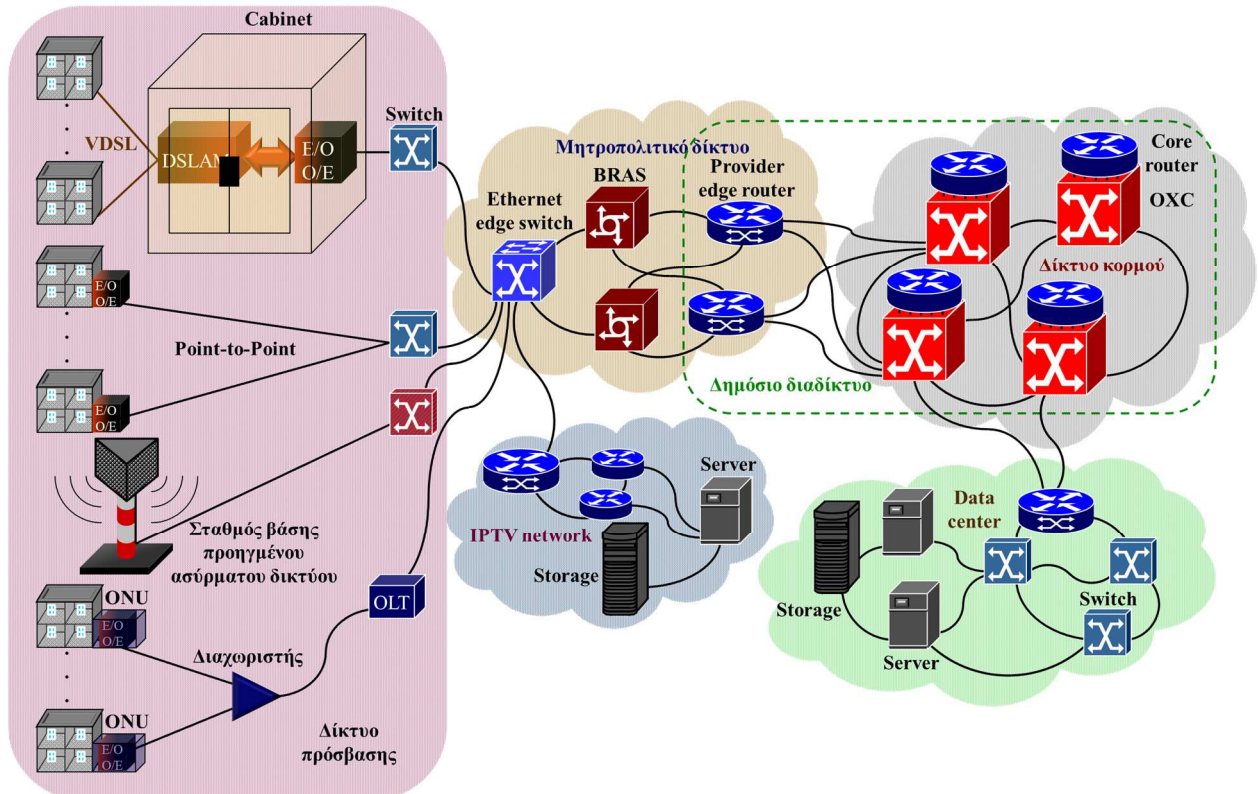
Όσον αφορά την πηγή laser, τις πλαστικές οπτικές ίνες, τη φωτοδίοδο με τον ενισχυτή διαγωγιμότητας, την κάμερα, τα φίλτρα και το φακό που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα των ενσύρματων μεταδόσεων, όλα ήταν εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα. Εμπορικά διαθέσιμες ήταν και οι ακόλουθες δομικές μονάδες: οι πηγές στα 265 nm, το οπτικό φίλτρο, ο φωτοπολλαπλασιαστής και ο ηλεκτρικός ενισχυτής. Από αυτές τις δομικές μονάδες κατασκευάστηκαν στην πλήρη τους μορφή ο πομπός και ο δέκτης για τις ενσύρματες και για τις ασύρματες ζεύξεις. Επομένως, η κατασκευή των διατάξεων πομπού και δέκτη που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ήταν κρίσιμης σημασίας, όπως μεγάλης σημασίας ήταν και το στήσιμο των πειραματικών σχηματισμών που αξιολογήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, στο τμήμα των ενσύρματων μεταδόσεων, η κατασκευή του πομπού πραγματοποιήθηκε πλήρως εντός του εργαστηρίου οπτικών επικοινωνιών από τον κύριο Ευάγγελο Γρίβα. Μένοντας στο τμήμα των ενσύρματων μεταδόσεων με οπτικές ίνες, η παροχή τεχνογνωσίας για το στήσιμο συγκεκριμένων πειραμάτων από τον κύριο Χρήστο Σίμο αποτέλεσε την αιτία συλλογής πρόσθετων αποτελεσμάτων. Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τις θεωρητικές ερμηνείες που δόθηκαν σχετικά με την επίδραση που είχε η διαδικασία θέρμανσης στα χαρακτηριστικά των πλαστικών οπτικών ινών στις οποίες εφαρμόστηκε. Αντίστοιχα, οι διατάξεις πομπού και δέκτη που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα των ασύρματων μεταδόσεων σε εξωτερικό χώρο κατασκευάστηκαν από τους κυρίους Αλέξανδρο Φράγκο, Θωμά Νίκα και Ευάγγελο Πικάση. Το τμήμα του λογισμικού που αφορούσε την επεξεργασία των σημάτων μετά την ασύρματη μετάδοση και τη λήψη τους στο δέκτη υλοποιήθηκε εξολοκλήρου από τον κύριο Ευάγγελο Πικάση. Εδώ, αξίζει να αναφερθεί ότι το τμήμα της διάταξης του δέκτη με το οποίο κρατούνται σταθερά συνδεδεμένα το φίλτρο με τον φωτοπολλαπλασιαστή αναπτύχθηκε με τη χρήση 3D εκτυπωτή υπό τον πλήρη έλεγχο του κυρίου Αλέξανδρου Φράγκου. Η συνεισφορά των συναδέλφων ήταν ανεκτίμητη καθώς δε θα προέκυπτε το μεγαλύτερο πλήθος από τις πειραματικές μετρήσεις, ώστε να ακολουθήσουν και οι αντίστοιχες δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια και περιοδικά.

Φυσικά, δε θα πρέπει να εξαιρεθεί και η καθοδήγηση από τον επικεφαλής του εργαστηρίου οπτικών επικοινωνιών καθηγητή κύριο Δημήτριο Συβρίδη, αλλά και η βοήθεια στη συγγραφή των κειμένων που αποτέλεσαν τη βάση των δημοσιεύσεων, ώστε να ξεπεραστούν εμφανείς αδυναμίες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ενσύρματη οπτική δικτύωση – δυνατότητες χρήσης της πλαστικής οπτικής ίνας σε τοπικά και ενδο-οικιακά δίκτυα

Οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες σε μετάδοση δεδομένων κάνουν επιτακτική την ανάγκη της εξέλιξης και της επέκτασης των οπτικών δικτύων. Αυτό γίνεται εντονότερο με την επικράτηση πολλών υπηρεσιών που βασίζονται σε τεχνολογίες σύννεφου (cloud-based services). Για την υποστήριξη διαφορετικών εφαρμογών με διαφορετικές απαιτήσεις, όπως τηλεόραση σε υψηλή ανάλυση 4K/8K ή ασύρματες υπηρεσίες 4ης και 5ης γενιάς (4G/5G), η οπτική δικτύωση σε ένα τμήμα της υποδομής γίνεται απαραίτητη [1]. Θεωρώντας μία συμβατική ιεράρχηση του δικτύου ως προς τη γεωγραφική κάλυψη και τη θέση του εκάστοτε τμήματος του δικτύου σε σχέση με τους τελικούς συνδρομητές, τα τμήματα του δικτύου μπορούν να διακριθούν στα δίκτυα κορμού, στα μητροπολιτικά δίκτυα και στα δίκτυα πρόσβασης [2], [3]. Οι οπτικές μεταδόσεις πάνω από δίκτυα κορμού και από μητροπολιτικά δίκτυα είναι ήδη μία πραγματικότητα. Μία ενδεικτική σχηματική απεικόνιση του δημόσιου διαδικτύου με διάφορες εκδοχές του δικτύου πρόσβασης φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Αυτό που αναφέρθηκε ως δημόσιο διαδίκτυο περιλαμβάνει τον εξοπλισμό μεταγωγής, δρομολόγησης και μεταφοράς της κίνησης στο δίκτυο κορμού μέχρι και τα όρια σύνδεσης με το δίκτυο πρόσβασης. Κάθε τμήμα του διαδικτύου έχει διαφορετικές απαιτήσεις και υποστηρίζει διαφορετικούς ρυθμούς και όγκους κίνησης δεδομένων.



Σχήμα 1.1. Ιεραρχία του διαδικτύου και εκδοχές δικτύων πρόσβασης. O/E Optical-to-Electrical Conversion, E/O Electrical-to-Optical Conversion.

Σε συντομία, ξεκινώντας από το δίκτυο κορμού, οι κόμβοι συνδέονται μέσω πολλαπλών ινών και με εφαρμογή πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος ανά ίνα (Wavelength Division Multiplexing – WDM). Οι κόμβοι του δικτύου κορμού αποτελούνται από μεγάλους ηλεκτρικούς δρομολογητές (core routers) και ένα οπτικό σύστημα μεταγωγής (Optical Cross-Connect – OXC). Ένα OXC αποτελείται από το τμήμα της οπτικής μεταγωγής, ένα πλήθος πολυ/αποπολυπλεκτών και τις θύρες εισόδου/εξόδου στις

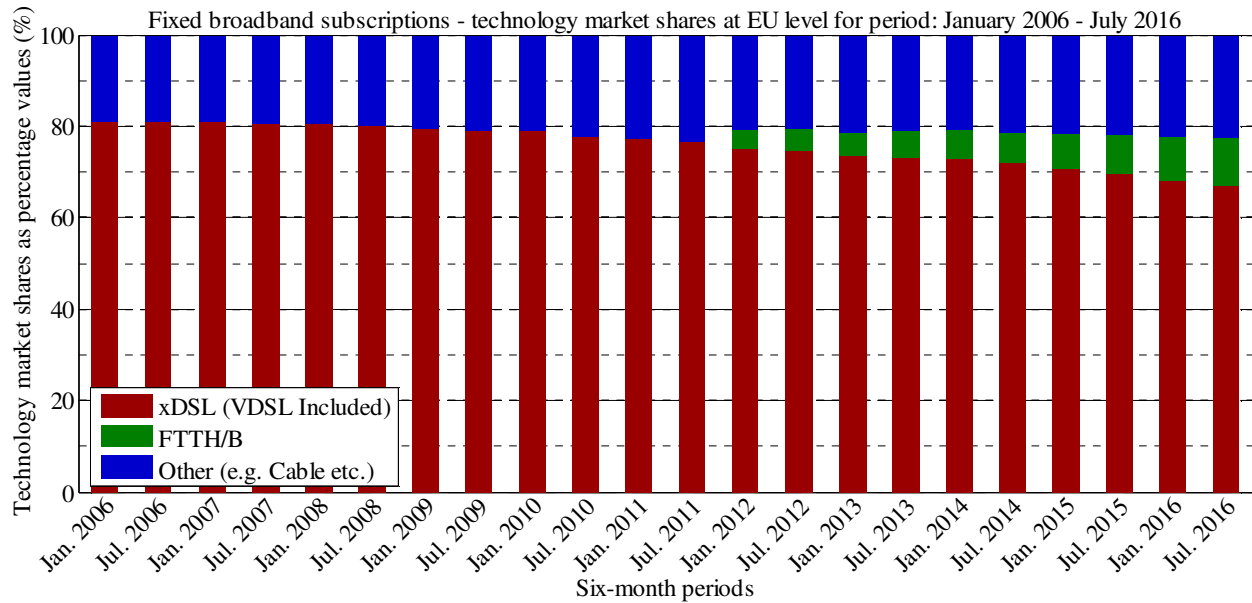
οποίες συνδέονται πομποδέκτες (I/O ports) [4]. Κατά μήκος της διάδοσης μεταξύ κόμβων στο δίκτυο κορμού, υπάρχουν και οι απαραίτητοι ενισχυτές. Εφόσον απαιτείται χρησιμοποιούνται μετατροπείς μήκους κύματος και όπου είναι αναγκαίο, χρησιμοποιώντας αναγεννητές μπορεί να επεκταθεί η απόσταση που μπορεί να καλυφθεί. Για τα δίκτυα κορμού, οι ρυθμοί ανά μήκος κύματος έχουν ξεπεράσει πια τα 100 Gbit/s σε μία προσπάθεια αύξησης της φασματικής απόδοσης και έχοντας ως στόχο την κάλυψη πολύ μεγάλων αποστάσεων. Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή 400 Gbit/s με ένα μήκος κύματος ή με ομαδοποίηση περισσότερων μηκών κύματος [5].

Το ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και του δικτύου κορμού είναι το μητροπολιτικό δίκτυο. Στα όρια από την πλευρά του δικτύου πρόσβασης βρίσκονται μονάδες μεταγωγής Ethernet (edge Ethernet switches). Οι δρομολογητές του παρόχου στα όρια με το δίκτυο κορμού (provider edge router) συνδέονται με το δίκτυο κορμού. Οι ευρυζωνικοί εξυπηρέτες απομακρυσμένης πρόσβασης (Broadband Remote Access Servers – BRASs) εκτελούν λειτουργίες ελέγχου και διαχείρισης, ενώ συνδέονται σε πολλαπλούς provider edge routers και edge switches, από τις δύο πλευρές του δικτύου, για λόγους προστασίας.

Υπάρχουν πάροχοι που εγκαθιστούν πρόσθετη δικτυακή υποδομή διανομής βίντεο σε δίκτυα πρόσβασης. Τέτοιες υποδομές είναι ιδιόκτητες και παρέχουν υπηρεσίες IP-TV και βίντεο κατ' απαίτηση (Video-on-Demand – VoD). Αυτές οι υπηρεσίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από την πλευρά της προσφερόμενης ποιότητας, ειδικά όσον αφορά τις καθυστερήσεις και τις απώλειες πακέτων σε σχέση με άλλες συμβατικές υπηρεσίες. Γι' αυτό το λόγο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1, δεσμεύεται ένα δίκτυο για την αποθήκευση και τη μεταφορά του σχετικού περιεχομένου και συνδυάζεται στις παρυφές του μητροπολιτικού δικτύου στον edge switch με την κίνηση Ίντερνετ, η οποία έχει χαρακτηριστικά βέλτιστης προσπάθειας (best-effort). Η δομή ενός δικτύου διανομής βίντεο που περιγράφηκε δεν είναι δεσμευτική, καθώς με αύξηση της υποστηριζόμενης χωρητικότητας από κόμβους του διαδικτύου μπορεί να υλοποιηθεί μία κατανεμημένη υποδομή διανομής βίντεο μέσα από το ίδιο το διαδικτυο. Σε παρόμοια λογική με το δίκτυο διανομής βίντεο, ένα κέντρο δεδομένων (Data Center – DC) είναι ένα δίκτυο που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερους δρομολογητές για τη σύνδεση με το δίκτυο κορμού, μονάδες μεταγωγής (switches) για τη συγκέντρωση και ομαδοποίηση της κίνησης, καθώς και τους εξυπηρέτες για τη σχετική υπηρεσία που παρέχεται [3]. Από ένα κέντρο δεδομένων παρέχονται υπηρεσίες βασισμένες στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα επεξεργασία κειμένου, παρουσιάσεων και λογιστικών φύλλων (network-based computing), αλλά και υπηρεσίες αποθήκευσης δεδομένων (network-based storage). Αυτές οι υπηρεσίες δομούν το γενικό μοντέλο του “cloud computing”. Εκτός από τη συγκέντρωση των υποδομών για το cloud computing μέσα σε μεγάλα κέντρα δεδομένων, υπάρχει η δυνατότητα να χτιστεί ένα κέντρο δεδομένων κατανεμημένο σε μία μεγάλη γεωγραφική περιοχή, όπου διατάξεις τελικών χρηστών μπορούν να συμμετέχουν στη αποθήκευση και διανομή δεδομένων, κάνοντας πιο αφηρημένη την έννοια του «σύννεφου» [6]. Λόγω της εκτεταμένης ανάπτυξης κέντρων δεδομένων σε μητροπολιτικό επίπεδο, η κίνηση σε μητροπολιτικά δίκτυα έχει αυξηθεί σημαντικά [1].

Ως αυτό το σημείο του δικτύου που περιγράφηκε ως τώρα, μπορεί να εγκατασταθεί και να αξιοποιηθεί αποκλειστικά η χρήση οπτικών ινών είτε μονότροπων στο δίκτυο κορμού και σε μητροπολιτικό επίπεδο είτε πολύτροπων ή μονότροπων ινών σε μεγάλα κέντρα δεδομένων. Το δίκτυο πρόσβασης συνδέεται με κάποια διάταξη μεταγωγής (edge switch). Η παρούσα τεχνολογία δικτύου πρόσβασης που επικρατεί αυτή τη στιγμή είναι η ψηφιακή γραμμή συνδρομητή (x-Digital Subscriber Line – xDSL) στις διάφορες εκδοχές της, όπως η ασύγχρονη (Asynchronous) και η πολύ υψηλού ρυθμού (Very-high-bit-rate) DSL, ADSL και VDSL, αντίστοιχα. Όντας λύση που αξιοποιεί το χάλκινα καλώδια, θα αρχίσει να υποχωρεί η χρήση αυτής της τεχνολογίας, ενώ οι οπτικές

τεχνολογίες (Fiber-To-The-X point – FTTX) θα αρχίσουν να κερδίζουν έδαφος. Αυτό μπορεί να φανεί και από στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2 [7]. Πιο συγκεκριμένα, το μερίδιο των τεχνολογιών FTTH και FTTB στο σύνολο των σταθερών ευρυζωνικών συνδέσεων σε περίοδο δεκαετίας κερδίζει σταθερά έδαφος μετά το 2012, φθάνοντας το 10.7% το 2016, σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες, ενώ η τεχνολογία xDSL χάνει μερίδιο αγοράς φθάνοντας το 66.8% για το ίδιο έτος.



Σχήμα 1.2. Ποσοστιαίο μερίδιο αγοράς των τεχνολογιών δικτύων πρόσβασης για σταθερές ευρυζωνικές συνδέσεις στην Ευρωπαϊκή Ένωση σε εξαμηνιαία εξέλιξη έντεκα ετών [7].

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs) είναι μία τεχνολογία με την οποία είναι δυνατό να φθάσει η ίνα ακριβώς στο σπίτι. Στα PONs, μία ομάδα οπτικών μονάδων δικτύου (Optical Network Units – ONUs) ελέγχονται από ένα τερματικό οπτικής γραμμής (Optical Line Terminal – OLT) και μοιράζονται μία ίνα σε ένα μεγάλο τμήμα του δικτύου. Καθεμία ONU μπορεί να εξυπηρετεί είτε απευθείας κάποιο σπίτι ή κάποιο πλήθος σπιτιών, δημιουργώντας μία υβριδική δομή όπου συνυπάρχει με την τεχνολογία VDSL. Άλλη οπτική λύση είναι η χρήση μίας αποκλειστικής ίνας ανά σπίτι υλοποιώντας ζεύξεις σημείου-προς-σημείο (Point-to-Point). Και αυτή η λύση μπορεί να συνδυαστεί με την τεχνολογία VDSL όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.

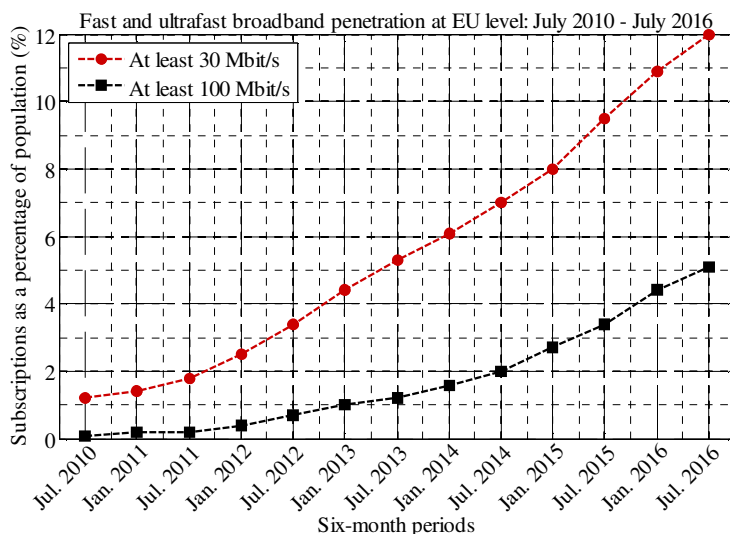
Στο τμήμα της πρόσβασης, με αποστάσεις κάλυψης της τάξης των 20 km, εκτός από την εγκατάσταση της ίνας ως το σπίτι, την επιχείρηση και γενικότερα το κτίριο ή σε οποιοδήποτε σημείο προβλέπεται από την τεχνολογία πρόσβασης με οπτική ίνα (FTTX), υπάρχει και η ανάγκη υποστήριξης πρόσθετων υπηρεσιών, όπως οι τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης επόμενης γενιάς. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, η οπτική ίνα θα αποτελέσει το μέσο για τη σύνδεση κάποιου «κεντρικού» σημείου από το οποίο θα διαμοιράζεται η κίνηση προς τους εξελιγμένους σταθμούς βάσης (mobile front-haul). Επιπλέον, απαραίτητη γίνεται η οπτική σύνδεση των κεντρικών σημείων με τα δίκτυα κορμού (mobile back-haul). Μία ενδεικτική εικόνα δίνεται και πάλι στο Σχήμα 1.1. Οι μεγάλες απαιτήσεις σε κίνηση και σε ρυθμούς δεδομένων δημιουργούν την ανάγκη της βελτίωσης και επαύξησης των δυνατοτήτων των δικτύων πρόσβασης γεγονός που επιβεβαιώνεται από την επέκταση των προδιαγραφών τεχνολογιών δικτύων πρόσβασης, όπως τα PONs, προς υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών [1].

Μένοντας στην απλή ιεραρχική απεικόνιση της δομής του διαδικτύου, στο κομμάτι της πρόσβασης η τελική μονάδα στην οποία μπορεί να καταλήγει μία οπτική ίνα είναι ένας μικρός κόμβος ο οποίος θα «αναλάβει» το διαμοιρασμό και τη συλλογή της κίνησης

προς και από τις φυσικές οντότητες-χρήστες που είναι οι παραλήπτες ή αποστολείς δεδομένων. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι κόμβοι του δικτύου πρόσβασης έχουν αποκτήσει ετερογενή μορφή, ένας κόμβος μπορεί να είναι οποιαδήποτε μονάδα μπορεί να διαμοιράσει με οποιοδήποτε τρόπο δεδομένα. Για παράδειγμα, θεωρώντας την περίπτωση εγκατάστασης PON ως δικτύου πρόσβασης, η τελική ONU μπορεί να είναι μία πύλη (gateway) σε ένα σπίτι ή μία επιχείρηση, ένας διανεμητής σε μία γειτονιά ή σε κάποιο κτιριακό συγκρότημα ή ακόμα κάποιος σταθμός βάσης ασύρματου δικτύου επόμενης γενιάς.

Η αύξηση των ρυθμών θα απαιτούσε μία πυκνή υλοποίηση οπτικών δικτύων πρόσβασης. Μένοντας στη λογική των PONs, αυτό θα σήμαινε ότι θα υπήρχε πυκνή εγκατάσταση από ONUs στο τελείωμα του δικτύου πρόσβασης. Οι ONUs θα συνδέσουν τελικούς χρήστες με το υπόλοιπο δίκτυο. Αλλά οι μονάδες των χρηστών που εξυπηρετούνται από μία ONU, κινητές ή ακίνητες, θα πρέπει να λειτουργούν υπό μία μορφή δικτύου. Σε διαφορετική υλοποίηση δικτύου πρόσβασης, όπου κάποιος σταθμός βάσης μεταδίδει μεγάλο όγκο δεδομένων παρέχοντας υπηρεσία επόμενης γενιάς (5G) προς κάποια συμβατή κεντρική πύλη κάποιου σπιτιού ή γραφείου ή επιχείρησης, τότε και πάλι θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα εσωτερικό δίκτυο για το διαμοιρασμό των πόρων. Επομένως, είναι αναμενόμενη η δημιουργία δικτύων σε εσωτερικούς χώρους ή εντός σπιτιού με αυξανόμενες απαιτήσεις σε υποστήριξη ρυθμών.

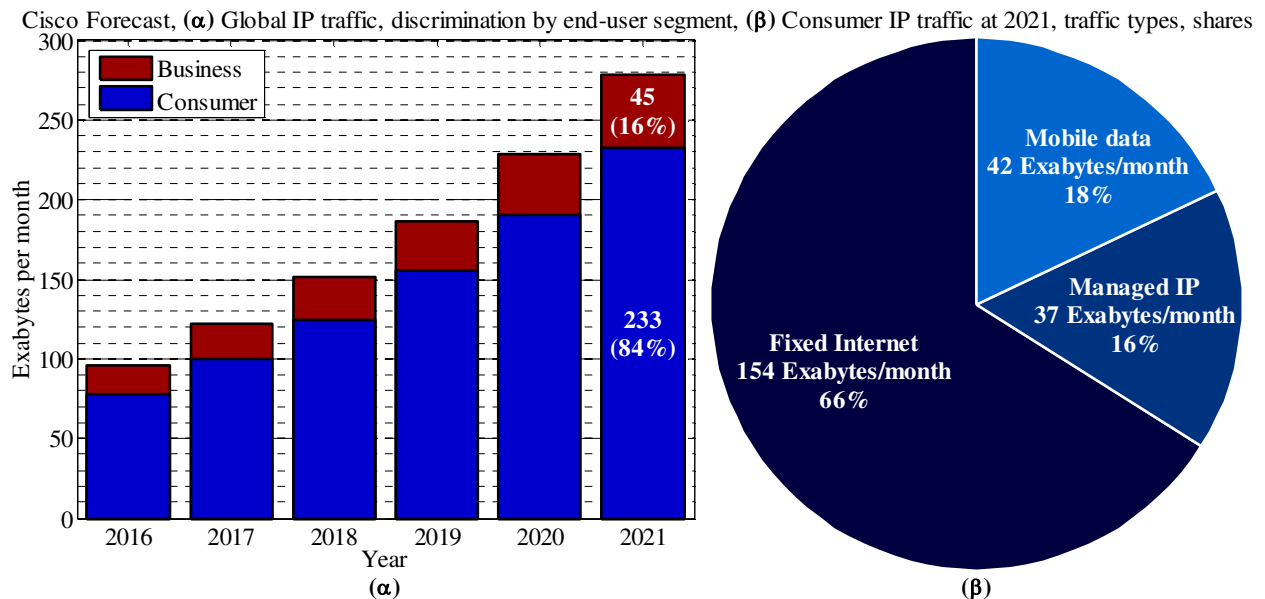
Η αύξηση των ρυθμών στο τμήμα της πρόσβασης αρχίζει να γίνεται ήδη έκδηλη. Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σε μία εφταετία, η διείσδυση των ευρυζωνικών συνδέσεων ταχύτητας τουλάχιστον 30 Mbit/s σαν ποσοστό του πληθυσμού από το 1.2% το 2010, φθάνει το 12.0% το 2016. Απομονώνοντας υψηλότερες ταχύτητες πάνω από 100 Mbit/s, η διείσδυση αυτών των ταχυτήτων αγγίζει το 5.1% το 2016 σε σχέση με το 0.1% το 2010. Η χρονική εξέλιξη φαίνεται στο Σχήμα 1.3 [7].



Σχήμα 1.3. Διείσδυση ευρυζωνικών συνδέσεων ταχυτήτων τουλάχιστον 30 Mbit/s και τουλάχιστον 100 Mbit/s στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σαν ποσοστό του πληθυσμού για το διάστημα από τον Ιούλιο του 2010 μέχρι και τον Ιούλιο του 2016 [7].

Είναι αναμενόμενο ότι οι ρυθμοί στο τμήμα της πρόσβασης θα αυξάνονται καθώς οι εφαρμογές θα γίνονται πιο απαιτητικές και η ποσότητα των δεδομένων θα αυξάνεται. Είναι ενδεικτικό ότι η παγκόσμια IP (Internet Protocol) κίνηση κατά το έτος 2021 προβλέπεται από τη Cisco ότι θα φθάσει τα 278 Exabyte ανά μήνα [8], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4(α). Από αυτή την ποσότητα, σχεδόν 84% θα αφορά την καταναλωτική και το υπόλοιπο 16% την κίνηση από επιχειρήσεις. Ως κίνηση από καταναλωτές θεωρείται η κίνηση που γεννάται από τα νοικοκυριά, τα Πανεπιστήμια κα. Από το 84% της κίνησης των καταναλωτών, που θα είναι 233 Exabyte ανά μήνα, το 16% (37

Exabyte ανά μήνα) αφορά τη μεταφορά σε επίπεδο IP τηλεόρασης και Video-on-Demand (VoD) καθώς και τη μεταφορά IP Wide Area Network (WAN) κίνησης, που μαζί αναφέρονται ως managed IP^{*}, και το συντριπτικό 84% θα αφορά κίνηση διαδικτύου[†] (154 Exabytes ανά μήνα) και μετάδοση δεδομένων, καθώς και κίνηση διαδικτύου από κινούμενους χρήστες[‡] (42 Exabytes ανά μήνα) (Σχήμα 1.4(β)). Από αυτά τα 196 Exabytes, οι υποκατηγορίες web, email και μετάδοσης δεδομένων[§] θα παρουσιάσουν μία τυπική άνοδο της τάξης του 17% ανά έτος μέσα στην περίοδο 2016–2021, ενώ η κίνηση από βίντεο θα αυξηθεί μεσοσταθμικά κατά 31%. Η υποκατηγορία κίνησης με μηδενική αλλαγή θα είναι η κίνηση από διαμοιρασμό αρχείων (πχ από κίνηση μεταξύ ομότιμων – peer-to-peer (p2p)). Αντίθετα, η υποκατηγορία online gaming αναμένεται να παρουσιάσει τη μεγαλύτερη άνοδο κατά 62% ανά έτος κατά μέσο όρο, ώστε από τα 915 Petabytes ανά μήνα 2016, να φθάσει σε κάτι λιγότερο από 6.6 Exabytes κίνηση ανά μήνα το 2021 [8].



Σχήμα 1.4. Προβλέψεις της Cisco για (α) την παγκόσμια IP κίνηση με διάκριση βάσει του τομέα στον οποίο γεννάται η κίνηση ή απαιτείται η μεταφορά κίνησης σε Exabytes ανά μήνα, (β) την IP κίνηση καταναλωτών με κατανομή αυτής ανά τύπο κίνησης για το 2021.

Αυτά τα μεγέθη δείχνουν ότι το τμήμα της πρόσβασης, αλλά και το τμήμα των συνδέσεων μέσα στο σπίτι ή γενικότερα σε ένα εσωτερικό χώρο όπου θα γεννηθεί ή/και θα διαμοιραστεί η κίνηση είναι εξίσου κρίσιμα για την υποστήριξη των ρυθμών που θα απαιτηθούν στο άμεσο μέλλον. Η υποστήριξη των υπηρεσιών που αναφέρθηκαν μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μέσα μετάδοσης που μπορούν να υποστηρίξουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Λύσεις που έχουν ήδη υιοθετηθεί και χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή περιλαμβάνουν ασύρματες και ενσύρματες επιλογές. Μένοντας στις ενσύρματες επιλογές, καθώς οι ασύρματες θα αναφερθούν σε συντομία πιο κάτω, οι διαδεδομένες επιλογές είναι το ομοαξονικό καλώδιο, οι γραμμές χάλκινων συνεστραμμένων ζευγών και τα αθωράκιστα

* Η κίνηση Managed IP βίντεο είναι IP κίνηση που γεννάται από εμπορικές τηλεοπτικές υπηρεσίες οι οποίες όμως παραμένουν εντός του δικτύου του παρόχου της υπηρεσίας και δε θεωρείται κίνηση Ιντερνέτ.

† Η κίνηση Ιντερνέτ αφορά IP κίνηση που περνά στο δίκτυο κορμού του διαδικτύου και αναφέρεται ως fixed Internet.

‡ Η κίνηση από κινούμενους χρήστες (δεδομένα και κίνηση διαδικτύου) προέρχεται από κινητές μονάδες (smartphones, tablets κα), ευρυζωνικές πύλες (gateways) και περνά αρχικά μέσα από το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και πιο συγκεκριμένα από το τμήμα της ασύρματης πρόσβασης. Αναφέρεται ως mobile data and Internet traffic.

§ Στη μετάδοση δεδομένων δεν περιλαμβάνεται ο διαμοιρασμός αρχείων.

συνεστραμμένα ζεύγη (Unshielded Twisted Pair – UTP) με διάφορες εκδοχές ανάλογα με την ταχύτητα που μπορούν να υποστηρίξουν και την απόσταση που θα καλύψουν (πχ Cat5e για την υποστήριξη μέχρι 1 Gigabit Ethernet για απόσταση 100 μέτρων, Cat6 και Cat6A για την υποστήριξη μέχρι 10 Gigabit Ethernet μέχρι 55 και 100 μέτρα, αντίστοιχα). Δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων προσφέρεται και από το δίκτυο του ηλεκτρικού ρεύματος με την τεχνολογία επικοινωνίας μέσω της γραμμής ισχύος (power line communication). Άλλο εναλλακτικό μέσο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τέτοιες αποστάσεις είναι η οπτική ίνα. Σε ένα οικιακό δίκτυο όπου θα χρησιμοποιείται οπτική ίνα, δεν είναι επιθυμητό να είναι δυνατή η εγκατάσταση ενός δικτύου μόνο από κάποιο ειδικό τεχνικό με πολύ ειδικά και ακριβά εργαλεία. Αντιθέτως, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η εύκολη εγκατάσταση ενός δικτύου χωρίς πολλές γνώσεις και με εύκολη διόρθωση σφαλμάτων ή/και αντικατάσταση καταστραμμένου υλικού με φθηνά εργαλεία από οποιοδήποτε χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι και η οπτική ίνα πρέπει να αντέχει σε καταπονήσεις και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί-εγκατασταθεί στο δίκτυο με ευκολία.

Εκτός από τις συμβατικές μονότροπες και πολύτροπες οπτικές ίνες από διοξειδίο του πυριτίου (silica) έχουν κατασκευαστεί και ίνες από πολυμερή υλικά. Ένα από αυτά είναι και το **polymethyl methacrylate**, γνωστό με τα αρχικά **PMMA**. Οι πλαστικές ίνες από PMMA με βηματικό προφίλ δείκτη διάθλασης (Step Index – SI) στον πυρήνα έχουν μεγάλες διαστάσεις με τη διάμετρο να φθάνει τα 980 μm και τη συνολική διάμετρο της ίνας μαζί με το μανδύα να φθάνει τα 1000 μm. Το δε αριθμητικό άνοιγμα είναι ίσο με 0.5. Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες και πλαστικές οπτικές ίνες με αριθμητικό άνοιγμα μικρότερο από 0.5, αλλά θα επικεντρωθούμε στις πρώτες. Τα μήκη κύματος που υποστηρίζονται με σχετικά χαμηλές απώλειες βρίσκονται στο ορατό φάσμα, γεγονός που διευκολύνει την υιοθέτηση σε μικρά δίκτυα ως φθηνή υλοποίηση λόγω της χαμηλής τιμής πομπών και δεκτών σ' αυτή την φασματική περιοχή, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις πηγές στο κόκκινο χρώμα. Επιπροσθέτως, οι ίδιες οι ίνες έχουν προσιτό κόστος, αλλά και οι απαιτούμενοι συνδετήρες έχουν πολύ χαμηλό κόστος. Το μειωμένο κόστος πομπών, δεκτών και καλωδίου δικαιολογεί την εγκατάσταση σε δίκτυα εσωτερικών χώρων που καλύπτουν μικρή απόσταση, πχ μικρά εταιρικά δίκτυα ή ενδο-οικιακά δίκτυα. Όσον αφορά τη δυνατότητα χειρισμού τους, αυτός είναι ευκολότερος λόγω των μεγάλων διατάσεων του πυρήνα τους, κάτι που είναι επιζητούμενο σε μικρά ή/και ενδο-οικιακά δίκτυα. Η ευκολία έχει να κάνει με το γεγονός ότι αν ένας άπειρος χρήστης συνδέσει δύο ίνες χωρίς να έχει επιτευχθεί άριστη ευθυγράμμιση των ινών, το μόνο που θα προκύψει είναι μία μικρή αύξηση των απωλειών. Ταυτόχρονα, υπάρχει η ευελιξία στη διαχείριση του χώρου ειδικά σε σχέση με τα πιο ογκώδη χάλκινα καλώδια. Άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό υπέρ της εγκατάστασης πλαστικών οπτικών ινών σε μικρά δίκτυα είναι η αντοχή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κατά τη διάδοση των σημάτων, πλεονέκτημα των οπτικών συνδέσεων γενικότερα.

Παρά το γεγονός ότι αποτελούν μία δελεαστική πρόταση για τη δικτύωση σημείου-προς-σημείο μέσα σε εσωτερικούς χώρους για την κάλυψη αποστάσεων περιορισμένων σε δεκάδες μέτρα, οι πλαστικές PMMA οπτικές ίνες μεγάλου πυρήνα έχουν υψηλές απώλειες, αλλά και χαμηλό εύρος ζώνης με την αύξηση της απόστασης. Ωστόσο, έχουν γίνει ερευνητικές προσπάθειες για την αντιστάθμιση των φαινομένων που επιδρούν αρνητικά στο εύρος ζώνης της ίνας. Ο στόχος είναι η κάλυψη αποστάσεων μεταξύ 50 και 100 μέτρων με ρυθμό τουλάχιστον 1 Gbit/s. Οι διάφορες τεχνικές που έχουν εξετασθεί αφορούν την εφαρμογή είτε κάποιου παλμικού σχήματος διαμόρφωσης σε συνδυασμό με κατάλληλο σχήμα εξίσωσης κατά τη λήψη είτε την εφαρμογή αποδοτικότερων σχημάτων διαμόρφωσης είτε την εφαρμογή πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος είτε τη χωρική πολυπλεξία δεσμών είτε το χωρικό φιλτράρισμα τρόπων υψηλής τάξης στην έξοδο της ίνας είτε ακόμα και την αλλαγή του μέσου διάδοσης με άλλο που υποστηρίζει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, όπως οι πλαστικές

οπτικές ίνες με βαθμιαίο προφίλ του δείκτη διάθλασης ή οι πλαστικές ίνες με πολλαπλούς πυρήνες. Προφανώς, η τελευταία λύση θα προκαλέσει και αύξηση του κόστους.

Δεδομένων των περιορισμών της πλαστικής ίνας μεγάλης διαμέτρου, αντί να γίνει επέμβαση στα άκρα μία ζεύξης εφαρμόζοντας βελτιωμένα σχήματα διαμόρφωσης και εξίσωσης καναλιού, εξετάστηκε η δυνατότητα βελτίωσης των χαρακτηριστικών του ίδιου του μέσου μελετώντας θεωρητικά και πειραματικά απλές ζεύξεις σημείου προς σημείο, χωρίς να αντικατασταθεί το καλώδιο από άλλη ίνα. Σαφέστερα, δομήθηκαν απλές ζεύξεις σημείου-προς-σημείο και διερευνήθηκε, αν συγκεκριμένα μοτίβα αλλαγών της θερμοκρασίας μπορούν να επηρεάσουν τον υποστηριζόμενο ρυθμό από το ίδιο το μέσο.

1.2 Ασύρματες διάχυτες οπτικές μεταδόσεις σε εξωτερικούς χώρους – δυνατότητα χρήσης της «ηλιακά τυφλής» μπάντας υπεριώδους ακτινοβολίας

Σχετικά με την ασύρματη κάλυψη μικρών αποστάσεων, η τεχνολογία του ασύρματου τοπικού δικτύου IEEE 802.11 στις διάφορες εκδοχές του (b/g/n/ac κ.α) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη λόγω του μηδενικού κόστους του φάσματος. Άλλη επιλογή για ασύρματες συνδέσεις και κάλυψη μικρών αποστάσεων και μέσα στο σπίτι είναι οι τεχνολογίες τηλεφωνίας και μετάδοσης δεδομένων μέσω του κυψελωτού δικτύου. Παρά το γεγονός ότι το κόστος του φάσματος περνά στον καταναλωτή μέσω συμβολαίου, και αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα δημοφιλής. Οι περιορισμοί που θα αρχίσουν να γίνονται εμφανείς με την ακόμα μεγαλύτερη διακίνηση δεδομένων [8], είναι η συμφόρηση που θα προκληθεί και οι αναπόφευκτες παρεμβολές. Η τάση που φαίνεται να επικρατεί είναι η μετάβαση σε πικο-κυψέλες (pico-cells) και φεμτο-κυψέλες (femto-cells) με κάλυψη μικρών χώρων μέσα στο σπίτι, μειώνοντας τις παρεμβολές και την συμφόρηση για τη διαμοίραση των πόρων του ασύρματου δικτύου, αλλά αυξάνοντας το πλήθος των κεραιών που απαιτούνται. Ωστόσο, μία τέτοια πυκνή ασύρματη κάλυψη μπορεί να ικανοποιήσει και την ανάγκη για πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα λόγω της έξαρσης μίας δομής δικτύου Internet-of-Things που θα απαιτεί τη σύνδεση μεταξύ ανθρώπων ή συσκευών ακόμα και μέσα σε ένα δωμάτιο. Σε μία «συμβατική» υλοποίηση, για ένα σύστημα πολλών μικρών κυψελών μέσα στο σπίτι θα απαιτούνταν σημαντικό πλήθος ενεργών τμημάτων που θα κατανάλωναν σημαντικές ποσότητες ισχύος. Μία λύση είναι η συγκέντρωση λειτουργιών διαχείρισης και δρομολόγησης της κίνησης σε κεντρικό σημείο του σπιτιού, όπως η πύλη που αναφέρθηκε νωρίτερα. Αυτή η λύση ταιριάζει με την τεχνική Radio-Over-Fiber (ROF), με την οποία μπορεί να επιτευχθεί η μείωση της κατανάλωσης των διατάξεων και η μείωση των απαιτούμενων επιπέδων ισχύος εκπομπής λόγω των μικρών αποστάσεων που καλύπτουν οι κυψέλες [9], αλλά αυξάνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος. Εκτός από τη μικροκυματική μετάδοση, οι οπτικές τεχνολογίες μπορούν να αξιοποιηθούν και για ασύρματες μεταδόσεις σε εσωτερικούς χώρους. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία επικοινωνιών ορατού φωτός (Visible Light Communications – VLC), φαίνεται να κερδίζει σταδιακά έδαφος. Η βασική λογική είναι η χρήση του φωτός για τη μετάδοση δεδομένων εκτός από το φωτισμό. Με αυτή την τεχνολογία αντιμετωπίζονται οι περιορισμοί της τεχνολογίας των ραδιοκυμάτων, όπως η συμφόρηση στο φάσμα και οι αυξημένες παρεμβολές. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η ασφάλεια λόγω της αποκλειστικής κάλυψης μόνο εντός χώρων που καλύπτονται από τοίχους, η δυνατότητα πυκνής επαναχρησιμοποίησης, η ασφάλεια για τον ανθρώπινο οργανισμό, η δυνατότητα συνύπαρξης με την υπάρχουσα υποδομή, το προσιτό κόστος. Οι πηγές που χρησιμοποιούνται είναι οι Φωτοεκπέμπουσες Δίοδοι (Light Emitting Diodes – LEDs). Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι LED [10]. Συχνά χρησιμοποιούμενες για φωτισμό είναι οι μπλε LEDs με επίστρωση φωσφόρου για την παραγωγή λευκού φωτός, με περιορισμένο εύρος ζώνης. Αν αυτές οι LED συνδυαστούν με μπλε φίλτρο στην πλευρά του δέκτη, είναι δυνατό να

στηθούν ασύρματες ζεύξεις με ικανοποιητικούς ρυθμούς μετάδοσης. Άλλη λύση είναι η παραγωγή λευκού φωτός από τρία LED χιρ κόκκινου, πράσινου και μπλε χρώματος. Οι οργανικές LEDs έχουν βρει εφαρμογή σε πάνελ οθονών, αλλά έχουν αρκετά χαμηλό εύρος ζώνης. Οι Micro LEDs (μLEDs) επιτρέπουν την μετάδοση σημαντικά υψηλότερων ρυθμών σε σχέση με τους άλλους τύπους LED. Έχουν εύρος εκατοντάδων MHz και διάμετρο δεκάδων μικρο-μέτρων (ανάλογα με την περίπτωση), με δυνατότητα να ενσωματωθούν σε πάνελ οθονών. Οι πηγές LED είναι ενεργειακά αποδοτικές πηγές, κάνοντας την VLC μία πράσινη τεχνολογία. Οι τύποι των φωτοφωρατών που χρησιμοποιούνται στο δέκτη είναι οι φωτοδιόδοι pin (p-type – intrinsic – n-type semiconductors) και χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode – APD). Ο τύπος pin είναι ο επικρατέστερος λόγω κόστους και επειδή το καθεστώς άμεσης επαφής πομπού-δέκτη στο οποίο βασίζεται η τεχνολογία VLC επιτρέπει να φθάσει αρκετή ισχύς στη φωτοδίοδο. Επιπλέον, υπάρχουν και οι αισθητήρες απεικόνισης (imaging sensor). Αυτοί οι αισθητήρες είναι μία διάταξη (μήτρα) φωτοδίοδων σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Αυτή τη στιγμή μπορούν να υποστηρίξουν VLC σε χαμηλούς ρυθμούς και θεωρούνται είτε σχηματισμοί (configuration) δέκτη [10] είτε τύποι δέκτη εναλλακτικοί των μεμονωμένων φωτοφωρατών [11]. Γι' αυτό και αυτή τη στιγμή, οι φωτοδιόδοι είναι οι επικρατέστεροι τύποι δεκτών για την υποστήριξη όσο το δυνατό υψηλότερου ρυθμού. Παρά το γεγονός ότι το μέγιστος ρυθμός που προβλέπεται από το πρότυπο 802.15.7 για VLC είναι 96 Mbit/s [11], [12], οι συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες έχουν δώσει ρυθμούς εκατοντάδων Mbit/s και σε κάποιες περιπτώσεις έχει ξεπεραστεί το 1 Gbit/s [10], [12]. Σκοπός είναι η δημιουργία προτύπου που θα προβλέπει την υποστήριξη ρυθμών μεγαλύτερων από 1 Gbit/s με εφαρμογή φασματικά αποδοτικών σχημάτων διαμόρφωσης [12]. Ταυτόχρονα, η δυναμική της ανάπτυξης της αγοράς των LEDs αφήνει ελπίδες μείωσης του κόστους, γεγονός που θα ωθήσει και την υιοθέτηση της τεχνολογίας VLC. Ωστόσο, βασικό πρόβλημα των επικοινωνιών με ορατό φως είναι ο θόρυβος περιβάλλοντος που προέρχεται από τον ήλιο και από άλλες τεχνητές πηγές ορατού φωτός, πχ λάμπες, κάνοντας πολύ δύσκολη την επικοινωνία χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Υπό συνθήκες αυτές οι συνιστώσες θορύβου μπορούν να προκαλέσουν σημαντικούς περιορισμούς ακόμα και σε ζεύξη με οπτική επαφή πομπού και δέκτη. Επιπροσθέτως, σε ζεύξεις δύο σημείων, η μορφή ευρυεκπομπής (broadcast) της τεχνολογίας VLC σε κάποιο εσωτερικό χώρο όταν συνδυάζεται με το φωτισμό κάνει δύσκολη την ανοδική κίνηση (uplink) [10], ειδικά όταν δεν είναι δυνατή η υποστήριξη πηγής στο ένα άκρο της ζεύξης για την άμεση υποστήριξη του uplink, λόγω περιορισμού όγκου ή ισχύος. Ακόμα κι αν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ξεχωριστής LED για την ανοδική κίνηση, πρέπει να υπάρχει ικανοποιητική ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη ώστε να μη μειωθεί η ρυθμαπόδοση (throughput).

Σχετικά με την κάλυψη μικρών αποστάσεων με ασύρματη μετάδοση, η παρούσα μελέτη προσανατολίζεται σε εξωτερικούς χώρους. Όσον αφορά την κατάσταση στο πεδίο των οπτικών ασύρματων μεταδόσεων σε εξωτερικούς χώρους, αυτή τη στιγμή εφαρμόζονται κυρίως ζεύξεις με οπτική επαφή (Line-of-Sight – LOS). Τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται βρίσκονται στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου από τα 800 nm περίπου μέχρι τα 1550 nm [12], [13]. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο περιοχές στο κοντινό υπέρυθρο που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι μεταξύ 780 και 910 nm και η περιοχή των 1550 nm. Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται εμπορικά διαθέσιμες πηγές και εμπορικά διαθέσιμοι δέκτες ώριμης τεχνολογίας. Για την πρώτη περιοχή υπάρχουν φθινοί πομποδέκτες, ενώ στη δεύτερη περιοχή το κόστος υλοποίησης μίας ζεύξης είναι μεγαλύτερο. Τα επίπεδα ισχύος στην έξοδο των πηγών είναι της τάξης των 100 mW [13]. Οι τύποι των φωτοφωρατών που χρησιμοποιούνται για τη λήψη της πληροφορίας είναι οι φωτοδιόδοι pin και χιονοστιβάδας με απόκριση στη σχετική μπάντα μηκών κύματος στην οποία πραγματοποιείται η επικοινωνία.

Παρά την δυνατότητα μετάδοσης με υψηλούς ρυθμούς με τις συμβατικές τεχνολογίες οπτικής ασύρματης μετάδοσης με οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, ο στόχος ήταν η κάλυψη μικρών αποστάσεων με χαμηλούς ρυθμούς. Η πρόσθετη διαφοροποίηση επήλθε με την εφαρμογή διάχυτων μεταδόσεων. Υπό ένα τέτοιο καθεστώς, θα προέκυπτε σημαντική επίδραση από το θόρυβο περιβάλλοντος είτε αυτός προέρχεται από ανθρώπινη δραστηριότητα είτε προέρχεται από τον ήλιο. Αυτό, όμως, κάνει δύσκολη τη χρήση των συμβατικών οπτικών ασύρματων τεχνολογιών για εξωτερικό περιβάλλον. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς από τον ήλιο αφικνείται ακτινοβολία που βρίσκεται στο ορατό φάσμα και σε τμήματα του υπέρυθρου φάσματος. Επομένως, για την υποστήριξη διάχυτων μεταδόσεων απαιτείται μία μπάντα μηκών κύματος εντός της οποίας ο θόρυβος περιβάλλοντος να είναι μειωμένος.

Τα μήκη κύματος που θεωρήθηκαν στην παρούσα εργασία για τις μεταδόσεις που μελετήθηκαν θεωρητικά και εξετάστηκαν πειραματικά βρίσκονται στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για την ηλιακά τυφλή C-μπάντα της υπεριώδους ακτινοβολίας (Solar-Blind Ultraviolet C band – SB-UV-C band) που βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 200 nm και 280 nm [14]. Το χαρακτηριστικό πλεονέκτημα αυτής της περιοχής είναι ο σχεδόν μηδενικός θόρυβος περιβάλλοντος (από τον ήλιο) σε σχέση με τις άλλες περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, τα μικρά μήκη κύματος επιτρέπουν την εντονότερη σκέδαση της ακτινοβολίας. Επομένως, η διάχυτη μετάδοση γίνεται εφικτή με την ισχυρή σκέδαση και με το μειωμένο θόρυβο από το περιβάλλον. Αν τα προηγούμενα δύο χαρακτηριστικά συνδυαστούν με τα πλεονεκτήματα των οπτικών επικοινωνιών, όπως η ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και η αξιοποίηση μη κορεσμένου φάσματος, τότε μπορεί να δομηθεί ένα πλήρες σύστημα διάχυτων μεταδόσεων στην UV-C μπάντα. Οι ρυθμοί που θα μπορούν να υποστηριχθούν θα είναι μικροί λόγω των μεγάλων απωλειών από τη διάχυτη μετάδοση, αλλά θα υποστηρίζονται και δύο ακόμα χαρακτηριστικά που είναι η απόκρυψη από υποκλοπή και η αντοχή στην παρεμβολή απόσταση. Δεδομένου ότι οι απώλειες είναι αυξημένες, θα είναι πολύ δύσκολο να υποκλαπεί η πληροφορία από απόσταση και ο κακόβουλος χρήστης πρέπει να έλθει εντός της εμβέλειας του ασύρματου δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι ο κακόβουλος χρήστης θα γίνει άμεσα αντιληπτός. Όμοια, η δημιουργία παρεμβολής από μεγάλη απόσταση πρέπει να γίνει με πολύ μεγάλη ισχύ γεγονός που μπορεί να είναι ασύμφορο, ενώ ο χρήστης που θα θέλει να προκαλέσει παρεμβολές πρέπει να γνωρίζει ακριβώς προς τα πού να στοχεύσει. Σε ένα καθεστώς διάχυτων μεταδόσεων όπου πομπός και δέκτης δεν έχουν οπτική επαφή, στόχευση ακριβώς στο δέκτη με σκοπό να τον «τυφλώσει» με μεγάλη πυκνότητα ακτινοβολίας μπορεί να μην έχει σημαντική επίδραση αν ο δέκτης έχει σχεδιαστεί προσεκτικά, καθώς η άμεση στόχευση και μετάδοση σήματος παρεμβολής προς ένα δέκτη που έχει μία γωνία ανύψωσης αρκετών μοιρών δε θα προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση, πολλώ δε μάλλον όταν η παρεμβολή γίνει από απόσταση που σημαίνει μεγάλη επίδραση των απωλειών για το σήμα παρεμβολής μέχρι να φθάσει στο δέκτη. Από την άλλη, παρεμβολή από κοντινή απόσταση θα γίνει αντιληπτή. Τέτοια χαρακτηριστικά έχουν υψηλή βαρύτητα σε στρατιωτικές εφαρμογές [14]. Δεν είναι τυχαίο ότι πολλές πρώιμες πειραματικές εργασίες με μεταδόσεις σε αυτή την περιοχή του υπεριώδους φάσματος ξεκίνησαν από τμήματα του στρατού όπου χρησιμοποιήθηκαν με ογκώδεις μονάδες ειδικά στο τμήμα της εκπομπής [15]. Επιπλέον, η βελτίωση των οπτικών πηγών και η προσπάθεια βελτίωσης μονάδων φώρασης στην πλευρά της λήψης που προέκυψαν την τελευταία δεκαετία χρηματοδοτήθηκαν από την υπηρεσία Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) [15].

Συνολικά, θέτοντας ως απαίτηση τη δόμηση ζεύξεων με διάχυτες μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή πομπού και δέκτη καλύπτοντας μικρές αποστάσεις με αυξημένη

προστασία ενάντια σε παρεμβολές και υποκλοπή, το τμήμα της UV-C μπάντας μεταξύ 200 και 280 nm δίνει τη δυνατότητα να χτισθούν λειτουργικές ζεύξεις, γεγονός που επιβεβαιώθηκε θεωρητικά και πειραματικά.

1.3 Σύντομη αναφορά ερευνητικών θεμάτων που καλύφθηκαν

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής καλύφθηκαν δύο διαφορετικές θεματικές ενότητες με κοινό σημείο τη δικτύωση με οπτικές μεθόδους σε μικρές αποστάσεις της τάξης των δεκάδων μέτρων. Όσον αφορά την πρώτη θεματική ενότητα, στοχεύοντας στην ενσύρματη κάλυψη αποστάσεων μεταξύ 50 και 100 μέτρων σε εσωτερικούς χώρους, πχ εντός ενός σπιτιού ή ενός γραφείου, εξετάστηκαν οι δυνατότητες των πλαστικών οπτικών ινών ως προς τις απώλειες που εισάγουν σε ζεύξεις σημείου-προς-σημείο και ως προς το εύρος ζώνης που δύνανται να υποστηρίξουν, αλλά κι αν αυτές οι ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν. Πιο συγκεκριμένα, σε μία προσπάθεια μείωσης του κόστους και αύξησης της απλότητας και της ευελιξίας των ενσύρματων δικτύων σε εσωτερικούς χώρους, επιλέχθηκαν οι πλαστικές οπτικές ίνες μεγάλης διατομής, συγκεκριμένα 1 mm, με βηματικό προφίλ δείκτη διάθλασης κατασκευασμένες από υλικό PMMA. Πρόκειται για μία φθηνή λύση καλωδίου που συνδυάζεται με τη δυνατότητα μείωσης του κόστους και στα άκρα, αφού οι πομποί, οι δέκτες και οι συνδετήρες έχουν προσιτό κόστος, ενώ λόγω της μεγάλης διατομής των ινών υπάρχει ευελιξία στη διαχείριση του καλωδίου χωρίς να προκύπτουν σημαντικές υποβαθμίσεις της ισχύος σε συνδέσεις με ευθυγραμμίσεις που δεν είναι οι βέλτιστες δυνατές. Επίσης, σαν καλώδιο έχει μικρότερο βάρος και καταλαμβάνει μικρότερο χώρο από τα χάλκινα καλώδια που χρησιμοποιούνται συνήθως στα εν λόγω δίκτυα. Ταυτόχρονα, ως οπτική τεχνολογία, έχει το σαφές πλεονέκτημα της ανοσίας στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που συμβαίνουν συνήθως σε χαμηλότερες συχνότητες και σε έντονα χρησιμοποιούμενο φάσμα. Επιπλέον, αυτού του τύπου η οπτική καλωδίωση μπορεί να συνδυαστεί με κατάλληλο σχεδιασμό του εσωτερικού δικτύου κάνοντας δυνατή τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης δημιουργώντας μία πράσινη υποδομή. Παρά τα πλεονεκτήματα της πλαστικής οπτικής ίνας σαν κανάλι διάδοσης για την κάλυψη αποστάσεων δεκάδων μέτρων, σε πρακτικές εμβέλεις μεταξύ 50 και 100 μέτρων εισάγονται περιορισμοί που έχουν να κάνουν με τις σχετικά αυξημένες απώλειες αλλά και με το σχετικά χαμηλό εύρος ζώνης. Αυτοί οι περιορισμοί αποκτούν μεγάλη σημασία όταν αντιληφθεί κανείς τις απαιτήσεις που έχουν ήδη αρχίσει να επιβάλλονται στα άκρα του δικτύου και αφορούν την ποσότητα των δεδομένων που εισέρχονται και εξέρχονται σε ένα εσωτερικό δίκτυο. Η χρονική εξέλιξη αυτών των απαιτήσεων τα τελευταία χρόνια, αλλά και οι σχετικές προβολές στο κοντινό μέλλον που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 1.1 δείχνουν όχι μόνο την αύξηση των δεδομένων που θα διακινούνται, αλλά και την αναγκαία υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης στα άκρα του δικτύου όπου γεννάται και λαμβάνεται η πληροφορία. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, η πλαστική οπτική ίνα ενδεχομένως να μην είναι δυνατό να λειτουργήσει ικανοποιητικά σαν τηλεπικοινωνιακό κανάλι για τη μετάδοση απλών σημάτων εφαρμόζοντας συμβατικά σχήματα διαμόρφωσης. Διάφορες προτάσεις η εφαρμογή των οποίων έχει μελετηθεί πειραματικά και οι οποίες θα παρουσιαστούν σύντομα στο επόμενο κεφάλαιο έχουν δείξει ότι υπάρχει η δυνατότητα να υποστηριχθούν υψηλοί ρυθμοί δεδομένων που να καλύπτουν τις απαιτήσεις που θα εμφανιστούν στο κοντινό μέλλον, παρά το περιορισμένο εύρος ζώνης της πλαστικής ίνας σαν τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Αντίθετα με την κοινή πρακτική εφαρμογής τεχνικών κατά την εκπομπή ή/και τη λήψη για την αντιμετώπιση του περιορισμένου εύρους ζώνης των πλαστικών οπτικών ινών, αυτό που αξιολογήθηκε εδώ ήταν η δυνατότητα επέμβασης απευθείας στο κανάλι και βελτίωσης των χαρακτηριστικών της ίνας χωρίς την αντικατάσταση του καλωδίου. Αναπόφευκτα, η αξιολόγηση του βαθμού βελτίωσης θα γινόταν συμπληρωματικός στόχος εφόσον αυτή γινόταν εφικτή. Αρχικά, εξετάστηκαν θεωρητικά οι μηχανισμοί που

δρουν κατά τη διάδοση του φωτός, μέσω της περιγραφής της διαφορικής εξίσωσης που αναπαριστά την ροή της οπτικής ισχύος μέσα στην ίνα. Έπειτα, λύθηκε αριθμητικά η προηγούμενη διαφορική εξίσωση και ακολούθησε μία σύντομη μελέτη της επίδρασης στο εύρος ζώνης της παραμέτρου που καθορίζει το ρυθμό ενεργοποίησης των τρόπων υψηλότερης τάξης από σύζευξη ισχύος λόγω σκεδάσεων κατά τη διάδοση στον πυρήνα της ίνας, αλλά και του παράγοντα που καθορίζει το ποσοστό της ισχύος που παραμένει στην πυρήνα μετά από μία ανάκλαση μίας διαδιδόμενης ακτίνας στα όρια του πυρήνα με το μανδύα της ίνας. Αφού αποκτήθηκε μία εικόνα της επίδρασης αυτών των παραμέτρων στη διασπορά των τρόπων της ίνας και κατ' επέκταση στο εύρος ζώνης που μπορεί να υποστηριχθεί από το κανάλι, αμέσως μετά πραγματοποιήθηκε μία εκτενής πειραματική μελέτη σχετικά με το κατά πόσο μπορούν να μεταβληθούν τα χαρακτηριστικά της πλαστικής οπτικής ίνας υποβάλλοντάς την σε μία διαδικασία θέρμανσης. Αλλαγή των μετρούμενων χαρακτηριστικών της ίνας (εύρος ζώνης, απώλειες) θα ισοδυναμούσε με αλλαγή των τιμών των παραμέτρων που μόλις αναφέρθηκαν για τις θερμικά κατεργασμένες ίνες.

Δοκιμάστηκαν ίνες διαφορετικών κατασκευαστών και μηκών. Για όλες τις ίνες 50 μέτρων καθενός κατασκευαστή, χρησιμοποιήθηκε και μία αντίστοιχη ίνα αναφοράς ίδιου μήκους από την ίδια καλούμπα του ίδιου κατασκευαστή ώστε να πραγματοποιηθούν δίκαια οι απαραίτητες συγκρίσεις. Αποδείχθηκε πειραματικά ότι ένα συγκεκριμένο μοτίβο θέρμανσης που ακολουθήθηκε είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους ζώνης κατά περίπου 40% και τη μικρή μείωση των απωλειών των ινών που υπέστησαν τη συγκεκριμένη διαδικασία θέρμανσης, σε σχέση με τις αντίστοιχες ίνες αναφοράς. Αυτή η βελτίωση παρατηρήθηκε υπό την προϋπόθεση της άμεσης σύνδεσης της πηγής laser που χρησιμοποιήθηκε με την ίνα χωρίς τη χρήση κάποιου συνδετήρα, αλλά διατηρώντας την ίνα μόνο με τους κατάλληλους μεταλλικούς δακτυλίους στα άκρα της. Μετρήσεις της απόκρισης συχνότητας και των απωλειών των ινών που πέρασαν από τη διαδικασία θέρμανσης αλλά και των αντίστοιχων ινών αναφοράς έδειξαν ότι οι βελτιωμένες επιδόσεις των θερμικά κατεργασμένων ινών έχουν ήδη διατηρηθεί για διάρκεια μεγαλύτερη του έτους. Παρά τη βελτίωση που μετρήθηκε υπό το καθεστώς σύνδεσης πηγής-ίνας που περιγράφηκε, όταν η εισερχόμενη δέσμη στην ίνα ήταν αρκετά ευρεία διεγείροντας από την αρχή της μετάδοσης μεγάλο πλήθος τρόπων υψηλότερης τάξης, οι θερμικά κατεργασμένες ίνες εμφάνιζαν παρόμοιες επιδόσεις με τις αντίστοιχες ίνες αναφοράς όσον αφορά το εύρος ζώνης. Στη συνέχεια, έγινε μία προσπάθεια συσχέτισης της μετρημένης βελτίωσης, υπό τις προϋποθέσεις που περιγράφηκαν, με τη θεωρητική παράμετρο που περιγράφει τη σύζευξη ισχύος προς τρόπους υψηλότερης τάξης κατά τη διάδοση και την παράμετρο που αναπαριστά το ποσοστό της ισχύος που παραμένει εντός του πυρήνα μετά από ανάκλαση στα όρια πυρήνα-μανδύα. Ως συσχέτιση εννοείται απλά η απόδοση κατάλληλων τιμών στις παραμέτρους, ώστε να ελεγχθεί αν η θεωρία ακολουθεί το πείραμα. Επομένως, έγινε μία απόπειρα θεωρητικής επιβεβαίωσης των αλλαγών που προέκυψαν πειραματικά μέσω ανάθεσης κατάλληλων τιμών στις παραμέτρους που μόλις αναφέρθηκαν, ώστε με την εφαρμογή τους στο θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και επιλύθηκε, να ελεγχθεί αν οι θεωρητικές αποκρίσεις συχνότητας συμβαδίζουν με τις αντίστοιχες πειραματικές. Υποθέτοντας άμεση σύνδεση της πηγής με την ίνα, αυτή η απόπειρα ήταν επιτυχής, καθώς οι θεωρούμενες τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν οδήγησαν σε καμπύλες αποκρίσεων συχνότητας που συμβαδίζουν με τις αποκρίσεις συχνότητας που είχαν μετρηθεί πειραματικά για τις θερμικά κατεργασμένες ίνες και για τις αντίστοιχες ίνες αναφοράς. Γι' αυτές τις τιμές των παραμέτρων προέκυψαν συμβατά θεωρητικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα πειραματικά και για την περίπτωση όπου η δέσμη που εισερχόταν στην ίνα είχε τέτοια μορφή ώστε να καλύπτει πλήρως τη διατομή εισόδου της ίνας. Με αυτή την ομάδα μετρήσεων επιβεβαιώθηκαν η θεωρητική περιγραφή των φαινομένων που συντελέστηκαν κατά τη θέρμανση των ινών, αλλά και η

ποσοτική αξιολόγηση του αποτελέσματος της θερμικής κατεργασίας με την ανάθεση τιμών στις κρίσιμες παραμέτρους που θεωρήθηκε ότι επηρεάζουν κυρίως το εύρος ζώνης της ίνας.

Τελευταία πειραματική διαδικασία ήταν η ανάπτυξη ζεύξεων σημείου-προ-σημείο και η μετάδοση On-Off-Keying σημάτων σε διάφορους ρυθμούς με άμεση σύνδεση της πηγής με την ίνα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις θερμικά κατεργασμένες ίνες με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τις ίνες αναφοράς ανά κατασκευαστή. Τα αποτελέσματα των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων σε διάρκεια μεγαλύτερη του έτους έδειξαν ότι ο ρυθμός που μπορεί να υποστηριχθεί από τις θερμικά κατεργασμένες ίνες ήταν υψηλότερος από 35% σε σχέση με τις αντίστοιχες ίνες αναφοράς για ίδια τιμή ρυθμού σφαλμάτων bit. Επομένως, αποδείχθηκε ότι μέσω συγκεκριμένων βημάτων θέρμανσης εμπορικά διαθέσιμων ινών είναι δυνατή η βελτίωση των επιδόσεών τους, με ελαφρά μείωση των απωλειών και αύξηση του εύρους ζώνης. Αυτή η αλλαγή εμφανίστηκε υπό την προϋπόθεση της εισόδου της οπτικής δέσμης συγκεντρωμένης και στο κέντρο της ίνας, συνδέοντας άμεσα μία πηγή laser με την οπτική ίνα.

Στη δεύτερη θεματική ενότητα, το βάρος δόθηκε στις οπτικές ασύρματες μεταδόσεις με διάχυτο τρόπο σε εξωτερικό χώρο με σκοπό την κάλυψη μικρών αποστάσεων της τάξης των λίγων δεκάδων μέτρων και σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Μπάντες στην περιοχή των μικροκυματικών συχνοτήτων έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για δεκαετίες, ενώ με την εξέλιξη των προδιαγραφών των συστημάτων επικοινωνιών έχουν αυξηθεί σημαντικά οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί δεδομένων. Ωστόσο, σε εξωτερικές μεταδόσεις η μεγάλη πυκνότητα χρηστών αυξάνει τις παρεμβολές και μειώνει τη ρυθμαπόδοση. Γενικά, οι ασύρματες μικροκυματικές μεταδόσεις είναι ευάλωτες στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές είτε ηθελημένες είτε όχι, ενώ επίσης γνωστό πρόβλημα των μικροκυματικών μεταδόσεων είναι οι διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών. Άλλη εναλλακτική για ασύρματες ζεύξεις σε εξωτερικό περιβάλλον είναι η χρήση οπτικού φέροντος στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου αλλά και υπό συνθήκες στην περιοχή του ορατού φωτός, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.2. Ωστόσο, τέτοιες ζεύξεις στήνονται υπό ένα καθεστώς οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη.

Έχοντας ως στόχο σε αυτή τη θεματική ενότητα την ανάπτυξη και τη μελέτη της λειτουργίας ζεύξεων σημείου-προς-σημείο σε εξωτερικό περιβάλλον χωρίς οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη, το μήκος κύματος που χρησιμοποιήθηκε βρισκόταν στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα και πιο συγκεκριμένα στα 265 nm. Ως οπτική τεχνολογία είναι ανθεκτική στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και ταυτόχρονα, η χρήση αυτής της μπάντας είναι δωρεάν. Υπό ένα καθεστώς μεταδόσεων χωρίς οπτική επαφή, απαιτείται η χρήση μηκών κύματος που να επιτρέπουν ισχυρή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, ενώ η εφαρμογή μεταδόσεων σε εξωτερικό χώρο επιβάλλει την παρουσία μειωμένου θορύβου από το περιβάλλον και πιο συγκεκριμένα από τον ήλιο. Με τη συγκεκριμένη περιοχή υπεριώδους φάσματος καλύπτεται η συνθήκη της έντονης σκέδασης λόγω του μικρού μήκους κύματος. Επιπλέον, σε αυτή τη μπάντα είναι ελάχιστη η ακτινοβολία του ηλίου που φθάνει στην γη, καθώς κατά τα πέρασμά της από την ατμόσφαιρα, απορροφάται πρωτίστως από το όζον (O_3), αλλά και από το οξυγόνο (O_2), φθάνοντας σε αμελητέα επίπεδα στην επιφάνεια τη γης. Αυτός είναι και ο λόγος χρήσης του όρου «ηλιακά τυφλή» μπάντα. Πρόσθετο πλεονέκτημα από τις οπτικές μεταδόσεις είναι η απουσία διαλείψεων λόγω πολλαπλών διαδρομών, εξαιτίας των διαστάσεων του δέκτη σε σχέση με το μήκος κύματος εκπομπής. Όσον αφορά τις παρεμβολές από την έντονη χρήση του φάσματος, σε αυτή την μπάντα είναι ανύπαρκτες, καθώς δεν έχει χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη περιοχή μηκών κύματος. Επιπλέον, ηθελημένες παρεμβολές ή απόπειρες υποκλοπής από απόσταση είναι αρκετά δύσκολο ως αδύνατο να πραγματοποιηθούν αποτελεσματικά λόγω των υψηλών απωλειών για την κάλυψη μεγάλης απόστασης. Επομένως, στήνοντας ζεύξεις στο

ηλιακά τυφλό τμήμα της UV-C μπάντας δίνεται η δυνατότητα λειτουργίας χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη με κάλυψη από παρεμβολές και με εγγενή προστασία από υποκλοπή και μάλιστα από απόσταση. Ένας πρόσθετος ευνοϊκός παράγοντας σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων είναι και η ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η εμφάνιση ομίχλης σημαίνει εμφάνιση σταγονιδίων νερού δηλαδή κέντρων σκέδασης στην ατμόσφαιρα που με τη σειρά του αυτό το γεγονός σημαίνει εντονότερη σκέδαση στην ατμόσφαιρα και δυνατότητα μείωσης των απωλειών στις ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή.

Δίνεται, λοιπόν, η δυνατότητα εγκατάστασης ενός συστήματος με δυνατότητα υποστήριξης μεταδόσεων χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, χωρίς κίνδυνο αδυναμίας λειτουργίας λόγω θορύβου από το περιβάλλον, καθώς ο θόρυβος από τον ήλιο φθάνει αρκετά εξασθενημένος στην επιφάνεια της γης, και ταυτόχρονα, ένα τέτοιο σύστημα είναι εύρωστο ενάντια σε ηθελημένες παρεμβολές και υποκλοπές από απόσταση. Έχοντας αυτά τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά υπόψη και ότι το ασύρματο μέσο είναι η ατμόσφαιρα, αρχικά περιγράφηκε η σύσταση της ατμόσφαιρας και εξετάστηκαν θεωρητικά τα χαρακτηριστικά της όσον αφορά τη σκέδαση και την απορρόφηση στην περιοχή μηκών κύματος του ενδιαφέροντός μας. Επίσης, έγινε διάκριση της διαφορετικής συμπεριφοράς σκέδασης και απορρόφησης των μορίων από τα μικροσωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Η ποσοτική περιγραφή της απορρόφησης και της σκέδασης για τυπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες έγινε μέσω των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης του μέσου, καθώς και μέσω της συνάρτησης φάσης. Η συνάρτηση φάσης υποδεικνύει στατιστικά την πιθανότερη νέα κατεύθυνση των φωτονίων σε σχέση με τον άξονα διάδοσής τους κατά τη στιγμή της σκέδασης.

Έχοντας κατανοήσει τους μηχανισμούς σκέδασης στην ατμόσφαιρα, θεωρήθηκαν ζεύξεις σημείου-προς-σημείο χωρίς οπτική επαφή και ακολούθησε η θεωρητική μοντελοποίηση του καναλιού ώστε να καταστεί δυνατός ο καθορισμός των δυνατοτήτων που παρέχονται ως προς το εύρος ζώνης και ως προς τις απώλειες. Για την εξαγωγή της κρουστικής απόκρισης του καναλιού και κατ' επέκταση της απόκρισης συχνότητας για τον υπολογισμό του εύρους ζώνης του εκάστοτε καναλιού, αλλά και για τον υπολογισμό των απωλειών εφαρμόστηκαν δύο μοντέλα. Το ένα ήταν το απλό μοντέλο μονής σκέδασης, όπου ένα φωτόνιο κατά τη διάδοσή του θα υποστεί το πολύ μία σκέδαση προτού φθάσει στο δέκτη. Πρόκειται για μοντέλο που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά υπό συνθήκες. Το δεύτερο μοντέλο που εξετάστηκε περιλάμβανε την εφαρμογή πολλαπλών σκεδάσεων ανά φωτόνιο με εφαρμογή της τεχνικής Monte Carlo. Αυτό είναι ένα ακριβέστερο μοντέλο αλλά πολυπλοκότερο και υπολογιστικά πιο απαιτητικό. Αμέσως μετά, περιγράφηκαν τα σχήματα διαμόρφωσης οι επιδόσεις των οποίων θα εξετάζονταν υπό συνθήκες διάχυτων μεταδόσεων. Από τα σχήματα αυτά, 4 ήταν παλμικά και 2 πολλαπλών φερόντων. Προτού εξεταστούν οι μεταδόσεις θεωρητικά, αναπτύχθηκε το θεωρητικό μοντέλο του δέκτη. Έχοντας κατά νου ότι οι διάχυτες μεταδόσεις επιβάλλουν πολύ υψηλές απώλειες, η ισχύς ενός σήματος μετά από τη διάδοση εντός ενός ασύρματου μέσου πολύ υψηλών απωλειών θα έχει υποβαθμιστεί σημαντικά και θα αρχίσει να γίνεται έκδηλη η κβαντική φύση του φωτός. Σε αυτή την περίπτωση, αν το υποβαθμισμένο σήμα προσπέσει σε μία απλή φωτοδίοδο pin, τότε ο θερμικός θόρυβος θα καταπνίξει τα ελάχιστα φωτοηλεκτρόνια που θα έχουν προκύψει από τα λαμβανόμενα φωτόνια. Αυτό το φαινόμενο θα εμφανίζεται ακόμα και με υψηλή αποκρισιμότητα του φωτοφωρατή. Επομένως, απαιτείται ένας φωτοφωρατής που να προσδίδει κάποιο κέρδος στο προσπίπτον σήμα, ώστε ακόμα κι αν μετρούνται ελάχιστα φωτοηλεκτρόνια στη διάρκεια ενός παλμού να μπορεί να προκύψει μία αξιοπρεπής τιμή του σήματος προς το θόρυβο (Signal-to-Noise-Ratio – SNR), με ταυτόχρονη ανάδειξη του θορύβου βολής ως επικρατούσα συνιστώσα στο δέκτη. Τέτοιος φωτοφωρατής είναι η APD. Ωστόσο, δεν έχει ωριμάσει η τεχνολογία αυτού του

τύπου φωτοδιόδων στην περιοχή της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας, ενώ για να υλοποιηθεί μία μεγάλη επιφάνεια που θα αυξήσει την πιθανότητα λήψης φωτονίων πρέπει να χρησιμοποιηθεί διάταξη από τέτοιες φωτοδιόδους. Εναλλακτική επιλογή φωτοφωρατών που μπορούν να δώσουν υψηλές τιμές κέρδους, έχουν μεγάλη επιφάνεια και ο θόρυβός τους είναι σε γενικές γραμμές μικρότερος αυτών των APDs είναι οι φωτοπολλαπλασιαστές. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι φωτοπολλαπλασιαστές δεν έχουν πολύ υψηλό ηλεκτρικό εύρος ζώνης, δηλαδή δεν μπορούν να υποστηρίξουν υψηλούς ρυθμούς λαμβανόμενων δεδομένων. Ωστόσο, με δεδομένες τις τεράστιες απώλειες κατά τη διάδοση, η υποστήριξη λίγων δεκάδων kilobit/sec είναι αρκετή, καθώς οι φωτοπολλαπλασιαστές συνήθως υποστηρίζουν εύρος ζώνης της τάξης κάποιων MHz που αρκεί για τις απαιτήσεις της εφαρμογής των διάχυτων μεταδόσεων. Για μηδενική αλληλοπαρεμβολή συμβόλων που είναι ρεαλιστική υπόθεση για σήματα χαμηλού ρυθμού που πέρασαν μέσα από κανάλι διάχυτων μεταδόσεων, διατηρώντας αρχικά μόνο τη συνιστώσα του θορύβου βολής, ακολούθησε μία μαθηματική περιγραφή των βημάτων από τα οποία θα προκύψει η διακύμανση του θορύβου βολής και η μέση στάθμη του λαμβανόμενου σήματος στο ηλεκτρικό επίπεδο υπό μορφή φωτοηλεκτρονίων, υποθέτοντας ότι η διάταξη μετατροπής των φωτονίων σε ηλεκτρόνια είναι ένας φωτοπολλαπλασιαστής. Αυτή η διαδικασία κρίθηκε αναγκαία για την ορθή ενσωμάτωση του θορύβου κατά τη λήψη των σημάτων κατά τις προσομοιώσεις. Έχοντας κάνει την προεργασία με το σήμα και το θόρυβο βολής, εξάχθηκαν οι θεωρητικές τιμές του ρυθμού σφαλμάτων bits συναρτήσεως του ηλεκτρικού SNR τόσο για κάποια από τα εξεταζόμενα παλμικά σήματα όσο και για τα σήματα πολλαπλών φερόντων.

Αφού καλύφθηκαν τα θέματα που αφορούσαν τη θεωρητική περιγραφή των φαινομένων που συμβάλλουν στη επίτευξη ασύρματων μεταδόσεων μεταξύ δύο σημείων χωρίς οπτική επαφή και παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι μοντελοποίησης καναλιού και δέκτη, θεωρήθηκε μία ζεύξη δύο σημείων, όπου ο δέκτης έχει ευρύ πεδίο θέασης, μία θεωρητικά ακραία περίπτωση μείωσης όχι μόνο των απωλειών, αλλά και του εύρους ζώνης, ώστε να εξεταστεί η περίπτωση όπου θα εμφανιστεί αλληλοπαρεμβολή συμβόλων έστω και σχετικά μικρή ακόμα και για μικρούς ρυθμούς. Η δέσμη του πομπού θεωρήθηκε ευθυγραμμισμένη με τον άξονα σύνδεσης πομπού και δέκτη, παρά την όποια γωνία ανύψωσης του πομπού. Υπό αυτές τις υποθέσεις, εφαρμόστηκε το μοντέλο μονής σκέδασης για να προκύψουν αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούσαν κρουστικές αποκρίσεις, αποκρίσεις συχνότητας και απώλειες. Κρίσιμη παράμετρος που λήφθηκε υπόψη ήταν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, δηλαδή αν επρόκειτο για αραιό ή για πυκνό μέσο. Σε αυτό το σημείο η πυκνότητα του μέσου προσδιορίστηκε έμμεσα από τις τιμές των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης. Για το πυκνότερο μέσο εφαρμόζονταν υψηλότερες τιμές για τους συντελεστές που αναφέρθηκαν. Η επίδραση της πυκνότητας του μέσου όχι μόνο στις απώλειες, αλλά και στο εύρος ζώνης φάνηκε ότι ήταν πολύ σημαντική, καθώς για την διάταξη πομπού και δέκτη και το εύρος των αποστάσεων που θεωρήθηκαν, εμφανίστηκε σημαντική μείωση των απωλειών και αύξηση του εύρους ζώνης στο πυκνό μέσο.

Η εφαρμογή του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων συνδυάστηκε με την ευελιξία στον καθορισμό των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης όσον αφορά τα μικροσωματίδια στην ατμόσφαιρα. Αρχικά, από τις υποτιθέμενες συνθήκες σχετικής υγρασίας και ορατότητας και από το επιθυμητό μήκος κύματος, ήταν δυνατή η εκτίμηση δεικτών διάθλασης, μεγεθών των ακτινών και των πυκνοτήτων των μικροσωματιδίων της ατμόσφαιρας από κάποια μοντέλα μικροσωματιδίων που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία. Αυτοί οι υπολογισμοί επέτρεπαν την θεώρηση κατάλληλων κατανομών μεγεθών των μικροσωματιδίων. Έπειτα, για καθεμία ακτίνα μικροσωματιδίων με την αντίστοιχη πυκνότητα (από την κατανομή μεγεθών) και για τον δείκτη διάθλασης που

εκτιμήθηκε ήταν δυνατοί οι υπολογισμοί των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης και της συνάρτησης φάσης που αντιπροσωπεύουν την κατανομή των μικροσωματιδίων μέσω υπολογισμών της σχετικής θεωρίας. Τονίζεται ότι το σημείο εκκίνησης αυτών των υπολογισμών ήταν η επιλογή μήκους κύματος, σχετικής υγρασίας και ορατότητας. Επομένως, θέτοντας κατάλληλα αυτές τις παραμέτρους και με κατάλληλες θεωρήσεις για τα μόρια της ατμόσφαιρας εκτιμήθηκαν πλήρως τα χαρακτηριστικά της καθαρής ατμόσφαιρας. Από την άλλη, όσον αφορά την πυκνή ατμόσφαιρα, αυτή θεωρήθηκε ως αποτέλεσμα εμφάνισης ομίχλης. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια κατανομή μεγεθών για τα σταγονίδια της ομίχλης από τη βιβλιογραφία, αλλά από το δείκτη διάθλασης του νερού στο μήκος κύματος της επιλογής μας, από την ακτίνα των σταγονιδίων και από την πυκνότητα των σταγονιδίων ανά μονάδα όγκου ήταν και πάλι δυνατή η εκτίμηση των παραμέτρων σκέδασης και απορρόφησης του μέσου υπό την παρουσία ομίχλης. Επομένως, τόσο στο αραιό όσο και στο πιο πυκνό μέσο ήταν δυνατός ο καθορισμός των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης και της τελικής συνάρτησης φάσης μέσω του καθορισμού των τιμών διαφόρων παραμέτρων χωρίς να είναι να αναγκαία η χρήση προκαθορισμένων τιμών για τους συντελεστές που μόνο έμμεσα καθορίζουν την πυκνότητα του μέσου. Αυτό έδινε μεγάλη ευελιξία στις ρυθμίσεις, προσφέροντας τη δυνατότητα εκτίμησης πολλών συνδυασμών αποτελεσμάτων. Για συγκεκριμένες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, για ρεαλιστικές τιμές εύρους της δέσμης του πομπού και γωνίας θέασης του δέκτη και για συγκεκριμένη πυκνότητα των σταγονιδίων ομίχλης, για κάλυψη μέχρι 50 μέτρα, από την προσομοίωση του καναλιού φάνηκε ότι στο πυκνότερο μέσο οι απώλειες παραμένουν μειωμένες αρκεί οι ακτίνες των σταγονιδίων να είναι μικρότερες από κάποια συγκεκριμένη τιμή ειδικά για τη μεγαλύτερη απόσταση των 50 μέτρων, καθώς το πυκνό μέσο αρχίζει να δρα ανασταλικά στην επικοινωνία και οι απώλειες εμφανίζονται ξανά αυξημένες με την περαιτέρω αύξηση των ακτίνων των σταγονιδίων.

Η δυνατότητα λεπτομερέστερης περιγραφής του μέσου με την εφαρμογή του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων σε σχέση με το μοντέλο μονής σκέδασης αναδείχθηκε σε κάποια σενάρια σύγκρισης των δύο μοντέλων όπου η υποστήριξη περισσότερων σκεδάσεων ανά φωτόνιο γίνεται αναγκαία. Τέτοιες περιπτώσεις αφορούν σενάρια πυκνού μέσου με σχετικά υψηλές γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη για κάλυψη απόστασης από 50 μέχρι και 100 μέτρα, διατηρώντας το καθεστώς βραχείας εμβέλειας για εξωτερικές μεταδόσεις.

Αφού περιγράφηκαν θεωρητικά τα τμήματα του καναλιού και του δέκτη και μετά τις εκτιμήσεις απωλειών και εύρους ζώνης για κάποια σενάρια γεωμετρικών σχηματισμών πομπού και δέκτη, εξετάστηκε το σύστημα δύο σημείων στην ολότητά του. Οι αποστάσεις που θεωρήθηκαν ήταν μέχρι 50 μέτρα, ενώ στο δέκτη ενσωματώθηκαν με ρεαλιστικό τρόπο οι συνιστώσες θερμικού θορύβου, θορύβου περιβάλλοντος παρά την χαμηλή τιμή του, θορύβου σκότους του θεωρούμενου φωτοπολλαπλασιαστή, εκτός από το θόρυβο βολής που είναι εγγενής στο ίδιο το σήμα. Παραμένοντας στο μοντέλο μονής σκέδασης και με μεγάλη γωνία θέασης του δέκτη, τα σχήματα διαμόρφωσης εξετάστηκαν ως προς τις απαιτήσεις σε ισχύ εκπομπής και ως προς το ηλεκτρικό SNR που πετυχαίνουν σε αραιό και πολύ πυκνό μέσο για την επίτευξη του ίδιου ρυθμού σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER). Το πολύ πυκνό μέσο με το μεγαλύτερο εύρος ζώνης και τις μικρότερες απώλειες επέβαλε μικρότερα επίπεδα ισχύος για όλα τα σχήματα διαμόρφωσης, ενώ το παλμικό σχήμα διαμόρφωσης στο οποίο δε χρησιμοποιείται κατώφλι απόφασης έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Η επόμενη θεωρητική ανάλυση αφορούσε ένα σύστημα μικρού πλήθους κόμβων που δημιουργούν μία δικτυακή υποδομή. Ένας κεντρικός κόμβος μπορούσε να λάβει από άλλους κόμβους που βρίσκονταν σε αποστάσεις μέχρι 50 μέτρα. Για την πολλαπλή πρόσβαση στο ασύρματο μέσο θεωρήθηκε ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με

διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA). Εφαρμόζοντας το μοντέλο μονής σκέδασης, εξετάστηκαν αρχικά οι απαιτήσεις σε ισχύ εκπομπής παλμικών σημάτων για ένα κόμβο που θα εκπέμπει προς τον κεντρικό όταν γίνουν μεταδόσεις ταυτόχρονα κι από άλλους κόμβους με κάποια πιθανότητα. Τα επίπεδα ισχύος εκπομπής αφορούσαν την επίτευξη συγκεκριμένων τιμών BER. Ο έλεγχος έγινε θεωρώντας αραιό και πολύ πυκνό μέσο. Με ένα δέκτη με μεγάλη γωνία θέασης που περιορίζει το εύρος ζώνης του καναλιού όταν θεωρηθεί αραιό μέσο, οι απαιτήσεις σε ισχύ εκπομπής αποδείχθηκαν σημαντικά υψηλότερες από την περίπτωση του πυκνότερου μέσου. Το μειωμένο φάσμα του αραιού καναλιού επιβαρύνεται και από τις υψηλότερες απώλειες συγκριτικά με το πυκνότερο μέσο. Η ίδια μελέτη με εφαρμογή του μοντέλου μονής σκέδασης έγινε και με μεγαλύτερο πλήθος κόμβων. Το μεγαλύτερο πλήθος κόμβων επιβάλλει την εφαρμογή μεγαλύτερων κωδικών ακολουθιών για την κωδικοποίηση των μεταδόσεων κάθε κόμβου αυξάνοντας το εύρος ζώνης των μεταδιδόμενων κωδικοποιημένων σημάτων. Το πρόβλημα για την περίπτωση που ο δέκτης έχει ευρεία γωνία θέασης ήταν η ανάγκη υποστήριξης ακόμα μεγαλύτερων επιπέδων ισχύος από τον επιθυμητό κόμβο του οποίου οι μεταδόσεις εξετάζονταν, λόγω της αύξησης του εύρους ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος με τη αύξηση του μήκους των κωδικών λέξεων. Οι περιορισμοί μετριάζονται εντός του πολύ πυκνού μέσου, όπου οι απώλειες είναι μειωμένες και το εύρος ζώνης αρκετό για να υποστηρίξει το μεγαλύτερο πλήθος κόμβων που επιβάλλει μεγαλύτερες ακολουθίες κωδικών για τα μεταδιδόμενα σήματα.

Με εφαρμογή του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων για ζεύξη δύο σημείων υπό συγκεκριμένο γεωμετρικό σχηματισμό και απομονώνοντας ένα παλμικό κι ένα σήμα πολλαπλών φερόντων, η συμπεριφορά του ηλεκτρικού SNR συναρτήσεως της ακτίνας των σταγονιδίων ομίχλης δεν ήταν μονότονη για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης. Για συγκεκριμένη πυκνότητα σταγονιδίων, ο λόγος SNR αρχικά αυξανόταν κι από κάποια τιμή της ακτίνας και έπειτα, ο λόγος SNR μειώνεται. Όταν θεωρήθηκε πυκνότερη ατμόσφαιρα η μέγιστη τιμή του SNR για τα σήματα διαμορφωμένα κατά τα δύο σχήματα διαμόρφωσης εμφανίζεται σε μικρότερη τιμή ακτίνας σταγονιδίων ομίχλης σε σχέση με την αρχική πυκνότητα των σταγονιδίων. Αυτά τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι η βελτίωση παύει να υπάρχει όταν το μέσο γίνεται εξαιρετικά πυκνό, αλλά το πότε θα εμφανιστεί η επιδείνωση των επιδόσεων εξαρτάται όχι μόνο από την πυκνότητα των σταγονιδίων ομίχλης αλλά και από τις διαστάσεις αυτών, χωρίς να αμελείται το γεγονός ότι οι επιδόσεις εξαρτώνται και από την γεωμετρία της ζεύξης.

Στο πειραματικό κομμάτι της δεύτερης θεματικής ενότητας, μελετήθηκαν οι επιδόσεις ζεύξεων δύο σημείων. Η πειραματική διερεύνηση δικτυακών υποδομών δεν κατέστη δυνατή. Το σύστημα αποτελούνταν από ένα πομπό κι ένα δέκτη. Για τη μετάδοση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν LEDs που εξέπεμπαν στα 265 nm, ενώ ο φωτοφωρατής ήταν ένας φωτοπολλαπλασιαστής. Μπροστά από τον φωτοπολλαπλασιαστή υπήρχε ένα οπτικό φίλτρο για την αποκλειστική απομόνωση της ζώνης γύρω από το μήκος κύματος που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μεταδόσεις. Προφανώς, τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης είχαν και τα πρόσθετα ηλεκτρονικά κυκλώματα για να είναι δυνατή η άμεση διαμόρφωση των πηγών και η μετέπειτα επεξεργασία των σημάτων στο ηλεκτρικό επίπεδο μετά τη φώραση, αντίστοιχα. Αρχικά, για ένα μεγάλο εύρος γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη και για αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη μέχρι και 20 μέτρα μετρήθηκαν οι απώλειες στα 265 nm σε εξωτερικό περιβάλλον υπό καθαρή ατμόσφαιρα, χωρίς την ύπαρξη εμποδίων, με τη δέσμη του πομπού και τον κώνο λήψης του δέκτη να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (ομοεπίπεδη τοπολογία). Σε γενικές γραμμές, η αναμενόμενη συμπεριφορά ήταν η αύξηση των απωλειών με την αύξηση της απόστασης και των γωνιών ανύψωσης. Αυτή ήταν μία διαδικασία βαθμονόμησης της περιοχής εντός της οποίας έγιναν εκτεταμένες μετρήσεις.

Στο θεωρητικό τμήμα αυτής της θεματικής ενότητας, είχε φανεί μέσω προσομοιώσεων ότι η πύκνωση του μέσου μπορεί υπό συνθήκες να οδηγήσει σε μικρότερες απώλειες και βελτίωση των επιδόσεων. Αυτό ήταν το επόμενο πειραματικό βήμα που πραγματοποιήθηκε. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση μίας μηχανής παραγωγής ομίχλης έγινε μία απόπειρα τροποποίησης των ατμοσφαιρικών συνθηκών εξομοιώνοντας όσο ήταν δυνατό την εμφάνιση ομίχλης. Για ένα πλήθος γεωμετρικών σχηματισμών της ζεύξης, δηλαδή για διάφορες περιπτώσεις αποστάσεων και γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη, έγιναν μετρήσεις της εξέλιξης των απωλειών υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας κι υπό την παρουσία ομίχλης. Η βαρύτητα δόθηκε σε περιπτώσεις όπου πομπός και δέκτης δεν είχαν οπτική επαφή. Επαναλαμβάνεται ότι η διάταξη πομπού και δέκτη ήταν ομοεπίπεδη και πειραματικά. Για καθένα γεωμετρικό σχηματισμό, ξεκινώντας από ένα καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας, μετά τη σταθεροποίηση του συστήματος, η μηχανή έμπαινε σε λειτουργία και καταγράφονταν οι μεταβολές των μετρούμενων απωλειών λόγω των εμφάνισης ομίχλης στο μέσο. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν μία βελτίωση των επιδόσεων με σημαντικές μειώσεις των απωλειών για τους γεωμετρικούς σχηματισμούς που εξετάστηκαν. Αυτή η αλλαγή ήταν ορατή και με γυμνό μάτι. Σε αρκετές περιπτώσεις ζεύξεων που τέθηκαν και εξετάστηκαν, η μείωση των απωλειών ξεπέρασε τα 7 dB σε μεγάλο πλήθος διαδοχικών δειγμάτων, ενώ οι ελάχιστες τιμές των απωλειών που μετρήθηκαν σε συγκεκριμένες ζεύξεις ήταν μειωμένες ακόμα και πάνω από 10 dB σε σχέση με τις μέσες απώλειες προτού τεθεί σε λειτουργία η μηχανή παραγωγής ομίχλης.

Στη συνέχεια των πειραματικών μετρήσεων, αξιολογήθηκαν οι επιδόσεις του συστήματος όσον αφορά το ρυθμό σφαλμάτων bit που ήταν δυνατό να επιτευχθεί για ένα παλμικό σχήμα διαμόρφωσης και για ένα σχήμα διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων. Οι ρυθμοί που δοκιμάστηκαν ήταν λίγα kilobit/sec, λόγω των υψηλών απωλειών. Όπως και με τις απώλειες, έτσι και για την περίπτωση του BER, αρχικά έγινε μία προσπάθεια «χαρτογράφησης» της περιοχής κάλυψης. Σαφέστερα, για ένα πλήθος αποστάσεων μέχρι και τα 20 μέτρα, αλλά και για ένα μεγάλο πλήθος γωνιών ανύψωσης τόσο του πομπού όσο και του δέκτη, διατηρώντας την ομοεπίπεδη διάταξη μεταξύ τους, μετρήθηκε ο ρυθμός BER για ρυθμό 10 kbit/s για τα δύο υπό εξέταση σχήματα διαμόρφωσης. Από τα αποτελέσματα φάνηκε η ανωτερότητα του παλμικού σχήματος διαμόρφωσης και η καλύτερη συμπεριφορά του σε ένα καθεστώς υψηλών απωλειών, λόγω της βέλτιστης διαδικασίας φώρασης.

Το επόμενο βήμα ήταν ο έλεγχος της επίδρασης της πύκνωσης του μέσου στο BER, σα μία προσπάθεια επιβεβαίωσης της τάσης που εμφανίστηκε στο αντίστοιχο κομμάτι των προσομοιώσεων. Όπως και με την μέτρηση των απωλειών, η πύκνωση του μέσου πραγματοποιήθηκε με την εμφάνιση τεχνητής ομίχλης με τη χρήση της μηχανής που αναφέρθηκε. Ήταν αναμενόμενη μία πτώση του BER με την εμφάνιση ομίχλης, λόγω της πτώσης των απωλειών και την αύξηση του ηλεκτρικού SNR στο δέκτη. Αυτή η βελτίωση του BER τελικά επιβεβαιώθηκε και πειραματικά για ρυθμούς 10 kbit/s και 4 kbit/s για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης και για διάφορους γεωμετρικούς σχηματισμούς της ζεύξης, χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Η μέτρηση έγινε καταγράφοντας και παρατηρώντας τη συσσώρευση σφαλμάτων στα λαμβανόμενα bits για το σχήμα διαμόρφωσης που εφαρμοζόταν κάθε φορά. Αυτός ο τρόπος μέτρησης έδινε μία άμεση εικόνα των αλλαγών κατά τη στιγμή της εκτέλεσης του πειράματος, καθώς για ένα συγκεκριμένο γεωμετρικό σχηματισμό τα ζεύξης, με μεταδόσεις σε συγκεκριμένο ρυθμό και υπό συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης, δημιουργούνταν μία καμπύλη με οριζόντιο άξονα το πλήθος των μεταδιδόμενων bits και κατακόρυφο άξονα τα συσσωρευμένα σφάλματα στα λαμβανόμενα bits. Η κλίση τμημάτων τέτοιων καμπυλών έδινε τοπικά την εκτίμηση του BER από τις μετρήσεις. Τα εσφαλμένα λαμβανόμενα bits που συσσωρεύονταν μετρούνταν υπό καθαρή ατμόσφαιρα και έπειτα

υπό την παρουσία ομίχλης. Οι αλλαγές των κλίσεων τμημάτων των καμπυλών υπό την παρουσία της ομίχλης ήταν οφθαλμοφανείς και η πτώση των κλίσεων, δηλαδή η μείωση του BER, ξεπερνούσε σε κάποιες περιπτώσεις ακόμα και τις δύο τάξεις μεγέθους.

Τέλος, δοκιμάστηκε η λειτουργία μία ζεύξης σε καθεστώς οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη με χρήση κατάλληλου φακού και μίας φωτοδιόδου pin από υλικό που αποκρίνεται στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα. Σε μία τέτοια ζεύξη, η συμπεριφορά υπό την παρουσία ομίχλης αναμενόταν να αντιστραφεί, καθώς οι περισσότερες σκεδάσεις θα προκαλούσαν αύξηση των απωλειών. Η αρνητική επίδραση της εμφάνισης ομίχλης ήταν έκδηλη, τόσο με τη σημαντική αύξηση των απωλειών όσο και με την ραγδαία αύξηση του BER που παρατηρήθηκαν κατά τις σχετικές πειραματικές μετρήσεις.

Συνολικά, η λειτουργία οπτικών ασύρματων ζεύξεων με διάχυτες μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη σε εξωτερικό περιβάλλον και σε αποστάσεις λίγων δεκάδων μέτρων μπορεί να επιτευχθεί αρκεί να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη περιοχή μηκών κύματος και οι φωτοφωρατές με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά. Η επικοινωνία σε χαμηλούς ρυθμούς και με γωνίες ανύψωσης που επέβαλαν την έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη πραγματοποιήθηκε πειραματικά στα 265 nm. Η επιδείνωση των ατμοσφαιρικών συνθηκών οδήγησε σε βελτίωση των αποτελεσμάτων, δηλαδή σε μείωση τόσο των απωλειών, όσο και του BER. Ένα τέτοιο σύστημα θέτει σοβαρή υποψηφιότητα για εγκατάσταση και λειτουργία υπό συνθήκες όπου θα παρουσιαζόταν δριμεία υποβάθμιση των επιδόσεων άλλων συμβατικών συστημάτων.

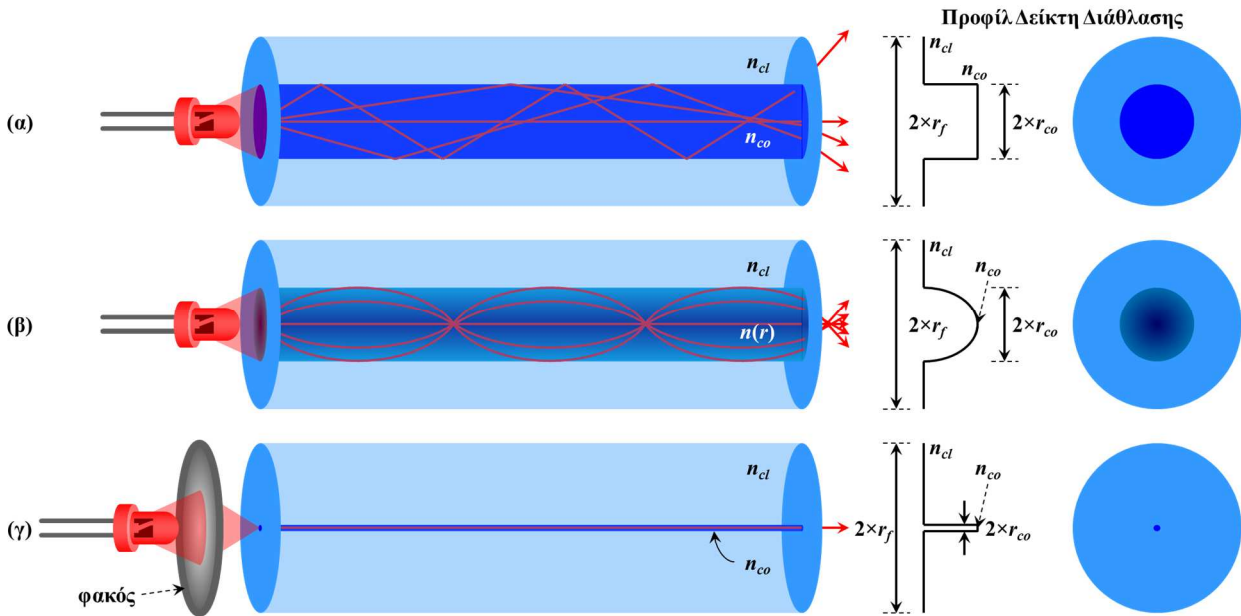
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

2.1 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και δυνατότητες αξιοποίησης των πλαστικών οπτικών ινών

Τύποι οπτικών ινών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση δικτύων σε εσωτερικό χώρο ή σε δίκτυα εντός του σπιτιού είναι οι τυπικές μονότροπες (Single-Mode) και οι πολύτροπες ίνες (Multi-Mode) διοξειδίου πυριτίου. Τα χαρακτηριστικά των συμβατικών μονότροπων οπτικών ινών διοξειδίου πυριτίου είναι γνωστά και εδώ θα γίνει μία πολύ σύντομη αναφορά. Η διάμετρος του πυρήνα είναι 8 με 9 μm και του μανδύα (μαζί με τον πυρήνα) είναι 125 μm . Οι μικρότερες απώλειες είναι κάτω από 0.20 dB/km και εμφανίζονται για μήκη κύματος στην περιοχή των 1550 nm [16]. Για την ίδια περιοχή μηκών κύματος, ο συντελεστής χρωματικής διασποράς είναι μικρότερος από 18 ps/(nm×km). Το εύρος ζώνης που μπορεί να αξιοποιηθεί είναι τουλάχιστον 25 THz για μία ευρεία περιοχή χαμηλών απωλειών, ενώ με λίγο καλύτερη κατασκευή της μονότροπης ίνας, το εύρος ζώνης μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω. Για διασυνδέσεις σε εσωτερικούς χώρους, τυπικές μονότροπες ίνες πωλούνται με κατάλληλα περιβλήματα φθάνοντας σε τελική διάμετρο τα 2 mm με 3 mm ανάλογα με το μοντέλο [17] ή 0,9 mm σε πιο απλή εκδοχή [18] και κόστος κάτω από 0.2 €/m χωρίς τερματισμό σε συνδετήρα και στις δύο εκδοχές τελικής διαμέτρου. Σε μία τέτοια περίπτωση καλωδίου, οι ρυθμοί που θα ήταν δυνατό να εξυπηρετηθούν θα ήταν υπερβολικά υψηλοί, δηλαδή αρκετά gigabit/sec. Από την ενδεικτική τιμή που δόθηκε, φαίνεται να είναι άκρως δελεαστική λύση η χρήση της μονότροπης ίνας, αλλά δεν πρέπει να μας διαφεύγει το γεγονός ότι με την ενσωμάτωση του πομποδέκτη θα αυξηθεί σημαντικά το κόστος του συστήματος χρησιμοποιώντας μήκη κύματος στα 1550 nm. Επιπλέον, παρά την αναμενόμενη ανάγκη αύξησης των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων από και προς το δίκτυο εσωτερικού χώρου, οι ρυθμοί δε μπορεί να είναι τόσο υψηλοί (> 10 Gbit/s ανά μήκος κύματος), ενώ ταυτόχρονα, όποια πληροφορία γεννάται ή προωθείται εντός του ενδο-οικιακού ή εσωτερικού δικτύου δεν είναι δυνατό να απαιτεί περισσότερα από 4 μήκη κύματος σε μία λογική πολυπλεξίας μηκών κύματος (WDM) ακόμα και στο κοντινό μέλλον. Αυτό σημαίνει ότι μία τυπική μονότροπη ίνα θα υποχρησιμοποιούνταν σε απλές συνδέσεις εντός ενός κτιρίου, ακόμα κι αν χρησιμοποιούνταν φθηνότεροι πομποδέκτες στην περιοχή των 1310 nm. Επιπλέον, η μικρή διάσταση του πυρήνα απαιτεί καλή ευθυγράμμιση δύο ινών σε κάποιο σημείο σύνδεσης αυξάνοντας και την τιμή των συνδετήρων. Επομένως, η εναλλακτική λύση πολύτροπων ινών φαίνεται καταλληλότερη για μικρές αποστάσεις παρά το ότι οι επιδόσεις με τέτοιες ίνες είναι υποδεέστερες αυτών που προκύπτουν με μονότροπες ίνες. Επιπροσθέτως, οι πομποδέκτες για τα μήκη κύματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταδόσεις με πολύτροπες ίνες είναι αρκετά φθηνότεροι από ότι για τα 1550 nm. Το υλικό κατασκευής του πυρήνα πολύτροπων ινών δεν είναι αναγκαίο να είναι από SiO₂. Πιο κάτω δίνονται ενδεικτικά κάποια χαρακτηριστικά πολύτροπων ινών που μπορούν να εγκατασταθούν για τη σύνδεση διατάξεων σε ένα δίκτυο εντός ενός σπιτιού.

Όσον αφορά το προφίλ του δείκτη διάθλασης, οι μονότροπες ίνες έχουν βηματικό προφίλ δείκτη διάθλασης. Οι πολύτροπες ίνες έχουν είτε βηματικό (Step-Index – SI) ή βαθμιαίο (Graded-Index – GI) προφίλ δείκτη διάθλασης. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.1, απεικονίζεται η διάδοση φωτός υπό μορφή ακτίνων κατά μήκος πολύτροπης οπτικής ίνας με βηματικό προφίλ δείκτη διάθλασης, με βαθμιαίο προφίλ δείκτη διάθλασης και κατά μήκος μονότροπης ίνας. Από τις δύο πρώτες περιπτώσεις φαίνεται και το κέρδος από την αλλαγή του προφίλ του δείκτη διάθλασης του πυρήνα. Η ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης επιτρέπει οι ακτίνες που θα αφιχθούν στο δέκτη να έχουν σημαντικά μικρότερες καθυστερήσεις μεταξύ τους μειώνοντας την επίδραση της διασποράς των τρόπων σε σχέση με την περίπτωση της ίνας βηματικού δείκτη διάθλασης. Το

αποτέλεσμα είναι οι ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης να παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης όπως θα φανεί και στα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά ινών που θα δοθούν πιο κάτω. Στην τρίτη περίπτωση, φαίνεται η συκέντρωση του φωτός με χρήση φακού πριν τη διάδοση κατά μήκος της μονότροπης ίνας.



Σχήμα 2.1. (α) Πολύτροπη οπτική ίνα με βηματικό προφίλ του δείκτη διάθλασης, (β) πολύτροπη οπτική ίνα με βαθμιαίο προφίλ του δείκτη διάθλασης, (γ) μονότροπη οπτική ίνα. Η διάμετρος του πυρήνα είναι $2 \times r_{co}$ και η διάμετρος της ίνας είναι $2 \times r_f$.

Οι πολύτροπες ίνες με βηματικό δείκτη διάθλασης συνήθως έχουν σχετικά περιορισμένο εύρος ζώνης. Για παράδειγμα, πολύτροπη ίνα διαμέτρου πυρήνα 50 μm με πυρήνα από διοξείδιο του πυριτίου, μανδύα από διοξείδιο του πυριτίου ντοπαρισμένο με φθόριο και αριθμητικό άνοιγμα 0.22, δίνει ονομαστική τιμή εύρους ζώνης 15 MHz στο 1 km (15 MHz \times km) στα 820 nm. Με χαμηλή συκέντρωση ιόντων υδροξυλίου (OH) οι απώλειες είναι 8 dB/km στα 808 nm. Για μία τέτοια ίνα, το κόστος είναι κάτω από 3 € ανά μέτρο για 50 μέτρα ίνας [19]. Ίνα με αντίστοιχα χαρακτηριστικά (εύρος ζώνης, απώλειες, αριθμητικό άνοιγμα), αλλά με μεγαλύτερη διάμετρο πυρήνα (105 μm), έχει ακόμα χαμηλότερο κόστος που είναι μικρότερο από 2 € το μέτρο για 50 μέτρα ίνας [20]. Ο Πίνακας 2.1 περιλαμβάνει τις συγκεντρωμένες τιμές με τις κωδικές ονομασίες των μοντέλων.

Αύξηση του εύρους ζώνης μπορεί να προκύψει είτε με την μείωση των υποστηριζόμενων τρόπων στην ίνα είτε με αλλαγή του προφίλ του δείκτη διάθλασης. Μείωση των υποστηριζόμενων τρόπων σε μία ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης μπορεί να επέλθει με μείωση της ακτίνας του πυρήνα της ίνας διατηρώντας το αρχικό υλικό του πυρήνα. Αλλαγή του προφίλ του δείκτη διάθλασης του πυρήνα μίας πολύτροπης ίνας σημαίνει ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης. Για παράδειγμα, με το ίδιο υλικό πυρήνα με πριν και ίδιες διαστάσεις, αλλά με βαθμιαίο προφίλ δείκτη διάθλασης, επιτυγχάνεται πτώση των απωλειών και αύξηση του εύρους ζώνης σε εμπορικά διαθέσιμο προϊόν. Πιο συγκεκριμένα, η ονομαστική τιμή του εύρους ζώνης είναι μεγαλύτερη από 300 MHz στο 1 km (300 MHz \times km) τόσο στα 850 nm, όσο και στα 1300 nm [21].

Όσον αφορά τις πολύτροπες ίνες διοξειδίου πυριτίου με βαθμιαίο προφίλ δείκτη διάθλασης έχουν βρει ευρεία εφαρμογή σε τοπικά δίκτυα και κέντρα δεδομένων (data centers) λόγω του μειωμένου κόστους και της αξιόπιστης λειτουργίας τους. Οι 5 τύποι στους οποίους διακρίνονται οι πολύτροπες ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης είναι οι OM1, OM2, OM3, OM4 και OM5 (Optical Multimode – OM). Καθένας τύπος αφορά ίνες που πρέπει να πληρούν διαφορετικές προδιαγραφές. Ντοπάροντας τον πυρήνα με

διοξειδίου του γερμανίου (GeO_2) και διατηρώντας τον μανδύα με πυρίτιο υψηλής καθαρότητας, αυξάνεται ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα. Σε συνδυασμό με το προφίλ GI του μανδύα, επιτυγχάνονται τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά [22]. Σε συντομία, χρονικά [23], το 1989 δημιουργήθηκαν οι ίνες με πυρήνα διαμέτρου 62.5 μm και μανδύα 125 μm , οι οποίες ακολουθούν το πρότυπο OM1. Το 1998, άρχισε η χρήση ινών με πυρήνα διαμέτρου 50 μm και μανδύα 125 μm σε Ιαπωνία και Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτός ο τύπος ινών επικράτησε να αναφέρεται ως OM2. Οι OM1 και OM2 GI ίνες συνδυάζονται με LEDs. Οι OM1 και OM2 υποστηρίζουν τα πρότυπα του Ethernet από 100BASE ως 10GBASE, δηλαδή υποστηρίζουν ρυθμό δεδομένων από 100 Mbit/s ως 10 Gbit/s [24]. Με την προτυποποίηση του 10 Gigabit Ethernet, η απαίτηση για καλύτερες πηγές ήρθε στο προσκήνιο. Για να αποφευχθεί η χρήση των ακριβών πηγών που χρησιμοποιούνται σε οπτικά δίκτυα για κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων, κατασκευάστηκαν οι δίοδοι lasers κάθετης κοιλότητας με επιφανειακή εκπομπή (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers – VCSELs). Μετά το 2000, οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί από VCSELs ανέρχονταν σε 10 Gbit/s. Οι συγκεκριμένες δίοδοι lasers έχουν σχετικά χαμηλό κόστος και δυνατότητα εκπομπής στα 850 nm*. Οι νέες πηγές επέβαλαν την κατασκευή νέων ινών και έτσι το 2002 προέκυψαν οι OM3 GI πολύτροπες ίνες οι οποίες είναι βελτιστοποιημένες για χρήση laser (Laser-Optimized Multimode Fibers – LOMMFs). Αυτές οι ίνες έχουν επίσης πυρήνα διαμέτρου 50 μm και μανδύα 125 μm . Με καλύτερη κατασκευή της ίνας OM3 προέκυψαν οι ίνες OM4 το 2009 με αυξημένο γινόμενο εύρους ζώνης επί km. Για τους τύπους από OM1 ως OM4, όπως απεικονίζει ο Πίνακας 2.1, οι δυνατότητες σε εύρος ζώνης διαδοχικά αυξάνονται για μεταδόσεις στα 850 nm. Με αυξανόμενες απαιτήσεις σε ρυθμούς δεδομένων, η μετάδοση πολλαπλών σημάτων από μία ίνα υπό μία μορφή WDM γίνεται πιο αποδοτική. Το 2013 άρχισε η ανάπτυξη VCSELs με υποστήριξη ρυθμού 25 Gbit/s. Έτσι, το 2014 προέκυψαν οι ίνες OM5 με δυνατότητα υποστήριξης WDM με μικρά μήκη κύματος (Short WDM – SWDM), και πιο συγκεκριμένα στα 850 nm, 880 nm, 910 nm, 940 nm. Συνήθως αναφέρονται ως πολύτροπες ίνες ευρείας ζώνης (Wide Band MMF). Με τέσσερις πηγές διαμορφωμένες σε ρυθμό 25 Gbit/s, η χωρητικότητα μπορεί να αγγίξει τα 100 Gbit/s ανά ίνα, που είναι ο ρυθμός που προβλέπεται από το πρότυπο 100 G-SR4 (Short Reach) Gigabit Ethernet που βασίζεται σε 4 παράλληλες ζεύξεις των 25 Gbit/s [25]. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, για 40G-SWDM και 100G-SWDM χρησιμοποιούνται δύο ίνες για full-duplex μετάδοση. Σε καθεμία ίνα μεταδίδονται 40 Gbit/s ή 100Gbit/s με SWDM, αντίστοιχα [26], [27].

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά ινών διοξειδίου πυριτίου βηματικού και βαθμιαίου διάθλασης. OFL: Overfilled Launching, HP-EMB: High-Performance Effective Modal Bandwidth.

Χαρακτηριστικά ίνας	Μοντέλο ίνας FG050LGA [19], FG105LGA [20]	Μοντέλο ίνας GR-S50/125-20P [21]	Τύπος OM1 ([29])	Τύπος OM2 ([28], [29], [30])	Τύπος OM3 ([28], [29], [30])	Τύπος OM4 ([28], [29], [30])	Τύπος OM5 ([28], [30])
Προφίλ δείκτη διάθλασης	SI	GI	GI	GI	GI	GI	GI
Υλικό πυρήνα	Pure Silica	Pure Silica	Effective Group Refraction Index 1.496 στα 850 nm, 1.491 στα 1300 nm	Effective Group Refraction Index 1.482 στα 850 nm, 1.477 στα 1300 nm	Effective Group Refraction Index 1.482 στα 850 nm, 1.477 στα 1300 nm	Effective Group Refraction Index 1.482 στα 850 nm, 1.477 στα 1300 nm	Effective Group Refraction Index 1.482 στα 850 nm, 1.477 στα 1300 nm
Υλικό μανδύα	Fluorine-Doped Silica	$n \approx 1.439$ (850 nm)	Pure silica	Pure silica	Pure silica	Pure silica	Pure silica
Διάμετρος πυρήνα	50 μm [19], 105 μm [20]	50 μm	62.5 μm	50 μm	50 μm	50 μm	50 μm
Διάμετρος μανδύα	125 μm	125 μm	125 μm	125 μm	125 μm	125 μm	125 μm
Αριθμητικό άνοιγμα	0.22	0.20	0.275	0.20	0.20	0.20	0.20
Μέγιστη	8 dB/km (στα 808	≤ 2.70 dB/km στα	≤ 2.9 dB/km στα	≤ 2.3 dB/km στα	≤ 2.3 dB/km στα	≤ 2.3 dB/km στα	≤ 2.3 dB/km στα

* Δίοδοι VCSELs δεν μεταδίδουν αποκλειστικά στα 850 nm, αλλά υπάρχουν και VCSELs που εκπέμπουν στα 650 nm, όπως θα φανεί σε επόμενη ενότητα.

εξασθένιση	nm)	850 nm	850 nm	850 nm	850 nm	850 nm	850 nm
		≤ 1.80 dB/km στα 1060 nm ≤ 1.00 dB/km στα 1300 nm	≤ 0.6 dB/km στα 1300 nm	≤ 0.6 dB/km στα 1300 nm	≤ 0.6 dB/km στα 1300 nm	≤ 0.6 dB/km στα 1300 nm	≤ 1.7 dB/km στα 953 nm ≤ 0.6 dB/km στα 1300 nm
Εύρος ζώνης × Απόσταση	15 MHz × km στα 820 nm	≥ 300 MHz × km στα 850 nm ≥ 300 MHz × km στα 1300 nm	≥ 200 MHz × km στα 850 nm (OFL) ≥ 500 MHz × km στα 1300 nm (OFL)	≥ 950 MHz × km στα 850 nm (HP-EMB) ≥ 700 MHz × km στα 850 nm (OFL) ≥ 500 MHz × km στα 1300 nm (OFL)	≥ 2000 MHz × km στα 850 nm (HP-EMB) ≥ 1500 MHz × km στα 850 nm (OFL) ≥ 500 MHz × km στα 1300 nm (OFL)	≥ 4700 MHz × km στα 850 nm (HP-EMB) ≥ 3500 MHz × km στα 850 nm (OFL) ≥ 500 MHz × km στα 1300 nm (OFL)	≥ 4700 MHz × km στα 850 nm (HP-EMB) ≥ 2470 MHz × km στα 953 nm (HP-EMB) ≥ 3500 MHz × km στα 850 nm (OFL) ≥ 1850 MHz × km στα 953 nm (OFL) ≥ 500 MHz × km στα 1300 nm (OFL)
Μήκη κύματος λειτουργίας	400 – 2400 nm	850 nm και 1300 nm	800 – 1600 nm	800 – 1600 nm	800 – 1600 nm	800 – 1600 nm	800 – 1600 nm
Μέγιστη απόσταση στο 1 Gbit/s			275 m στα 850 nm 550 m στα 1300 nm	550 m στα 850 nm 550 m στα 1300 nm	800 m στα 850 nm 550 m στα 1300 nm	1100 m στα 850 nm 550 m στα 1300 nm	
Μέγιστη απόσταση στα 10 Gbit/s			33 m	82 m	300 m στα 850 nm	550 m στα 850 nm	
Μέγιστη απόσταση στα 40 Gbit/s με 10 Gbit/s ανά ίνα†					100 m στα 850 nm (8 ίνες για full-duplex σύνδεση)	150 m στα 850 nm (8 ίνες για full-duplex σύνδεση)	150 m στα 850 nm (8 ίνες για full-duplex σύνδεση)
Μέγιστη απόσταση στα 100 Gbit/s με 25 Gbit/s ανά ίνα†					70 m στα 850 nm (8 ίνες για full-duplex σύνδεση)	100 m στα 850 nm (8 ίνες για full-duplex σύνδεση)	100 m στα 850 nm (8 ίνες για full-duplex σύνδεση)
Μέγιστη απόσταση στα 40 Gbit/s με SWDM					240 m με 4 μήκη κύματος	350 m με 4 μήκη κύματος	440 m με 4 μήκη κύματος
Μέγιστη απόσταση στα 100 Gbit/s με SWDM					75 m με 4 μήκη κύματος	100 m με 4 μήκη κύματος	150 m με 4 μήκη κύματος
Κόστος ανά μέτρο για αγορά 50 m γυμής ίνας	< 3 €/m [19], < 2 €/m [20]	< 3.6 €/m	< 1.45 €/m	≤ 1.60 €/m για 50 m	< 1.70 €/m	< 1.75 €/m	< 2.10 €/m (patch cable – όχι γυμνή ίνα)

Οι OM3 και OM4 μπορούν να υποστηρίξουν 40 Gbit/s και 100 Gbit/s, αλλά με χρήση πλήθους ινών ή με χρήση SWDM με μία ίνα, αλλά σε μικρότερες αποστάσεις από τις OM5 ίνες. Όσον αφορά την κάλυψη, με GI-ίνες συμβατές κατά το πρότυπο OM4 και OM5 μπορούν να υποστηρίξουν ίδιες αποστάσεις, όταν μεταδίδεται μόνο ένα μήκος κύματος [28], όπως απεικονίζει και ο Πίνακας 2.1. Αντίθετα, στην περίπτωση μετάδοσης SWDM με 4 μήκη κύματος, με τις OM5 ίνες μπορούν να καλυφθούν μεγαλύτερες αποστάσεις. Όπως μπορεί να συμπεράνει κανείς και από τον πίνακα, οι OM1 και OM2 βρίσκουν άμεση εφαρμογή σε τοπικά δίκτυα και δίκτυα βραχείας κάλυψης. Όπως είναι αναμενόμενο, οι OM3, OM4, OM5 ίνες βρίσκουν εφαρμογή σε δίκτυα μεγαλύτερης εμβέλειας ή/και μεγαλύτερων απαιτήσεων από πλευράς μετάδοσης δεδομένων με υψηλότερες ταχύτητες, πχ κέντρα δεδομένων, και δίκτυα μεγάλων εταιρειών.

Άλλη εναλλακτική για μικρά δίκτυα είναι η χρήση πλαστικών πολύτροπων οπτικών ινών με βηματικό ή βαθμιαίο προφίλ δείκτη διάθλασης. Οι πλαστικές οπτικές ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης με μεγάλο πυρήνα (Large Core Step-Index Plastic Optical Fibers – SI-POFs) κατασκευάζονται από το πολυμερές υλικό PMMA. Οι SI-POFs μεγάλης διαμέτρου έχουν πυρήνα 980 nm, η συνολική διάμετρος της ίνας μαζί με το μανδύα είναι 1000 μm, το υλικό του πυρήνα είναι PMMA, το υλικό του μανδύα είναι τύπου fluorinated polymer και το αριθμητικό άνοιγμα είναι ίσο με 0.5. Παρά το ότι τα εμπορικά μοντέλα SI-POFs έχουν γενικά μεγάλες διαστάσεις, ο χειρισμός τους είναι ευκολότερος, αλλά ως

* Υπάρχει και το 40GBASE-eSR4 (με 10 Gbit/s ανά ίνα) που προβλέπει επέκταση των αποστάσεων σε σχέση με αυτές που περιλαμβάνει ο Πίνακας 2.1 [28].

† Υπάρχει και το 100GBASE-eSR4 (με 25 Gbit/s ανά ίνα) που προβλέπει επέκταση των αποστάσεων σε σχέση με αυτές που περιλαμβάνει ο Πίνακας 2.1 [28].

πολύτροπες ίνες, σίγουρα περιορίζουν την απόσταση κάλυψης λόγω διασποράς των τρόπων. Σε μία μέση τιμή που συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία, το ηλεκτρικό εύρος ζώνης τέτοιων ινών βρίσκεται κοντά σε μία τιμή 50 MHz στα 100 μέτρα ($50 \text{ MHz} \times 100 \text{ m}$) [31]. Ταυτόχρονα, ίνες κατασκευασμένες από αυτό το πολυμερές παρουσιάζουν υψηλές απώλειες λόγω περιορισμών του ίδιου του υλικού [32]. Ο συντελεστής απωλειών κατά μέσο όρο είναι περίπου 0.165 dB/m [31]. Μία άμεση εναλλακτική λύση του περιορισμένου εύρους ζώνης είναι η χρήση GI-POF βασισμένη σε υλικό PMMA (PMMA-based). Βέβαια, δεν πρόκειται για καθαρό PMMA, αλλά για πολυμερές μεταβλητής σύνθεσης σε ακτινική διεύθυνση στον πυρήνα της ίνας για την ανάπτυξη του GI προφίλ του δείκτη διάθλασης. Βασικό συστατικό είναι το υλικό Methyl Methacrylate (MMA) πριν τη διαδικασία δημιουργίας του προφίλ του δείκτη διάθλασης (γνωστή ως co-polymerization). Σε μία τέτοια περίπτωση, συνήθως η ίνα έχει διάμετρο και πάλι 1 mm, ενώ ο πυρήνας έχει διάμετρο 900 μm . Οι απώλειες σ' αυτές τις ίνες είναι οριακά μεγαλύτερες από ότι στην περίπτωση των SI-POFs στα 650 nm. Ωστόσο, για το εύρος ζώνης έχει βρεθεί πειραματικά μία ελάχιστη τιμή $750 \text{ MHz} \times 100 \text{ m}$ [33] και μία ενδεικτική τιμή $1500 \text{ MHz} \times 100 \text{ m}$ [31] η οποία μπορεί να ξεπεραστεί ανάλογα με το μοντέλο ίνας [34]. Ενδιάμεση λύση είναι οι ίνες πολλαπλών πυρήνων βηματικού δείκτη διάθλασης και μικρής διαμέτρου, ώστε τελικά να προκύπτει μία ίνα διαμέτρου 1 mm. Το υλικό καθενός πυρήνα είναι επίσης PMMA και ο μανδύας που περιέχει όλους τους πυρήνες αποτελείται από το ίδιο υλικό με τις τυπικές SI-POFs. Ενδεικτικά, POF 19 πυρήνων με βηματικό δείκτη διάθλασης για καθένα πυρήνα παρουσιάζει συντελεστή απωλειών 0.18 dB/km στα 650 nm. Το κέρδος από την εγκατάσταση τέτοιων ινών είναι η δυνατότητα αντιμετώπισης πολλών λυγισμάτων των καλωδίων χωρίς σημαντικές απώλειες. Το εύρος ζώνης είναι τουλάχιστον διπλάσιο αυτών των τυπικών SI-POFs [35], ενώ από μετρήσεις έχουν αναφερθεί τιμές λίγο πάνω από 350 MHz στα 50 μέτρα [36]. Ο Πίνακας 2.2 περιέχει συγκεντρωμένες τις τιμές και τα χαρακτηριστικά των πλαστικών ινών που αναφέρθηκαν, μαζί με κάποια ενδεικτικά κόστη που αντιστοιχούν σε αγορά 50 μέτρων καλωδίου (και όχι γυμνής ίνας) χωρίς τερματισμούς στα άκρα, με αναγωγή σε ευρώ ανά μέτρο ίνας.

Το πρόβλημα των υψηλών απωλειών του PMMA στις συμβατικές μπάντες του υπερύθρου έχει αντιμετωπιστεί από νεότερα πολυμερή υλικά, όπως το perfluorinated polymer (polyperfluoro-butenylvinyl ether) γνωστό ως CYTOP, υλικό για το οποίο οι απώλειες πλησιάζουν θεωρητικά τα 0.01 dB/m στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου [32]. Οι Perfluorinated Polymer ίνες (PF) συνήθως κατασκευάζονται με βαθμιαίο δείκτη διάθλασης (Graded-Index Plastic Optical Fibers – GI-POFs) κατάλληλο ντοπάρισμα του CYTOP που προορίζεται για τον πυρήνα. Σε τέτοιες ίνες ο συντελεστής απωλειών παρουσιάζει τιμή μικρότερη από 0.10 dB/m στα 850 nm και στα 1310 nm. Αυτές οι ίνες μπορούν να αποτελέσουν ανταγωνιστική εναλλακτική των τυπικών πολυτρόπων οπτικών ινών από γυαλί με GI προφίλ του δείκτη διάθλασης. Αυτό συμβαίνει επειδή από τη μία, η κάλυψη αρκετών δεκάδων μέτρων χρησιμοποιώντας ένα μήκος κύματος για μεταδόσεις δεδομένων σε ρυθμό της τάξης των 10 Gbit/s γίνεται δυνατή αξιοποιώντας μπάντες συμβατικών μηκών κύματος που ενδείκνυνται για τηλεπικοινωνίες χωρίς αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς. Από την άλλη, αξιοποιείται η ευελιξία στο χειρισμό των συνδέσεων μεταξύ ινών ή μεταξύ ινών και πομποδεκτών, σε σχέση με την περίπτωση των γυάλινων ινών όπου ο χειρισμός είναι δυσκολότερος με αυξημένη πολυπλοκότητα στη συγκόλληση συνδετήρων πάνω στις ίνες. Ενδεικτικά, με διάμετρο πυρήνα 50 μm , 62.5 μm και 120 μm υπάρχουν διαθέσιμα μοντέλα perfluorinated GI-POFs από την Chromis Fiberoptics με απώλειες κάτω από 0.06 dB/m στα 850 nm και στα 1310 nm και αριθμητικό άνοιγμα 0.185 [37]. Και για τις τρεις περιπτώσεις, η διάμετρος του μανδύα (μαζί με τον πυρήνα) είναι 490 μm , ενώ διατίθεται και μοντέλο με διάμετρο πυρήνα ίση με 62.5 μm και διάμετρο μανδύα 750 μm . Εκτός από τις συμβατικές δομές πλαστικών ινών, έχουν αναπτυχθεί και άλλες, όπως οι

microstructured POFs [32]. Δε θα επεκταθούμε περισσότερο στις perfluorinated GI-POFs και στις microstructured POFs, καθώς ο στόχος είναι η μελέτη ζεύξεων και δικτύων βραχείας εμβέλειας. Επομένως, θα επικεντρωθούμε στις απλές στην κατασκευή και με μεγάλη διάμετρο πυρήνα SI-POFs. Επικουρικά, Ο Πίνακας 2.2 περιλαμβάνει τις τιμές των χαρακτηριστικά και των GI-POFs μαζί με ενδεικτικά κόστη.

Πίνακας 2.2. Χαρακτηριστικά πλαστικών ινών βηματικού και βαθμιαίου διάθλασης. OFL: Overfilled Launching, UFL: Underfilled Launching.

Χαρακτηριστικά ίνας	Large Core PMMA SI-POF ([31], [37])	PMMA-based GI-POF ([31], [34])	19-Core PMMA SI-POF ([35], [38])	50 μm PF GI-POF ([37])	62.5 μm PF GI-POF ([37])	120 μm PF GI-POF ([37], [39])
Προφίλ δείκτη διάθλασης	SI	GI	SI ανά πυρήνα (19 πυρήνες)	GI	GI	GI
Υλικό πυρήνα	PMMA	PMMA-based (βασικό συστατικό είναι το MMA πριν τη διαδικασία δημιουργίας του προφίλ του δείκτη διάθλασης)	PMMA	CYTOP + dopant	CYTOP + dopant	CYTOP + dopant
Υλικό μανδύα	Fluorinated Polymer	Δεν πρόκειται για ξεχωριστό στρώμα γύρω από τον πυρήνα, αλλά προκύπτει κατά τη διαδικασία δημιουργίας του πυρήνα και δεν είναι δυνατό να διαχωριστεί από τον πυρήνα	Fluorinated Polymer	CYTOP	CYTOP	CYTOP
Υλικό περιβλήματος	Polyethylene, PVC	Polyethylene, PVC	Polyethylene	Υπάρχουν τρία στρώματα από περιβλήματα	Υπάρχουν τρία στρώματα από περιβλήματα	Υπάρχουν τρία στρώματα από περιβλήματα
Διάμετρος πυρήνα	980 μm	900 μm	980 μm	50 μm	62.5 μm	120 μm
Διάμετρος μανδύα (μαζί με τον πυρήνα)	1000 μm	1000 μm	1000 μm	490 μm	490 μm	490 μm
Διάμετρος καλωδίου	2.20 mm	2.20 mm	2.20 mm	2.90 mm	2.90 mm	2.90 mm
Αριθμητικό άνοιγμα	0.46 – 0.5	0.35	0.5	0.185	0.185	0.185
Τυπική εξασθένιση	~0.165 dB/m (στα 650 nm)	< 0.2 dB/m (στα 650 nm)	0.18 dB/m (στα 650 nm)	≤ 0.060 dB/m (στα 850 nm και στα 1300 nm)	≤ 0.060 dB/m (στα 850 nm και στα 1300 nm)	≤ 0.060 dB/m (στα 850 nm και στα 1300 nm)
Εύρος ζώνης × Απόσταση	50 MHz × 100 m στα 650 nm	~1500 MHz × 100 m στα 650 nm	> 100 MHz × 100 m στα 650 nm	> 3000 MHz × 100 m στα 850 nm (OFL) > 10000 MHz × 100 m στα 850 nm (UFL)	> 3000 MHz × 100 m στα 850 nm (OFL) > 10000 MHz × 100 m στα 850 nm (UFL)	> 3000 MHz × 100 m στα 850 nm (OFL) > 10000 MHz × 100 m στα 850 nm (UFL)
Περιοχές μηκών κύματος λειτουργίας	Μήκη κύματος στο ορατό φως	Μήκη κύματος στο ορατό φως	Μήκη κύματος στο ορατό φως	Εγγύς υπέρυθρο (850 nm, 1300 nm)	Εγγύς υπέρυθρο (850 nm, 1300 nm)	Εγγύς υπέρυθρο (850 nm, 1300 nm)
Κόστος ανά μέτρο για αγορά 50 m καλωδίου ίνας	< 0.65 €/m	< 1.30 €/m	< 1.80 €/m	< 2.40 €/m	< 2.00 €/m	< 3.65 €/m

Παρά τους σοβαρούς περιορισμούς που εισάγουν οι SI-POFs, όπως μπορεί να φανεί στον προηγούμενο πίνακα, υπάρχει ενδιαφέρον για την αξιοποίησή τους για μετάδοση δεδομένων σε αποστάσεις λίγων δεκάδων μέτρων με δυνατότητα να επιτευχθούν ρυθμοί λίγο πάνω από 1 Gbit/s μέχρι την απόσταση των 100 μέτρων. Ένα σημείο εκκίνησης που αποτελεί και ένα σημαντικό λόγο που ενισχύει την ανάγκη εστίασης στις μεγάλες SI-POFs είναι το χαμηλότερο κόστος του τελικού καλωδίου. Τονίζεται ότι ο Πίνακας 2.1 περιλαμβάνει κόστη που αφορούν γυμνές γυάλινες ίνες και όχι σε μορφή καλωδίου (εκτός από την τελευταία στήλη). Το κόστος του καλωδίου είναι μεγαλύτερο από αυτό της γυμνής ίνας. Ο Πίνακας 2.2 περιλαμβάνει κόστη για αγορά καλωδίων χωρίς τερματισμό μήκους 50 μέτρων με αναγωγή σε ευρώ ανά μέτρο. Σ' αυτή την περίπτωση, τα καλώδια είναι έτοιμα προς χρήση με πρόσθετο/α προστατευτικό/ά περίβλημα/περιβλήματα. Το χαμηλό κόστος των PMMA SI-POF ινών τις κάνει δελεαστικές επιλογές για μικρά δίκτυα. Εννοείται ότι υπάρχουν περισσότερα μοντέλα ανά κατηγορία ινών με ελαφρώς διαφορετικά χαρακτηριστικά που μπορεί να επηρεάσουν τις δυνατότητες της εκάστοτε ίνας, αλλά και την τιμή της. Πχ SI-POF με μειωμένο αριθμητικό άνοιγμα του ίδιου κατασκευαστή υποστηρίζει λιγότερους τρόπους και μεγαλύτερο εύρος ζώνης, αλλά κοστίζει περισσότερο. Παραμένοντας στις SI-POFs

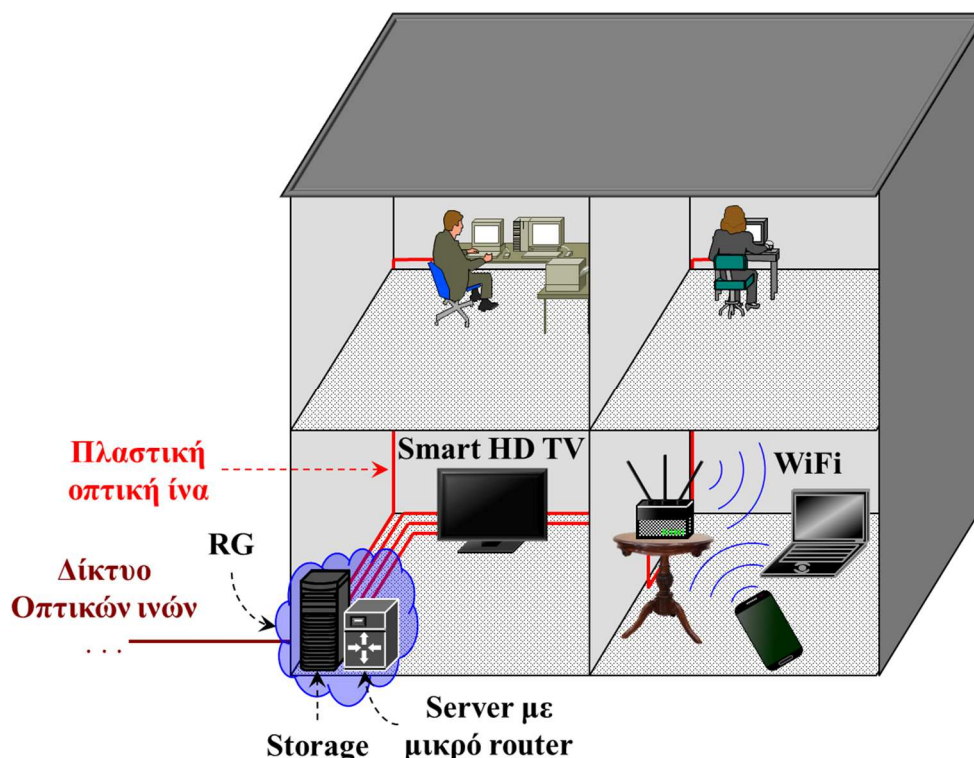
μεγάλου πυρήνα από PMMA υλικό με αριθμητικό άνοιγμα κοντά στο 0.5, γίνεται έκδηλο ότι αποτελεί μία προσιτή λύση ακόμα και με τα τωρινά δεδομένα, όσον αφορά την τιμή του καλωδίου κι ας μην έχει ωριμάσει η σχετική αγορά. Αυτό αξίζει να αναλυθεί σύντομα συγκρίνοντας με την ανταγωνιστική χάλκινη λύση. Οι SI-POFs παρά το ότι υπό προϋποθέσεις μπορεί να έχουν υποδεέστερα χαρακτηριστικά από αυτά κάποιων κατηγοριών καλωδίων UTP, από τη στιγμή που οι SI-POFs κατασκευάζονται από πλαστικό υλικό, οι πλαστικές οπτικές ίνες έχουν μικρότερο κόστος σε σύγκριση με τις τυπικές οπτικές ίνες από διοξειδίο του πυριτίου, όπως επιβεβαιώθηκε από τους προηγούμενους πίνακες, και σίγουρα ανταγωνιστικό κόστος με τα συνεστραμμένα ζεύγη από χαλκό [40]. Ωστόσο, είναι αναμενόμενη μία πτώση τιμών του καλωδίου των SI-POFs, ενώ η τιμή του χαλκού αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια λόγω της μείωσης των αποθεμάτων χαλκού [9].

Καλύπτοντας την απαίτηση για εύκολο χειρισμό και έχοντας προσιτό κόστος, οι SI-POFs θέτουν υποψηφιότητα για τη χρήση σε δίκτυα εσωτερικών χώρων, αλλά με ένα σοβαρό περιορισμό στο εύρος ζώνης. Ωστόσο, ένα ακόμα σημείο που ισχυροποιεί την υποψηφιότητα και αυτών των ινών σε εγκαταστάσεις δικτύων εντός του σπιτιού ή σε ένα εσωτερικό χώρο μικρού μεγέθους είναι ότι η υλοποίηση των ζεύξεων σε μία μορφή σημείου-προς-σημείο (Point-to-Point – PtP) εκτός από ιδιαίτερα απλή είναι και οικονομικά προσιτή. Μία τέτοια τοπολογία αποτελούμενη από πλαστικές οπτικές ίνες, αποδεικνύεται ότι μειώνει το κόστος εγκατάστασης του δικτύου (CapEx – capital expenditures), ενώ διατηρούνται σε αποδεκτά επίπεδα τα λειτουργικά έξοδα (OpEx – operational expenditures) που συνδέονται με τις ανάγκες σε τροφοδοσία και σε συντήρηση των διατάξεων, καθώς η ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου απομονώνεται στα άκρα των ζεύξεων όπου υπάρχουν πομποδέκτες [9]. Η υλοποίηση με πλαστικές οπτικές ίνες είναι πιο συμφέρουσα σε σχέση με τον «ηλεκτρικό» ανταγωνιστή (καλώδιο Ethernet), αλλά και σε σχέση και με τις υπόλοιπες εκδοχές ινών διοξειδίου πυριτίου [9]. Μένοντας στη σύγκριση με τα χάλκινα καλώδια, το βάρος και το μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος (OpEx) σε βάθος χρόνου των δεύτερων [9] θα δώσει ώθηση στις SI-POFs ώστε να εφαρμοσθούν σε μεγάλη κλίμακα σε δίκτυα εντός σπιτιού και σε εσωτερικούς χώρους.

Το μειωμένο κόστος για τις πλαστικές ίνες σε σχέση με τις άλλες επιλογές καλωδίωσης δεν βρίσκεται μόνο στο τμήμα της ίδιας καλωδίωσης, αλλά και στο τμήμα των συνδετήρων και της αξιοποίησης του χώρου όσον αφορά τη σύγκριση με τα καλώδια Ethernet και στο τμήμα των συνδετήρων και των πομποδεκτών όσον αφορά τη σύγκριση με τις γυάλινες ίνες (διοξειδίου πυριτίου). Εννοείται ότι μέσα στον εσωτερικό χώρο ή στο οικιακό δίκτυο υπάρχει ένα κεντρικό σημείο το οποίο έχει ρόλο πύλης (Residential Gateway – RG) με το εξωτερικό δίκτυο πρόσβασης. Αυτή η πύλη πρέπει να μεταφράσει IP διευθύνσεις και σχήματα διαμόρφωσης για λόγους συμβατότητας με τις διατάξεις εντός του οικιακού δικτύου. Επιπλέον, σε μία λογική PtP συνδέσεων, τέτοιες διατάξεις μπορούν να υποστηρίξουν πρόσθετες λειτουργίες, όπως της «διαμεσολάβησης» για την επικοινωνία διαφόρων διατάξεων εντός του οικιακού δικτύου ή ακόμα και για την τοπική αποθήκευση δεδομένων (file server), ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση αυτών από διατάξεις σε διάφορα σημεία του σπιτιού. Από την περιγραφή γίνεται προφανές ότι η πύλη θα εκτελεί ένα πλήθος λειτουργιών στο ηλεκτρικό επίπεδο, ενώ θα έχει διεπαφές με το εξωτερικό οπτικό δίκτυο πρόσβασης, αλλά και με το εσωτερικό οπτικό δίκτυο. Μία ενδεικτική απεικόνιση δίνεται στο Σχήμα 2.2. Σε ένα τέτοιο δίκτυο δε θα χρειαστούν πρόσθετες παθητικές διατάξεις, πχ διαχωριστές (splitters). Αυτό κάνει τη σύγκριση των ινών δίκαιη χωρίς να μπαίνουν πρόσθετοι παράγοντες, όπως διατάξεις που δεν έχουν βελτιστοποιηθεί ως προς τις πρόσθετες απώλειες που μπορεί να εισάγουν, όπως είναι οι διαχωριστές πλαστικών ινών οι οποίοι, ωστόσο, είναι

* Στη μελέτη θεωρήθηκε εξοπλισμός Fast Ethernet (100 Mbit/s) βάσει δεδομένων του 2010.

εμπορικά διαθέσιμοι. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, οι φθηνότεροι συνδετήρες και η αξιοποίηση του χώρου με τις SI-POFs είναι κρίσιμο κέρδος.



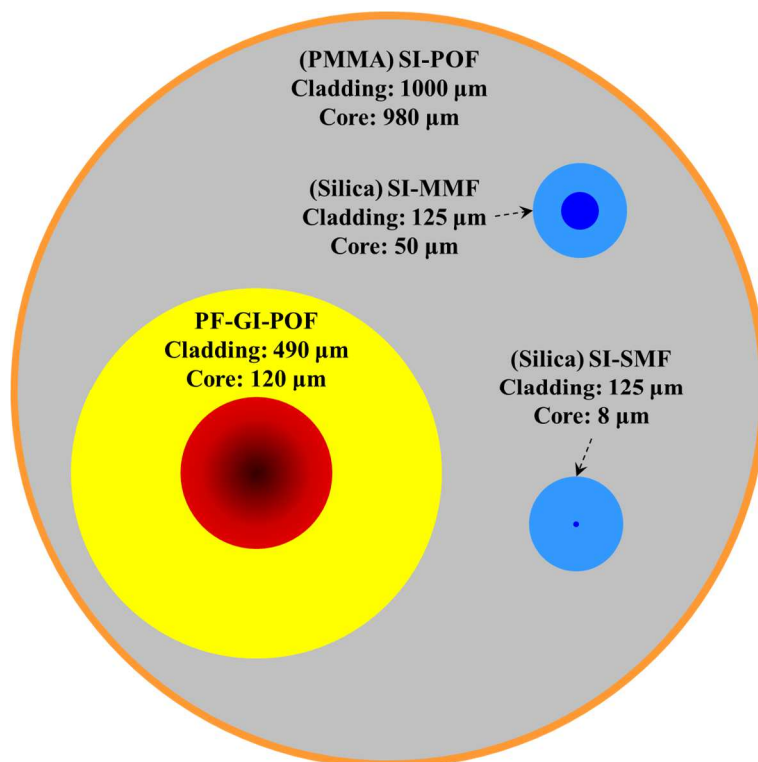
Σχήμα 2.2. Οπτική δικτύωση εντός σπιτιού με χρήση πλαστικών οπτικών ινών.

Καταγράφοντας συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα των SI-POFs με μεγάλο πυρήνα, σε αντίθεση με τις τυπικές οπτικές ίνες, οι πλαστικές οπτικές ίνες δεν απαιτούν κάποια πολύπλοκη εγκατάσταση και είναι εύκολος ο χειρισμός τους λόγω της μεγάλης διάστασης της διαμέτρου της ίνας σε σχέση με τις πολύ μικρές διαστάσεις των μονότροπων ινών (με διάμετρο 8 μm) όπου κακή ευθυγράμμιση κατά τη σύνδεση δύο ινών κάνει πιθανή την σημαντική αύξηση των απωλειών. Στο Σχήμα 2.3, όπου απεικονίζονται σε μεγέθυνση 100 φορές οι διαστάσεις του πυρήνα και του μανδύα των τύπων οπτικών ινών που έχουν ήδη αναφερθεί, είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι υπάρχει ευελιξία στη διαχείριση πιθανής κακής ευθυγράμμισης στη σύνδεση δύο πλαστικών οπτικών ινών με μεγάλο πυρήνα, ενώ διακρίνεται εύκολα και η ανάγκη κατασκευής πολύ καλών συνδετήρων όσο μικραίνουν οι διαστάσεις του πυρήνα, διατηρώντας δύο ίνες σταθερά ευθυγραμμισμένες, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ισχύς σε μία ζεύξη, αυξάνοντας το κόστος στις συνδέσεις για ίνες μικρότερου πυρήνα σε σχέση με αυτές για τους μεγαλύτερους πυρήνες. Αυτό το πλεονέκτημα των πλαστικών οπτικών ινών κάνει ενθαρρυντική την υιοθέτησή τους σε εφαρμογές όπου απαιτούνται φθηνές και απλές λύσεις, όπως σε ένα δίκτυο εντός του σπιτιού. Επιπροσθέτως, ο εξοπλισμός για καθαρισμό ή κοπή ινών είναι συντριπτικά φθηνότερος σε σχέση με τον αντίστοιχο εξοπλισμό για τις τυπικές ίνες διοξειδίου πυριτίου είτε πρόκειται για πολύτροπες είτε για μονότροπες ίνες. Οι συνδετήρες είναι επίσης απλοί και φθηνοί χωρίς να υπάρχει η ανάγκη πρόσθετης προστασίας στη σύνδεση αρκεί να έχει γίνει σχετικά προσεκτική λείανση μετά από κοπή ενός τμήματος ίνας. Σε σύγκριση με τα συνεστραμμένα ζεύγη χαλκού, οι πλαστικές οπτικές ίνες μπορούν να εγκατασταθούν ευκολότερα εξαιτίας της μειωμένης διαμέτρου σε σχέση με τις μεγαλύτερες διαστάσεις των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών, κερδίζοντας ταυτόχρονα χώρο. Δηλαδή το μεγάλο μέγεθος της ακτίνας των πλαστικών οπτικών ινών (το οποίο σε σχέση με την ακτίνα των μονότροπων ινών γίνεται μειονέκτημα όσον αφορά το πλήθος των υποστηριζόμενων τρόπων και έμμεσα τη μείωση του εύρους ζώνης) αποτελεί πλεονέκτημα για απλές εγκαταστάσεις. Οι πηγές και οι δέκτες είναι σε σχετικά ώριμο

επίπεδο, αλλά με μικρότερο κόστος σε σχέση με τις τυπικές πηγές στα 1550 nm και στα 1310 nm. Επιπλέον, ένα γενικότερο κέρδος από τη χρήση της οπτικής τεχνολογίας, άρα και από τη χρήση των πλαστικών οπτικών ινών, έχει να κάνει με την ανυπαρξία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών κατά τη διάδοση των σημάτων. Αυτή η ιδιότητα είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά και σε δίκτυα εντός σπιτιού όπου σωληνώσεις (ducts) που φέρουν καλώδια μπορούν να αξιοποιηθούν όχι μόνο για το πέρασμα ινών, αλλά και για ταυτόχρονο πέρασμα καλωδίων παροχής ηλεκτρικής ισχύος. Από τα καλώδια των οπτικών ινών δεν προκύπτουν βραχυκυκλώματα, κάνοντάς τις ασφαλείς και για άπειρους χρήστες. Ταυτόχρονα, δεν απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την εγκατάστασή τους, μειώνοντας περαιτέρω το κόστος εγκατάστασης για ένα άπειρο χρήστη. Υπάρχει ακόμα και η δυνατότητα σύνδεσης πομπού ή δέκτη με γυμνή ίνα [41]. Πιθανή εμφάνιση σκόνης ή κάποια γρατζουνιά στα άκρα της ίνας δε θα προκαλέσει σημαντική επίδραση παρά μόνο μία μικρή αύξηση των απωλειών. Τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν κάνουν τις πλαστικές οπτικές ίνες ελκυστικές για κάποιες εφαρμογές. Έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση διατάξεων σε αυτοκίνητα και σε βιομηχανικές δομές (βιομηχανικός έλεγχος), ενώ σίγουρα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εκτεταμένα σε μεσοπρόθεσμη βάση [9] και στη κάλυψη μικρών αποστάσεων για τη δικτύωση εντός των σπιτιών ή μικρών χώρων, θέτοντας τις βάσεις για τη θεώρηση ενός νέου δικτυακού τμήματος όπου θα έχει εγκατασταθεί οπτική ίνα, ανεξάρτητα από το υλικό κατασκευής, με την ονομασία Fiber-In-The-Home (FiTH) [42]. Η προτυποποίηση των απαιτήσεων των χαρακτηριστικών των POFs και των απαιτήσεων των πηγών και δεκτών για Gigabit μετάδοση με χρήση POF έχει ήδη ολοκληρωθεί από τηλεπικοινωνιακούς φορείς [42]^{*} προβλέποντας αποστάσεις 50 μέτρων. Τέτοια πρότυπα καθορίζουν την τάση υιοθέτησης της τεχνολογίας των POFs σε όχι ιδιαίτερα μεγάλο βάθος χρόνου, ενισχύοντας την πρόβλεψη για μεσοπρόθεσμη εγκατάσταση και χρήση των POFs προς κάλυψη μικρών αποστάσεων σε δίκτυα όπως εντός ενός σπιτιού. Σε δίκτυα τέτοιας έκτασης και απαιτήσεων, η εγκατάσταση είναι λιγότερο ελεγχόμενη από ότι στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό το γεγονός μπορεί να αποτελέσει αιτία μικρής αύξησης της εξασθένησης λόγω κάποιου/ων λυγίσματος/λυγισμάτων ή κακής σύνδεσης. Όσον αφορά το εύρος ζώνης, δυνατότητες αντιμετώπισης της περιορισμένης τιμής, χωρίς κατ' ανάγκη να αντικαθίσταται η ίνα από

^{*} Η κλάση A4a.2 του πρότυπου 60793-2-40 της επιτροπής International Electrotechnical Commission (IEC) προδιαγράφει τα χαρακτηριστικά των SI-POFs που πρέπει να πληρούνται ώστε να μπορούν οι SI-POFs να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνίες. Αυτή η κλάση του προτύπου αφορά σε γενικές γραμμές τις ονομαστικές τιμές παραμέτρων που περιλαμβάνει ο Πίνακας 2.2 στη δεύτερη στήλη του. Ο φορέας European Telecommunications Standards Institute (ETSI) εξέδωσε το πρότυπο TS 105 175-1 V2.0.0 που προδιαγράφει συστήματα μεταδόσεων σε ρυθμούς 100 Mbit/s και 1 Gbit/s με POFs, ώστε να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ κατασκευαστών. Πιο συγκεκριμένα, στο συγκεκριμένο πρότυπο διευκρινίζονται θέματα που αφορούν το φυσικό επίπεδο (ρυθμοί σφαλμάτων bits, ανεκτές καθυστερήσεις, θερμοκρασία λειτουργίας, προστασία των ματιών κα), τις λειτουργίες ανώτερων επιπέδων (πρωτόκολλα, ποιότητα υπηρεσίας (Quality-of-Service – QoS) κα), την ενεργειακή αποδοτικότητα και τις διεπαφές στην εγκατάσταση. Για ρυθμό 1 Gbit/s (1.25 Gbit/s στο φυσικό επίπεδο) προβλέπεται απόσταση μέχρι 50 μέτρα. Στο πρότυπο της International Telecommunication Union (ITU) ITU-T Recommendation G.9960 (G.hn) προδιαγράφεται μία αρχιτεκτονική φυσικού επιπέδου για την ενσύρματη δικτύωση πομποδεκτών που μπορούν να λειτουργήσουν εντός κτιρίων. Η επιλογή της τυπικής SI-POF έχει ενσωματωθεί στο πρότυπο με χρήση LED με κεντρικό μήκος κύματος στην περιοχή μεταξύ 640 και 660 nm στην εκπομπή και εφαρμογή σχήματος διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Multiplexing). Με 200 MHz εύρος ζώνης ο υποστηριζόμενος ρυθμός μπορεί να ξεπεράσει το 1 Gbit/s μαζί με την πλεονάζουσα πληροφορία λόγω της κωδικοποίησης καναλιού που θα εφαρμοσθεί. Επιπλέον, η μετάδοση κίνησης Gigabit Ethernet με χρήση SI-POF έχει ενσωματωθεί στο πρότυπο 802.3bn όπου προβλέπεται εφαρμογή 16-PAM, ρυθμός συμβόλων 325 Mbaud και χρήση LED γύρω από τα 650 nm ως πηγή για τη διαμόρφωση και τη μετάδοση. Σύμφωνα με το πρότυπο η ελάχιστη απόσταση κάλυψης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες της ίνας που θα χρησιμοποιηθεί. Η διπλής κατεύθυνσης (full-duplex) λειτουργία υποστηρίζεται με χρήση δύο ινών, μία για την καθεμία κατεύθυνση.

άλλη με GI προφίλ του δείκτη διάθλασης του, θα εξεταστούν σε επόμενη ενότητα του κεφαλαίου. Προηγουμένως, θα περιγραφούν με διάφορες περιπτώσεις-εφαρμογές όπου είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ή χρησιμοποιούνται ήδη SI-POFs μεγάλου πυρήνα.



Σχήμα 2.3. Απεικόνιση με αναλογία μεγεθών της διατομής πλαστικών ινών και ινών διοξειδίου του πυριτίου.

Στο εξής, όπου αναφέρονται οι SI-POFs θα εννοείται η περίπτωση πλαστικών ινών μεγάλου πυρήνα (980 nm) με βηματικό δείκτη διάθλασης από PMMA υλικό. Αν θεωρηθεί άλλη περίπτωση πλαστικής ίνας, θα αναφέρεται ρητά.

2.1.1 Πεδία όπου υπάρχει ενδιαφέρον χρήσης ή χρησιμοποιούνται ήδη POFs

Ως αυτή τη στιγμή οι πλαστικές οπτικές ίνες έχουν χρησιμοποιηθεί για μεταδόσεις δεδομένων, αλλά με σχετικά χαμηλούς ρυθμούς και σε μικρές αποστάσεις ανταποκρινόμενες στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Η προδιαγραφή Media Oriented Systems Transport (MOST) προώθησε την χρήση των πλαστικών οπτικών ινών στη αυτοκινητοβιομηχανία [43]. Η προδιαγραφή MOST έχει υιοθετηθεί από πολλούς κατασκευαστές οχημάτων και αποτελεί το βασικό πρότυπο για τη δικτύωση για μετάδοση πολυμέσων και δεδομένων στη συγκεκριμένη βιομηχανία. Παραδείγματα κατασκευαστών είναι οι Audi, BMW, General Motors, Hyundai, Jaguar, Lancia, Land Rover, Mercedes-Benz, Porsche, Toyota, Volkswagen, SAAB, SKODA, SEAT, Volvo [44]. Η αναισθησία στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, το μικρότερο βάρος σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια και η προστασία ενάντια σε βραχυκυκλώματα αποτέλεσαν τα βασικά σημεία στην ανάπτυξη του MOST. Η προδιαγραφή MOST υποστηρίζει τη χρήση SI-POFs για ταχύτητες μέχρι 150 Mbit/s με τα μήκη των ζεύξεων να περιορίζονται στα 15 μέτρα σε εφαρμογές αυτού του τύπου. Σαν οπτικές πηγές χρησιμοποιούνται οι LEDs στα 650 nm, ένα μήκος κύματος για το οποίο οι απώλειες ανά μονάδα μήκους για τυπικές SI-POFs είναι γύρω στα 0.16 dB/km όπως ήδη αναφέρθηκε. Η προοπτική είναι να χρησιμοποιηθούν πηγές laser που υποστηρίζουν υψηλότερο εύρος ζώνης σε σχέση με τις LEDs, αλλά με απαραίτητο έλεγχο της θερμοκρασίας. Τα επίπεδα ισχύος εκπομπής περιορίζονται μεταξύ των τιμών -8.5 dBm και -1.5 dBm για να είναι δυνατή η ανάκτηση των δεδομένων και για να μη μπει σε καθεστώς κόρου ο δέκτης. Κατά τη λήψη, τα όρια ισχύος είναι -22 dBm ως -2 dBm. Οι φωτοφωρατές είναι φωτοδίοδοι pin

από πυρίτιο που αποκρίνονται επαρκώς στο ορατό φάσμα. Η βασική δομή περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός λογικού δακτυλίου με κόμβους σε συγχρονισμό μέσω διαμοιρασμού ρολογιού χωρίς να είναι υποχρεωτική η εφαρμογή φυσικού δακτυλίου. Ένας κόμβος αναλαμβάνει τον επιβαρυσμένο ρόλο ως Timing Master, που συνήθως είναι η κεντρική μονάδα του συστήματος μετάδοσης δεδομένων και πολυμέσων, και παράγει το ρολόι του συστήματος. Όταν ο κεντρικός αυτός κόμβος λάβει το πλαίσιο που έχει μεταδώσει μετά την κυκλοφορία στο δακτύλιο, μεταδίδεται το νέο πλαίσιο στο δακτύλιο. Σε φυσικό επίπεδο, η δομή του MOST δικτύου μπορεί να περιλαμβάνει ένα συνδυασμό δακτυλίου και αστέρα, ενώ με ενσωμάτωση διπλού δακτυλίου προσφέρεται προστασία σε περίπτωση κάποιας αστοχίας, σφάλματος ή καταστροφής. Η προδιαγραφή MOST περιλαμβάνει και μετάδοση με χρήση ομοαξονικού καλωδίου στο φυσικό επίπεδο, αλλά με την πλαστική οπτική ίνα είναι δυνατή η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της οπτικής μετάδοσης με ένα φθηνό σύστημα. Οι προδιαγραφές του MOST προβλέπουν συμβατότητα με τα πρωτόκολλα του Ethernet. Για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης θα απαιτηθούν αλλαγές στις οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται, πχ Polymer Clad Silica Core ίνες, δηλαδή ίνες με πυρήνες πυριτίου και μανδύας από πολυμερές υλικό, με διάμετρο πυρήνα 200 μm ή GI-POF, και χρήση πηγών laser. Άλλη λύση θα ήταν η χρήση άλλου φασματικά αποδοτικότερου σχήματος διαμόρφωσης σε σχέση με την διαμόρφωση On-Off Keying που χρησιμοποιείται στο MOST.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, εκτός από την αυτοκινητοβιομηχανία, έχουν αναπτυχθεί βιομηχανικά πρότυπα όπως τα PROFIBUS, SERCOS και InTERBUS-S που προβλέπουν τη χρήση πλαστικής οπτικής ίνας για το τμήμα της επικοινωνίας σε εφαρμογές αυτόματου ελέγχου σε βιομηχανικά περιβάλλοντα [45] με μεταδόσεις μερικών δεκάδων μέτρων σε χαμηλούς ρυθμούς. Ταυτόχρονα, οι SI-POFs μπορούν να βρουν εφαρμογή στην επικοινωνία δεδομένων σε ρομπότ και πάλι λόγω της αναισθησίας σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και την αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις. Αυτό μπορεί να γίνει σαφέστερο με ένα παράδειγμα. Μία SI-POF με δυνατότητα μετατόπισης/λυσίματος εγκατεστημένη σε βραχίονα ενός ρομπότ εργοστασιακής υποδομής έχει εξεταστεί επιτυχώς στη μετάδοση δεδομένων σε πειραματικό επίπεδο. Η έξοδος ενός αισθητήρα τροφοδοτήθηκε σε μία πηγή LED και η ίνα χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση των δεδομένων [46]. Οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί σε αυτά τα πρότυπα είναι χαμηλοί και για ζεύξεις μήκους δεκάδων μέτρων. Στη λογική του δικτύου σε «εμβέλεια εργοστασίου» (factory area network), SI-POFs έχουν χρησιμοποιηθεί για μεταδόσεις σε ρυθμούς 100 Mbit/s δημιουργώντας ένα φθηνό σύστημα. Ωστόσο, οι απαιτήσεις αλλάζουν και οι ρυθμοί αυξάνονται ακόμα και σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Αυτό σημαίνει ότι σε λύσεις όπου υιοθετούνται οι POFs πρέπει να υποστηρίζονται ρυθμοί πάνω από 1 Gbit/s. Μία λύση είναι η ενσωμάτωση εξίσωσης στο τμήμα της λήψης ώστε να αντισταθμιστεί η περιορισμένου εύρους ζώνης απόκριση συχνότητας και να αντιμετωπιστεί η απαίτηση για την αύξηση του ρυθμού. Έχει προταθεί η χρήση γραμμικού εξισωτή συνεχούς χρόνου (continuous-time linear equalizer) με κατανάλωση 2.7 mW, για μετάδοση σε ρυθμό μέχρι 2 Gbit/s σε απόσταση 50 μέτρων μέσω SI-POF [45]. Ταυτόχρονα, είναι επιθυμητή η μείωση των transistors του εξισωτή για να μειωθεί και η κατανάλωση ισχύος. Φαίνεται ότι είναι βάσιμη η δυνατότητα χρήσης των SI-POFs σε περιβάλλοντα με ειδικές συνθήκες και σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένου ότι προβλέπεται η υποστήριξή τους από σύγχρονα βιομηχανικά πρότυπα.

Μένοντας στις σχετικά μικρές αποστάσεις, και πιο συγκεκριμένα μέσα σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή, η διαρκής αύξηση των ταχυτήτων των διασυνδέσεων (interconnects) θα επιβάλλει την ενσωμάτωση οπτικών διαύλων. Οι πλαστικές οπτικές ίνες λόγω της απλότητάς τους θα μπορούσαν να είναι μία εναλλακτική για οπτική κυματοδότηση πάνω σε μητρικές κάρτες. Σε μία τέτοια λογική θα μειώνονταν οι

απώλειες των διασυνδέσεων με δυνατότητα υποστήριξης μεγαλύτερων ρυθμών δεδομένων σε σχέση με τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που υποστηρίζει ο χαλκός. Η οπτική διασύνδεση με χρήση πλαστικών οπτικών ινών μπορεί να επεκταθεί εκτός από κυκλώματα υπολογιστών, σε δρομολογητές, μεταγωγείς, διατάξεις αποθήκευσης ακόμα και για διασυνδέσεις μέσα σε κέντρα δεδομένων (data centers) και διασυνδέσεις μεταξύ racks που συνθέτουν supercomputers [32]. Η αντικατάσταση των πομποδεκτών για μεταδόσεις μέσα από χάλκινα καλώδια από τους αναγκαίους οπτικούς πομποδέκτες για μεταδόσεις με χρήση POFs θα οδηγήσει σε μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας λόγω της μειωμένης αναγκαίας ισχύος για τη λειτουργία των διατάξεων, αλλά και της αναγκαίας ψύξης αυτών.

Τα κρίσιμα χαρακτηριστικά του μικρότερου μεγέθους και βάρους από τα χάλκινα καλώδια, η ανθεκτικότητα σε διαταραχές και δονήσεις και το σχετικά ικανοποιητικό εύρος ζώνης για μικρές αποστάσεις θέτουν τις πλαστικές οπτικές ίνες υποψήφιες για εφαρμογή στο κομμάτι των επικοινωνιών σε αεροσκάφη, πλοία, ελικόπτερα τόσο συμβατικής χρήσης όσο και στην πολεμική βιομηχανία. Ήδη στην πολεμική βιομηχανία υπάρχουν μοντέλα αεροσκαφών με συστήματα για μετάδοση δεδομένων με χρήση οπτικών ινών, οι οποίες είναι κυρίως από γυαλί και όχι από πολυμερές πλαστικό [47]. Σε κάθε περίπτωση, δεν είναι απαγορευτική η υιοθέτηση των πλαστικών οπτικών ινών σε αυτό τον τομέα καθώς υπάρχουν και μοντέλα ινών που είναι ανθεκτικά και στη θερμοκρασία [48], ένα επίσης σημαντικό παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνιών που θα ενσωματωθούν σε αεροσκάφη. Ταυτόχρονα, η απαίτηση λυγισμάτων κατά μήκος των μικρών ζεύξεων σε ένα αεροσκάφος δε θα προκαλέσει σημαντική επιδείνωση των επιδόσεων καθώς έντονα λυγίσματα θα αυξήσουν μεν τις απώλειες αλλά όχι σημαντικά. Βέβαια, πιθανοί περιορισμοί για τις πλαστικές οπτικές ίνες μπορεί να προκύψουν από την εισαγωγή συνδετήρων [49], που μπορεί να αυξήσουν σημαντικά τις απώλειες, κι αυτό υπό συνθήκες.

Η χρήση των πλαστικών οπτικών ινών δεν περιορίζεται μόνο στην μετάδοση δεδομένων, αλλά θα μπορούσε να αξιοποιηθεί και σαν αισθητήρας πιθανών διαταραχών σε τμήματα επιφανειών του αεροσκάφους [50], πχ τάσεις ή δονήσεις κατά την απογείωση. Χρησιμοποιώντας ένα τμήμα ίνας, μία απλή πηγή laser και μία φθινή κάμερα, μηχανικές διαταραχές ή δονήσεις στην περιοχή που είναι τοποθετημένη η ίνα θα προκαλέσουν την αλλαγή της μετρούμενης φωτεινής έντασης στην έξοδο της ίνας. Ταυτόχρονα, το διάγραμμα με το πρότυπο των κηλίδων (speckle pattern) θα μεταβληθεί από την επιβολή κάποιας διαταραχής στην ίνα, λόγω της προσθετικής ή καταστροφικής συμβολής των τρόπων πάνω στην κάμερα μετά τη διάδοσή τους κατά μήκος της ίνας με διαφορετικές ταχύτητες φάσης. Επομένως, δεν είναι ανάγκη να περιοριστεί η χρήση της ίνας μόνο για τη μετάδοση δεδομένων, αλλά πιθανά μειονεκτήματα, όπως η υποστήριξη πολλών τρόπων που μειώνουν το εύρος ζώνης της ίνας σαν τηλεπικοινωνιακό κανάλι, να αξιοποιηθούν από μία λειτουργία της ίνας σαν αισθητήρας.

Πολύ σύντομα, σε γενικές γραμμές, όταν μία πλαστική οπτική ίνα λειτουργεί σαν αισθητήρας, τότε αυτό που εκτιμάται είναι η μεταβολή της μετρούμενης ισχύος σε κάποιο δέκτη με τον οποίο είναι συνδεδεμένη η ίνα η οποία υπόκειται σε κάποια αλλαγή. Για παράδειγμα, αλλαγή του μετρούμενου επιπέδου ισχύος μπορεί να προκύψει από λύγισμα, τέντωμα, αλλαγή θερμοκρασίας της SI-POF. Για παράδειγμα, λύγισμα της ίνας προκαλεί αύξηση των απωλειών. Όπως τονίσθηκε νωρίτερα, το λύγισμα πρέπει να είναι σχετικά έντονο για να δώσει σημαντική αλλαγή των απωλειών. Τυπικές εφαρμογές είναι ο έλεγχος του ρυθμού της αναπνοής ή του ρυθμού με τον οποίο πάλλεται η καρδιά μέσω μέτρησης της μεταβολής των απωλειών από την επιμήκυνση και από την επαναφορά μίας ίνας που έχει τοποθετηθεί κοντά σε μία κρίσιμη επιφάνεια, πχ θώρακας, κοιλιακή χώρα [51], [52]. Σε παρόμοια λογική, η αντοχή

των POFs σε μηχανικές καταπονήσεις μπορεί να αξιοποιηθεί για τον έλεγχο της κατάστασης κάποιων υποδομών. Για παράδειγμα, σε κάποιο τμήμα κτιρίου στο οποίο έχει τοποθετηθεί κατάλληλα πλαστική ίνα, η επέκταση κάποιας ρωγμής θα ήταν δυνατό να ανιχνευθεί μέσω της αύξησης των τάσεων που θα επιβάλλονταν στην POF (τέντωμα αυτής) και αυτό θα μεταφραζόταν σε αύξηση των απωλειών ή πτώση της μετρούμενης ισχύος [53]. Στα προηγούμενα παραδείγματα δεν είναι απαραίτητη η χρήση ίνας με ακτίνα 1 mm. Για την αύξηση της ευαισθησίας των POFs στα λυγίσματα, η λύση είναι η επιβολή κάποιας ατέλειας στην ίνα, η οποία τροποποιεί το καθεστώς της διάδοσης του φωτός στην ίνα σε συνάρτηση της ακτίνας λυγίσματος [54]. Οι δύο συχνότερα εμφανιζόμενες εκδοχές σκόπιμων ατελειών που εφαρμόζονται είναι η δημιουργία αυλακώσεων και το γδάρσιμο της ίνας κατά διαστήματα. Για παράδειγμα, η ίνα γδέρνεται στις περιοχές όπου θα γίνει ο έλεγχος της επίδρασης του λυγίσματος, ενώ η ποσότητα του φωτός που θα φύγει από τις γδαρμένες περιοχές εξαρτάται από το πόσο έχει λυγίσει η ίνα. Όμοια, είναι η συμπεριφορά για την περίπτωση που κοπούν τμήματα της ίνας δημιουργώντας αυλακώσεις κατά μήκος αυτής. Ο έλεγχος των λυγισμάτων μπορεί να εφαρμοσθεί στον έλεγχο του βηματισμού ανθρώπων ή της στάσης της σπονδυλικής στήλης για καθισμένο άτομο πχ σε στάση εργασίας [55]. Ειδικά, για τον έλεγχο του βηματισμού, η μονάδα που περιλαμβάνει την ίνα μπορεί να είναι φορητή από τον άνθρωπο ή ακόμα και ενσωματωμένη σε κάποιο τάπητα. Δομές με γδαρμένα τμήματα POFs έχουν χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της αλλαγής της συγκέντρωσης κάποιας ουσίας ή του δείκτη διάθλασης κάποιου διαλύματος ή ακόμα και για τη μέτρηση της υγρασίας. Πιο συγκεκριμένα, αν το τμήμα της γδαρμένης POF εισαχθεί σε κάποιο διάλυμα, τότε αλλαγή της συγκέντρωσης κάποιας ουσίας του διαλύματος θα αποτυπωθεί σε αλλαγή του δείκτη διάθλασης του διαλύματος και κατ' επέκταση θα προκύψει μεταβολή της κυματοδηγησης στη γδαρμένη περιοχή και αλλαγή του επιπέδου του μετρούμενου σήματος [56]. Εκτός από γδαρμένο τμήμα κάποιας POF, έχει εφαρμοσθεί και η τεχνική της λέπτυνσης ενός μικρού τμήματος της POF αφήνοντας ακάλυπτο ένα τμήμα που τοπικά έχει ακτίνα πυρήνα μικρότερη από αυτό της POF [57]. Ανάλογα με την προσδοκώμενη ευαισθησία, μπορεί να προστεθεί κάποιο πρόσθετο υλικό στο τμήμα που έχει υποστεί τη λέπτυνση. Τα χαρακτηριστικά αυτού του υλικού αλλάζουν ανάλογα με την απουσία/παρουσία/αύξηση της μετρούμενης ουσίας. Με αυτό τον τρόπο αλλάζει πιο αποδοτικά και η ποσότητα του κυματοδηγούμενου φωτός [57]. Το χαρακτηριστικό των SI-POFs με μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα (0.5) προσφέρει το πλεονέκτημα της συγκέντρωσης ανακλώμενου φωτός από κάποια επιφάνεια. Σε βιοϊατρικές εφαρμογές, έχει εξεταστεί η δυνατότητα μέτρησης και ελέγχου των αρτηριακών παλμών. Φωτίζοντας μία επιφάνεια πάνω από κάποια αρτηρία, η συστολή και η διαστολή της αρτηρίας οδηγεί σε μεταβολή του ανακλώμενου φωτός που θα λάβει ο αισθητήρας που είναι κοντά στην φωτιζόμενη επιφάνεια. Το άκρο μίας POF μπορεί να αποτελέσει το σημείο συλλογής του φωτός και η ίδια η POF να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά του λαμβανόμενου σήματος στο τμήμα όπου θα γίνει η επεξεργασία [58], [59].

Όπως φάνηκε, εκτός από τον ίδιο τον αισθητήρα, μία POF μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το τμήμα μετάδοσης κάποιας μετρήσιμης ποσότητας σήματος από το σημείο όπου γίνεται ο έλεγχος της ισχύος. Μένοντας, λοιπόν, στο κομμάτι της βιοϊατρικής, οι POFs μπορούν να βρουν εφαρμογή σαν τμήμα μίας διάταξης εκτίμησης ενός μέτρου της εκπνεόμενης ή απορροφούμενης ιονίζουσας ακτινοβολίας (ακτίνες X, γάμμα). Ένα υλικό κατάλληλα τοποθετημένο στην άκρη της POF σπινθηροβολεί υπό την εκπομπή ιονίζουσας ακτινοβολίας σε κάποια περιοχή. Ο σπινθηρισμός γίνεται στο ορατό φάσμα. Η POF αναλαμβάνει τη μεταφορά του σήματος (probe) από την περιοχή όπου απαιτείται να ελεγχθούν τα επίπεδα ακτινοβολίας σε μία απομακρυσμένη ασφαλή περιοχή σε πραγματικό χρόνο [60]. Στο τμήμα που θα αναλάβει την επεξεργασία γίνεται μία αντιστοίχιση της μετρούμενης ποσότητας, πχ τάση, πλήθος φωτονίων σε κάποια

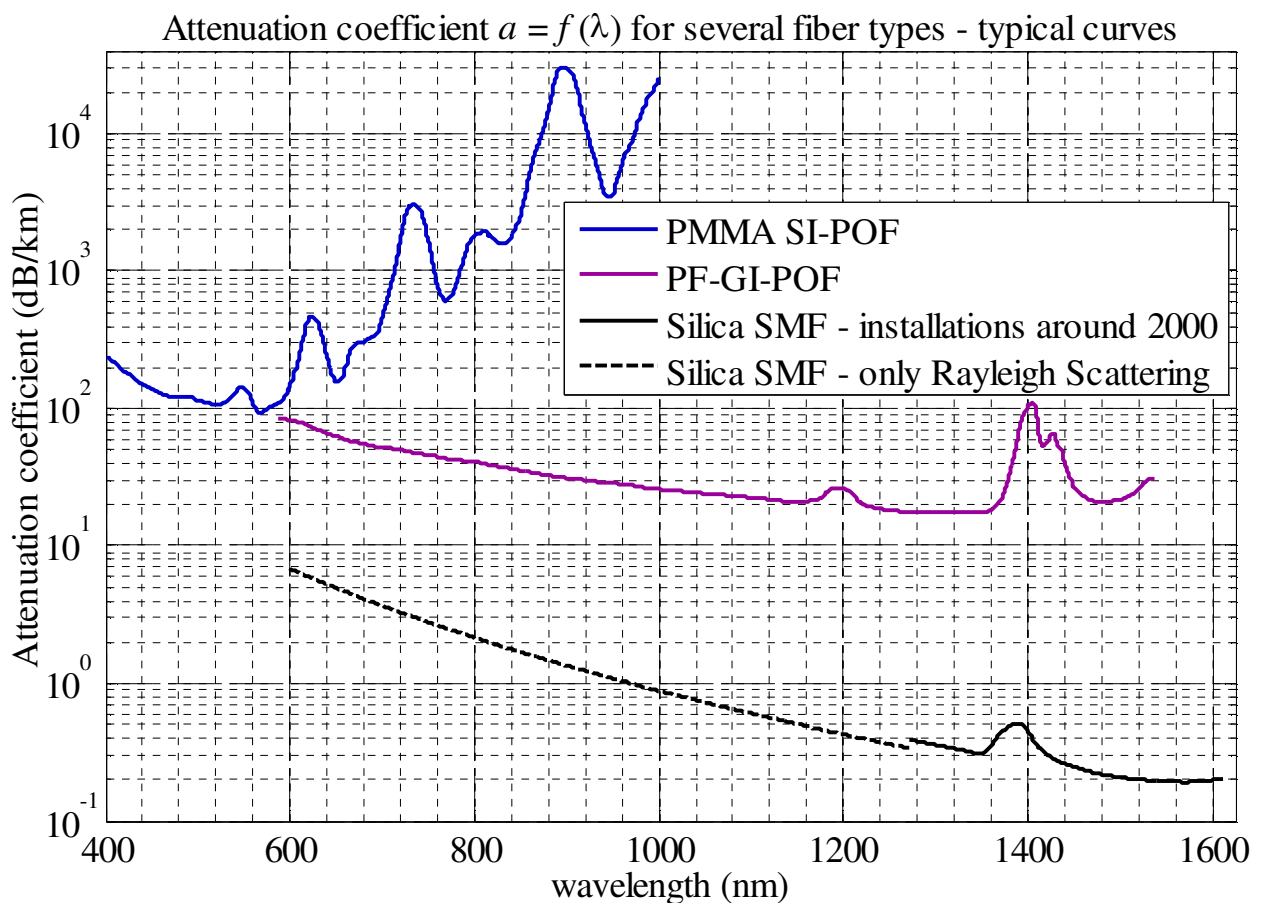
διάρκεια, με την εκπεμπόμενη ή απορροφούμενη ποσότητα ιονίζουσας ακτινοβολίας δημιουργώντας ένα απλό όργανο μέτρησης. Για χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας (θεραπεία καρκίνου), όπως η περίπτωση που περιγράφηκε, η POF δεν θα υποστεί σημαντική επίδραση από την ακτινοβολία. Στην περίπτωση που η ίδια η POF εκτεθεί σε μεγάλα επίπεδα ιονίζουσας ακτινοβολίας, οι απώλειες που θα μετρηθούν από τη διάδοση φωτός από την POF θα μεταβληθούν. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει αξιοποιηθεί ώστε η ίδια η POF να λειτουργεί σαν αισθητήρας μέτρησης της ποσότητας της ακτινοβολίας [60]. Οι απώλειες της POF επανέρχονταν στις αρχικές τιμές μετά από κάποιο χρόνο από την έκθεση. Αυτές είναι κάποιες ενδεικτικές περιπτώσεις όπου οι είτε βρίσκουν είτε μπορούν να βρουν εφαρμογή όχι μόνο σας τηλεπικοινωνιακό κανάλι, αλλά και σαν την κύρια μονάδα ενός αισθητήρα ή το τμήμα αυτού που θα αναλάβει τη διάδοση ενός κρίσιμου σήματος.

2.2 Κάλυψη αποστάσεων μεταξύ 50 και 100 μέτρων με χρήση πλαστικών οπτικών ινών για ρυθμούς μετάδοσης τουλάχιστον 1 Gbit/s

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1, σε εγκαταστάσεις δικτύων εντός του σπιτιού ή σε ένα εσωτερικό χώρο μικρού μεγέθους, οι ζεύξεις σημείου-προς-σημείο αποτελούν οικονομικά αποδοτική και ευέλικτη λύση. Θεωρώντας ότι η επιλογή της SI-POF είναι ρεαλιστική επιλογή για την δικτύωση σε εμβέλεια σπιτιού, ένα σύστημα επικοινωνίας θα αποτελείται από την πηγή, το οπτικό κανάλι και το φωτοφωρατή. Οι πηγές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων μέσω SI-POFs είναι LEDs, LEDs συντονισμένης κοιλότητας (Resonant Cavity LEDs – RC-LEDs), συμβατικές δίοδοι lasers και δίοδοι VCSELs. Από όλες τις τεχνολογίες πηγών υποστηρίζεται η εκπομπή στα 650 nm, αλλά και σε άλλα μήκη κύματος στο ορατό φάσμα, όπως στο πράσινο και στο μπλε χρώμα. Οι LEDs υποστηρίζουν συνήθως ρυθμό μετάδοσης με άμεση διαμόρφωση On-Off-Keying που μπορεί να ξεπεράσει τα 200 Mbit/s, ενώ οι πηγές laser (ανάλογα με το μοντέλο) μπορούν να υποστηρίξουν και περισσότερο από 1 Gbit/s. Σημαντική δυναμική φαίνεται να έχουν οι μLED που μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων από τις πιο συμβατικές εκδοχές LEDs [61]. Τέτοιου τύπου LED από υλικό Gallium Nitride (nitride based) κυανού χρώματος σε ερευνητικό στάδιο με διάμετρο 47 μm έδωσε εύρος ζώνης κοντά στο 1 GHz, ενώ LED ίδιου υλικού και εκπεμπόμενου χρώματος αλλά με διάμετρο 75 μm έδωσε εύρος ζώνης 0.7 GHz [62]. Η τεχνολογία έχει βελτιωθεί σε γενικές γραμμές και πολλοί περιορισμοί που παρουσίαζε κάθε κατηγορία πηγών μπορούν να αντιμετωπιστούν. Με μία μικρή επιβάρυνση του κόστους, η χρήση πηγών lasers είναι εφικτή. Επιπλέον, εκτός από πληθώρα πηγών laser στα 650 nm [63], έχουν αναπτυχθεί και είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμες πηγές laser που εκπέμπουν είτε μπλε (450 nm) [64] είτε κυανό (488 nm) [65] είτε πράσινο χρώμα (515 nm) [66], μήκη κύματος στα οποία είναι δυνατό να αξιοποιηθούν οι μικρότερες απώλειες που παρουσιάζουν οι SI-POFs από PMMA, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4. Αναλυτικότερα, σε αυτό το σχήμα απεικονίζονται τυπικές καμπύλες συντελεστών απωλειών σε dB/km τριών τύπων ινών από αυτές που περιγράφηκαν, της PMMA SI-POF ίνας μεγάλου πυρήνα, της PF-GI-POF (από CYTOP) και της μονότροπης ίνας διοξειδίου πυριτίου [67]. Όσον αφορά την PMMA SI-POF, φαίνονται τα παράθυρα χαμηλών απωλειών τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω. Από τα 440 nm μέχρι και τα 530 nm, οι απώλειες είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες απώλειες στην περιοχή των 650 nm. Άλλο παράθυρο χαμηλών απωλειών που μπορεί να αξιοποιηθεί βρίσκεται σε μία περιοχή μεταξύ 563 nm και 578 nm (κίτρινο χρώμα). Ο συντελεστής απωλειών αυξάνεται υπερβολικά μετά το ορατό φάσμα. Σε αυτή την φασματική περιοχή, δηλαδή στην περιοχή του εγγύς υπερύθρου, φαίνεται η χαμηλότερη τιμή του σχετικού συντελεστή στην PF-GI-POF. Για τη μονότροπη ίνα διοξειδίου πυριτίου (Single Mode Fiber – SMF), μετά τα 1271 nm, θεωρήθηκε η περίπτωση μέσων τιμών από τις εγκαταστάσεις κατά την περίοδο του 2000 καλωδίων που ακολουθούν το

πρότυπο της ITU G.652 A και B στο δίκτυο κορμού συγκεκριμένου παρόχου [68]. Πριν τα 1271 nm, απεικονίζεται ο συντελεστής απωλειών αποκλειστικά λόγω της σκέδασης Rayleigh. Στην περιοχή του κοντινού υπερύθρου φαίνεται ο συντριπτικά χαμηλότερος συντελεστής απωλειών σε σχέση με τις υπόλοιπες ίνες, γεγονός που ενισχύει και την ανάγκη εγκατάστασης μονότροπων ινών σε δίκτυα κάλυψης πολύ μεγαλύτερων αποστάσεων.

Στην πλευρά του δέκτη, οι συχνά εμφανιζόμενοι φωτοφωρατές σε ζεύξεις με SI-POFs είναι οι φωτοδιόδοι pin και APD. Η φωτοδίοδος pin συνοδεύεται συνήθως από ένα ενισχυτή διαγωγιμότητας (Trans-Impedance Amplifier – TIA). Ο συνδυασμός φωτοδίοδου και TIA είτε πωλείται σαν πλήρης δέκτης [69] είτε είναι δυνατό η φωτοδίοδος να αποτελεί ξεχωριστή μονάδα [70] από το κύκλωμα ενίσχυσης που ακολουθεί. Συνηθισμένο υλικό κατασκευής των φωτοδίοδων είναι το πυρίτιο (Si) αφού αποκρίνεται ικανοποιητικά σε όλο το ορατό φάσμα. Υπάρχει μεγάλη πληθώρα επιλογών τόσο σε pin φωτοδιόδους όσο και σε APDs [71] λόγω της ώριμης τεχνολογίας του πυριτίου.



Σχήμα 2.4. Τυπικά διαγράμματα συντελεστών απωλειών συναρτήσει του μήκους κύματος για ίνες PMMA SI-POF, Perfluorinated Polymer (PF) GI-POF PF και μονότροπη ίνα διοξειδίου πυριτίου (Single Mode Fiber – SMF). Το τμήμα πριν τα 1271 nm για την SMF περιλαμβάνει μόνο το αποτέλεσμα της σκέδασης Rayleigh.

Περνώντας στο τμήμα της μετάδοσης, παρά το γεγονός ότι έχουν εύκολο χειρισμό, οι SI-POFs με μεγάλο πυρήνα διαμέτρου 980 μm έχουν δύο σοβαρά μειονεκτήματα τα οποία είναι η πτώση του εύρους ζώνης με την απόσταση εξαιτίας του μεγάλου πλήθους των τρόπων που αυξάνουν τη διασπορά και ο υψηλός συντελεστής απωλειών, όπως φάνηκε και από το Σχήμα 2.4. Ενδεικτικά, από το τετράγωνο του μέτρου της απόκρισης συχνότητας του καναλιού προκύπτει μία τυπική τιμή περίπου 40 με 50 MHz στα 100 m ανάλογα με το μοντέλο της ίνας [72], [31], ενώ οι απώλειες είναι της τάξης των 0.15–0.18 dB/m [73], [74], [75], [76]. Θέτοντας ως περιοχή ενδιαφέροντος ένα εύρος μηκών

ζεύξεων μεταξύ 50 και 100 μέτρων, το εύρος ζώνης των SI-POFs περιορίζεται σημαντικά. Αυτό το πρόβλημα εντείνεται από το γεγονός ότι σε οπτικές διασυνδέσεις σε τοπικά δίκτυα ή σε δίκτυα βραχείας εμβέλειας, όπως ένα οικιακό ή μικρό εταιρικό δίκτυο, ρυθμοί που ξεπερνούν το 1 Gbit/s έχουν γίνει ήδη αναγκαίοι. Έχουν υλοποιηθεί και δημοσιευθεί στην διεθνή βιβλιογραφία διάφορες τεχνικές αντιμετώπισης του περιορισμού που προκαλεί η διασπορά των τρόπων στο ρυθμό δεδομένων που μπορούν να διαδοθούν κατά μήκος SI-POFs μεγάλου πυρήνα. Αυτές οι τεχνικές είναι αρκετές και καθεμία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Ένας απλός τρόπος είναι η εφαρμογή διαμόρφωσης πλάτους βασικής ζώνης σε συνδυασμό με εξίσωση καναλιού στο δέκτη. Ο εξισωτής συνήθως είναι υλοποιημένος είτε σε ολοκληρωμένη και αναλογική μορφή είτε σε ψηφιακή μορφή. Τυπικά σχήματα όπως το δυαδικό On-Off Keying (OOK) και η παλμική διαμόρφωση πλάτους (Pulse Amplitude Modulation – PAM) πολλαπλών επιπέδων, με κοινή περίπτωση το 4-PAM, έχουν εφαρμοσθεί για μεταδόσεις σημάτων σε ρυθμό 1.25 Gbit/s σε απόσταση 50 μέτρων. Ενδεικτικά, για μεταδόσεις OOK σημάτων με Non-Return-to-Zero (NRZ) παλμούς διαμορφώνοντας άμεσα πηγή laser στα 655 nm, με ισχύ εισόδου στην ίνα ίση με 5 dBm, μετά από διάδοση κατά μήκος μίας SI-POF 50 μέτρων και το πέρασμα από τον εξισωτή που αντιστάθμιζε επιτυχώς την απόκριση του καναλιού, επιτεύχθηκε ρυθμός σφαλμάτων bit (BER) ίσος με 10^{-9} για λαμβανόμενη ισχύ (δηλαδή ευαισθησία) ίση με -15.5 dBm [77]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικό χρόνο. Προφανώς, θα υπάρχει κάποιο περιθώριο της ευαισθησίας σε decibel από την ισχύ που θα έφθανε στο δέκτη μετά τη διάδοση των 50 μέτρων σε ένα πραγματικό σύστημα, επειδή αν από την ισχύ εκπομπής αφαιρεθούν τα decibel που αντιστοιχούν στις απώλειες σύζευξης του πομπού με την ίνα, στις απώλειες της ίδιας της ίνας και στις απώλειες σύζευξης της ίνας με το δέκτη, το αποτέλεσμα είναι ένα επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος που είναι μεγαλύτερο από την ευαισθησία και η διαφορά των δύο επιπέδων είναι ίσο με το περιθώριο που αναφέρθηκε. Αυτό το περιθώριο ισχύος υπολογίστηκε στα 7 dB για τα 50 μέτρα. Οι επιδόσεις στα 50 μέτρα έχουν ξεταστεί και για σχήματα διαμόρφωσης μεγαλύτερης τάξης μεταδίδοντας σήματα διαμορφωμένα κατά 4-PAM ή άλλα πιο σύνθετα σχήματα όπως τα Duobinary σήματα σε ρυθμό 1.1 Gbit/s [78]. Η οπτική πηγή που χρησιμοποιήθηκε ήταν RC-LED με μήκος κύματος στα 650 nm. Η μέση ισχύς εισόδου στην ίνα ήταν -1.5 dBm. Μετά από διάδοση 50 μέτρων, τα ηλεκτρικά σήματα περνούσαν από προσαρμοστικό εξισωτή εμπρόσθιας τροφοδοσίας (Feed-Forward Equalizer – FFE) με την επεξεργασία να γίνεται εκτός της ζεύξης σε περιβάλλον Matlab (off-line). Ρυθμός BER ίσος με 10^{-4} επιτεύχθηκε για μικρότερη λαμβανόμενη ισχύ για τις εκδοχές Duobinary που δοκιμάστηκαν σε σχέση με αυτή για το 4-PAM. Ωστόσο, δεν είχε βελτιστοποιηθεί το κομμάτι της εκπομπής όσον αφορά την επίδραση φαινομένων μη γραμμικότητας της πηγής. Λαμβάνοντας υπόψη τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά του Duobinary σχήματος διαμόρφωσης, κατασκευάστηκε κατάλληλο κύκλωμα προ-κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης για την επεξεργασία σημάτων διαμορφωμένα κατά το συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης [79]. Σε φάση σχεδιασμού, εξετάστηκε η μετάδοση σήματος σε ρυθμό 3.125 Gbit/s (με BER = 10^{-12} και ευαισθησία -15 dBm) κατά μήκος 50 μέτρων SI-POF, θεωρώντας εξίσωση καναλιού στο δέκτη αποδίδοντας εξισωμένη ζεύξη εύρους ζώνης 700 MHz [79].

Ο συνδυασμός δυαδικής διαμόρφωσης OOK με χρήση εξίσωσης στο δέκτη έχει εφαρμοσθεί και στην περιοχή του πράσινου χρώματος, επειδή σε αυτό το μήκος κύματος οι SI-POFs παρουσιάζουν μικρότερο συντελεστή απωλειών, όπως απεικονίστηκε και στο Σχήμα 2.4, από ότι στο κόκκινο χρώμα στο οποίο έχουν γίνει τα περισσότερα πειράματα. Με μεταδόσεις με χρήση laser στα 520 nm και σε ρυθμό 1.25 Gbit/s, καλύφθηκαν 50 μέτρα με χρήση SI-POF [80]. Το μέγιστο επίπεδο της ισχύος εκπομπής τέθηκε ίσο με 1 dBm για την ασφάλεια των ματιών. Ο εξισωτής στο δέκτη

ήταν σε ολοκληρωμένη μορφή. Με μέση λαμβανόμενη ισχύ -12 dBm, επιτεύχθηκε BER της τάξης του 10^{-9} σε πραγματικό χρόνο. Η απόσταση που μπορεί να καλυφθεί φθάνει τα 100 μέτρα, αλλά σύμφωνα με την [81], δεν αρκούσε ο ολοκληρωμένος (αναλογικός) εξισωτής, και γι' αυτό εφαρμόστηκε ψηφιακή επεξεργασία σήματος, δηλαδή υλοποιήθηκε ένας εξισωτής με ανάδραση από απόφαση (Decision Feedback Equalizer – DFE). Με μέση ισχύ ίση με 0 dBm να περνά μέσα στην ίνα από μία πηγή laser στα 515 nm, το όριο BER = 10^{-3} εξασφαλίστηκε όταν η λαμβανόμενη ισχύς ήταν σε ένα επίπεδο -15.5 dBm. Σε αυτή τη διερεύνηση, η επεξεργασία δεν πραγματοποιήθηκε σε πραγματικό χρόνο. Σε άλλες προτάσεις εξισωτών, έχει εξεταστεί και ο πρόσθετος στόχος της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης του δέκτη [72].

Η σύμπτυξη του φάσματος για ένα συγκεκριμένο ρυθμό μπορεί να γίνει και με ανώτερης τάξης σχήματα διαμόρφωσης μεταδίδοντας περισσότερα bits ανά σύμβολο πληροφορίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το σχήμα τετραγωνικής διαμόρφωσης πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation – QAM) 16ης τάξης. Στην απλή περίπτωση, θα χρησιμοποιηθεί μία φέρουσα που θα διαμορφωθεί με το σήμα και έπειτα θα διαμορφωθεί και το οπτικό φέρον για να γίνει η μετάδοση [82]. Στην πολυπλοκότερη περίπτωση που δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα, οι δύο κάθετες συνιστώσες του QAM σήματος, I και Q , μεταδίδονται στη βασική ζώνη με διαμόρφωση διαφορετικών μηκών κύματος δημιουργώντας μία εκδοχή που λέγεται Wavelength-Sliced emulated QAM (WS-QAM) [83]. Έχει εξεταστεί πειραματικά η μετάδοση WS-QAM σήματος σε ρυθμό 100 Mbit/s κατά μήκος μίας SI-POF 100 μέτρων. Στην εκπομπή χρησιμοποιήθηκαν δύο LED στα 460 nm και 520 nm. Για την πολυπλεξία και την αποπολυπλεξία χρησιμοποιήθηκαν απλές bulk οπτικές διατάξεις. Παρά την πολύ καλή φασματική απόδοση, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην πολυπλεξία και την αποπολυπλεξία ώστε να μην υπάρχει διαφωνία (crosstalk) κατά τη λήψη. Επιπλέον, δεν πρέπει να παραβλεφθεί το γεγονός ότι απαιτούνται 2 ζεύγη πομπών και δεκτών. Στο τμήμα της εκπομπής πρέπει να προβλεφθεί η μετάδοση ίδιου επιπέδου ισχύος για τις δύο συνιστώσες ή η υποβάθμιση της ισχυρότερης από τις δύο στο ηλεκτρικό επίπεδο στο τμήμα του δέκτη. Ένα τέτοιο σύστημα έχει αρκετά πολύπλοκη μορφή για να υιοθετηθεί σε ζεύξεις σημείου-προς-σημείο σε ένα μικρό δίκτυο σε εσωτερικό χώρο.

Οι δύο προσεγγίσεις, δηλαδή η εφαρμογή εξίσωσης και η σύμπτυξη του εύρους ζώνης σε αστερισμούς μεγαλύτερης τάξης από 4, είναι αναμενόμενο ότι μπορούν να συνδυαστούν και να δώσουν τη δυνατότητα να ξεπεραστεί ο ρυθμός του 1.25 Gbit/s στα 50 μέτρα. Σχετικά με την αντιμετώπιση του μειωμένου εύρους ζώνης του καναλιού, έχουν χρησιμοποιηθεί ισχυρότερες τεχνικές και αλγόριθμοι για την εξίσωση του καναλιού, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση των μη γραμμικών χαρακτηριστικών των πηγών στην επιδόσεις μίας ζεύξης. Η ισχυρότερη διαδικασία εξίσωσης έδωσε τη δυνατότητα, μετά από μετάδοση κατά μήκος μίας SI-POF 50 μέτρων, ο ρυθμός να αγγίξει τα 2.25 Gbit/s για BER = 10^{-3} με μετάδοση σημάτων διαμορφωμένων κατά 4-PAM ή 8-PAM ύστερα από άμεση διαμόρφωση μίας RC-LED στα 650 nm και με λαμβανόμενη ισχύ λίγο πάνω από -8 dBm [84].

Η περαιτέρω αύξηση της φασματικής απόδοσης μπορεί να επέλθει με την εφαρμογή σχημάτων διαμόρφωσης που υποστηρίζουν αστερισμούς δύο διαστάσεων όπως το 16-QAM. Ωστόσο, είναι δυνατό να υλοποιηθούν τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης με απλούστερο τρόπο από αυτόν που περιγράφηκε για το 16-QAM λίγο πιο πάνω (WS-QAM). Η απλούστερη υλοποίηση μπορεί να προκύψει με την εφαρμογή ενός σχήματος διαμόρφωσης παραπλήσιου του σχήματος QAM. Πιο συγκεκριμένα, έχουν εξεταστεί οι μεταδόσεις σημάτων διαμορφωμένων κατά το σχήμα Carrierless Amplitude and Phase modulation (CAP) τάξης 64 χρησιμοποιώντας RC-LED στα 650 nm και φωτοδίοδο PIN στη λήψη [85]. Με κατάλληλη μορφή για τους εκπεμπόμενους παλμούς και με ένα σχήμα εξίσωσης στο δέκτη για την αντιστάθμιση της διασποράς των τρόπων και την

ανάκτηση των δεδομένων, έγινε δυνατή η μετάδοση δεδομένων σε ρυθμό 1.5 Gbit/s κατά μήκος μίας ίνας 50 μέτρων. Ο ρυθμός BER ήταν 10^{-12} , ενώ το περιθώριο ισχύος στη λήψη ήταν ίσο με 2.9 dB, με την ευαισθησία και τη λαμβανόμενη ισχύ να μετρώνται στα -14.7 dBm και -11.8 dBm, αντίστοιχα.

Άλλη λύση που κερδίζει έδαφος στη βιβλιογραφία είναι η χρήση πολυπλεξίας με διαίρεση ορθογώνιων συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM). Με αυτή την τεχνική, ορθογώνιες υποφέρουσες φορτώνονται με μιγαδικά σύμβολα ακολουθώντας κάποιο σχήμα διαμόρφωσης τάξης μεγαλύτερης του 2 και με εφαρμογή επεξεργασίας σήματος, η οπτική πηγή θα διαμορφωθεί με ένα σήμα με όσο το δυνατό στενότερο φάσμα. Όταν το σήμα που διαμορφώνει άμεσα την οπτική πηγή είναι πραγματικό και βασικής ζώνης, τότε συνήθως η OFDM τεχνική αναφέρεται ως DMT (Discrete Multi-Tone) [67]. Το φάσμα του σήματος είναι κοφτό και ταυτόχρονα η χρήση του κυκλικού προθέματος σε καθένα σύμβολο που μεταδίδεται έχει διπλό ρόλο:

- ⇒ από τη μία, είναι δυνατή η εξαγωγή της κυκλικής συνέλιξης από την γραμμική συνέλιξη που θα έχει υποστεί κάθε πραγματικό σύμβολο με την κρουστική απόκριση του καναλιού στενού εύρους ζώνης μετά το πέρασμα μέσα από αυτό. Από την κυκλική συνέλιξη είναι εύκολη η επεξεργασία σε διακριτό χρόνο και η ανάκτηση των δεδομένων.
- ⇒ από την άλλη, το κυκλικό πρόθεμα προσφέρει προστασία στο μεταδιδόμενο σύμβολο, καθώς αλληλοπαρεμβολή διαδοχικών DMT συμβόλων λόγω της διασποράς των τρόπων μέσα στη διάρκεια του κυκλικού προθέματος, εξαλείφεται με την αφαίρεση του κυκλικού προθέματος στο δέκτη, κάνοντας τη μετάδοση πιο εύρωστη στη διασπορά των τρόπων.

Με τη χρήση των ορθογώνιων υποφερόντων είναι δυνατή η κατανομή περισσότερων bits ανά σύμβολο και ανά υποφέρον όταν ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο είναι ευνοϊκός, εφαρμόζοντας την τεχνική bit loading, δηλαδή όπως υπονοεί και το όνομα, «φορτώνοντας» περισσότερα bits σε υποφέροντα που «μπορούν» να υποστηρίξουν υψηλότερης τάξης σύμβολα λόγω του ότι ο θόρυβος για τα συγκεκριμένα υποφέροντα είναι αρκετά χαμηλός. Με αυτή την τεχνική είναι δυνατή η μεγιστοποίηση του ρυθμού (για κάποια συγκεκριμένη επίδοση που τίθεται ως στόχος, δηλαδή για συγκεκριμένο ρυθμό σφαλμάτων bit) χωρίς να απλώνει σημαντικά το εύρος ζώνης, καθώς όπως θα φανεί και σε επόμενη ενότητα, η απόκριση συχνότητας του καναλιού της SI-POF είναι αυτή ενός χαμηλοπερατού φίλτρου. Επομένως, υποφέροντα κοντά στο DC που θα υποστούν μικρή υποβάθμιση του πλάτους τους από το κανάλι μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω της κατανομής περισσότερων bits σε αυτά. Μπορεί να γίνει και η ανάποδη διαδικασία κατά την οποία για συγκεκριμένο ρυθμό ως στόχο, ελαχιστοποιείται ο ρυθμός σφαλμάτων bits με την κατανομή κατάλληλης ισχύος σε καθένα υποφέρον. Αυτή η τεχνική αναφέρεται ως power loading.

Αυτό το σχήμα απαιτεί τη χρήση επεξεργασίας σήματος τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη με την εφαρμογή αντίστροφου γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT) στην εκπομπή και γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) στο δέκτη. Παρόλα αυτά, οι τεχνικές OFDM και DMT έχουν ήδη βρει εφαρμογή είτε πρόκειται για ασύρματα, πχ ασύρματα τοπικά δίκτυα 802.11, είτε πρόκειται για ενσύρματα συστήματα μεταδόσεων, όπως η τεχνολογία DSL. Δεδομένου ότι αυτή η τεχνική εφαρμόζεται ήδη, το κόστος του αντίστοιχου υλικού που απαιτείται μπορεί να μειωθεί περισσότερο αν εφαρμοσθεί και σε οπτικές συνδέσεις σε οικιακά δίκτυα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία μπορεί να βρεθεί μεγάλη πληθώρα πειραματικών διερευνήσεων για τη δυνατότητα κάλυψης αποστάσεων μεταξύ 50 και 100 μέτρων με εφαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης DMT. Ήδη από το 2009 έχουν αναπτυχθεί τα

πρώτα πειράματα με τα οποία επιτεύχθηκαν μεταδόσεις DMT συμβόλων μέσα από SI-POF σε ρυθμό 1.5 Gbit/s και 0.98 Gbit/s με χρήση VCSEL και RC-LED, αντίστοιχα, με μέση τιμή για το BER ίση με 1.2×10^{-5} και 1.03×10^{-5} [86]. Οι πηγές εξέμπεπταν στα 650 nm. Το μήκος της ίνας ήταν 50 μέτρα. Για την επίτευξη των ρυθμών εφαρμόστηκε η τεχνική bit loading. Στην περίπτωση χρήσης RC-LED πηγής, καθένα DMT σύμβολο αποτελούνταν από 511 ωφέλιμα υποφέροντα (μαζί με το υποφέρον στο DC τα υποφέροντα ήταν 512 και μαζί με τα συζυγή κατοπτρικά που απαιτούνται στους IFFT/FFT έφθαναν τα 1024) καλύπτοντας εύρος ζώνης των 250 MHz (χωρίς τα συζυγή κατοπτρικά). Στην περίπτωση χρήσης πηγής VCSEL, χρησιμοποιήθηκαν 1023 ωφέλιμα υποφέροντα με το φάσμα να εκτείνεται σε 500 MHz στη βασική ζώνη (χωρίς τα συζυγή κατοπτρικά). Αυτό συνέβη λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης που υποστηρίζουν οι πηγές τύπου VCSEL. Ειδικά για την περίπτωση χρήσης VCSEL, από τα ωφέλιμα υποφέροντα δεν χρησιμοποιήθηκαν όλα. Η επεξεργασία γινόταν εκτός της ζεύξης (post-processing). Αντίστοιχα στην απόσταση των 100 μέτρων, με 256 υποφέροντα ήταν δυνατή η επίτευξη BER ίσου με 10^{-3} για ρυθμό 1.62 Gbit/s [87]. Το κυκλικό πρόθεμα κάλυπτε το 1.2% της διάρκειας του DMT συμβόλου και το εύρος ζώνης καθενός συμβόλου ήταν 312.5 MHz. Για την επίτευξη του ρυθμού εφαρμόστηκε η τεχνική bit loading για τη μεγιστοποίησή του. Η πηγή ήταν μία δίοδος laser στα 655 nm με κατάλληλο φακό στην έξοδό της. Η μέση οπτική ισχύς μετά από μισό μέτρο SI-POF ίνας ήταν 2.5 dBm. Ο ρυθμός που αναφέρθηκε αφορά τα συνολικά δεδομένα μαζί με τα κυκλικά προθέματα, πιθανά πιλοτικά υποφέροντα ή πιλοτικά σύμβολα και κάποιο πιθανό κώδικα καναλιού για τη διόρθωση σφαλμάτων. Η επεξεργασία δεν έγινε σε πραγματικό χρόνο.

Ωστόσο, και η εξίσωση καναλιού σε συνδυασμό με τις ώριμες και απλές διαμορφώσεις πλάτους αποτελεί ανταγωνιστική τεχνολογία. Από συγκριτική θεωρητική μελέτη, για ρυθμό μετάδοσης 1.25 Gbit/s και όριο για το BER ίσο με 10^{-3} , θεωρώντας την SI-POF ως ένα χαμηλοπερατό Gaussian φίλτρο, το σχήμα 2-PAM με εξίσωση καναλιού στο δέκτη έδωσε μεγαλύτερο περιθώριο ισχύος όταν το εύρος ζώνης του καναλιού ξεπερνούσε το 20% του ρυθμού μετάδοσης. Για εύρος ζώνης του καναλιού μεταξύ 5% και 20%, η μετάδοση 4-PAM και η χρήση εξισωτή στο δέκτη αποδίδει καλύτερα. Για εύρος ζώνης καναλιού κάτω από 5% του ρυθμού μετάδοσης το μεγαλύτερο περιθώριο ισχύος προέκυψε για σχήμα DMT με εφαρμογή της τεχνικής bit loading και συμμετρικό ψαλιδισμό (clipping) στο σήμα [9]. Αναφέρεται ότι ως οπτικό περιθώριο ισχύος θεωρήθηκε το μέγιστο επίπεδο απωλειών στη ζεύξη που είναι ανεκτό, ώστε στο δέκτη να επιτυγχάνεται ο στόχος του ρυθμού σφαλμάτων bits που έχει τεθεί [88].

Η αντιμετώπιση του περιορισμένου εύρους ζώνης του καναλιού μπορεί να επιτευχθεί και έμμεσα με την μετάδοση πολλαπλών σημάτων σε διαφορετικά μήκη κύματος μέσα από τις SI-POFs. Αυτό μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας μία λογική αραιής πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (Coarse Wavelength Division Multiplexing – CWDM). Τα μήκη κύματος που μπορούν να υποστηριχθούν είναι αυτά για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμες πηγές και ταυτόχρονα οι SI-POFs παρουσιάζουν τις μικρότερες απώλειες. Συνδυάζοντας τις τεχνικές WDM και DMT μπορεί να αυξηθεί σημαντικά ο μεταδιδόμενος ρυθμός, αλλά με προφανές μειονέκτημα την αύξηση της πολυπλοκότητας. Έχει υλοποιηθεί σύστημα μετάδοσης τεσσάρων μηκών κύματος συνολικού ρυθμού 14.77 Gbit/s (για BER 10^{-3}) [89]. Το μέσο μετάδοσης ήταν μία ίνα SI-POF 50 μέτρων. Οι τέσσερις πηγές ήταν laser με μήκη κύματος στα 405 nm, 450nm, 515 nm και 639 nm. Η σύζευξη των πηγών έγινε μέσω ινών μικρότερων διαμέτρων με την SI-POF. Κύριο ζήτημα είναι η υλοποίηση του αποπολυπλέκτη με μικρές απώλειες. Στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν bulk οπτικές διατάξεις. Μέσω συνδετήρα, η ίνα των 50 μέτρων συνδεόταν με μία ίνα ενός μέτρου, η πολυχρωματική έξοδος της οποίας περνούσε από φακό για να γίνει παράλληλη. Έπειτα, ακολουθούσε ο διαχωρισμός των

μηκών κύματος μέσω 3 διχρωικών κατόπτρων (dichroic mirrors) με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης των δεσμών (45°). Για την μείωση της διαφωνίας χρησιμοποιήθηκε πρόσθετο ζωνοπερατό φίλτρο για καθένα μήκος κύματος. Μετά το φιλτράρισμα καθεμίας δέσμης, ακολούθησε φακός για να εστιαστεί καθένα μήκος κύματος στη διατομή μίας ίνας η οποία οδηγούσε σε ένα φωτοφωρατή. Οι πηγές διαμορφώθηκαν με DMT σήματα με εφαρμογή της τεχνικής bit loading και με clipping. Η μέτρηση του BER δεν έγινε σε πραγματικό χρόνο. Τα επίπεδα ισχύος μετά τον αποπολυπλέκτη (που περιλαμβάνει όλα τα φίλτρα και τους φακούς μέχρι και τις εξόδους των ινών που συνδέονται με τους φωτοφωρατές) για τα μήκη κύματος που αναφέρθηκαν ήταν με την ίδια σειρά 0.82 dBm, 1.00 dBm, -1.93 dBm, -7.04 dBm, αντίστοιχα. Οι ρυθμοί ήταν 3.26 Gbit/s, 3.90 Gbit/s, 4.08 Gbit/s και 3.53 Gbit/s, για τα κανάλια στα 405 nm, 450 nm, 515 nm και 639 nm, αντίστοιχα. Παρά τη σημαντική αύξηση του ρυθμού, αυτό έγινε με μεγάλη αύξηση της πολυπλοκότητας, ενώ τίθεται και το ζήτημα διατήρησης της ισχύος από καθεμία πηγή σε χαμηλά επίπεδα για λόγους ασφαλείας.

Η επίτευξη ρυθμού 1 Gbit/s σε SI-POFs μπορεί να επιτευχθεί και μέσω σχημάτων χωρικής διαφοροποίησης. Πιο συγκεκριμένα, έχει υλοποιηθεί ένα σχήμα πολυπλεξίας γωνιακής διαφορικής ομάδας τρόπων (Angular Mode Group Diversity Multiplexing – AGDM) [90]. Η βασική λογική είναι οι τρόποι μέσα στην ίνα να χωριστούν σε ομάδες (mode groups) και σε κάθε ομάδα να «ανατεθεί» ένα κανάλι. Πρόκειται, δηλαδή, είτε για έμμεση αύξηση του ρυθμού είτε για παροχή δύο διαφορετικών υπηρεσιών. Όταν γίνει σύζευξη μίας δέσμης laser μέσα στην ίνα υπό γωνία μικρότερη από την κρίσιμη γωνία της ίνας, ένα πρότυπο (pattern) σε σχήμα δακτυλίου θα εμφανιστεί στο άλλο άκρο της ίνας δεδομένου ότι το μήκος της ίνας είναι μικρότερο από το μήκος που αντιστοιχεί στην κατανομή ισορροπίας τρόπων (Equilibrium Mode Distribution – EMD) λόγω της σύζευξης των τρόπων κατά τη διάδοση. Πέρα από αυτό το μήκος, οποιαδήποτε εισαγωγή δέσμης υπό γωνία στην πλαστική ίνα καταλήγει σε φωτεινούς δίσκους (σαν πρότυπα μακρινού πεδίου – Far Field Patterns – FFPs) και όχι σε δακτύλιο. Η σύζευξη υπό γωνία δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολη σε SI-POFs λόγω των μεγάλων διαστάσεων του πυρήνα τους. Το πρότυπο με μορφή δακτυλίου προκύπτει από τις ανακλάσεις του φωτός στα όρια πυρήνα-μανδύα και διατηρείται για κάποια μέτρα. Το πάχος του δακτυλίου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της SI-POF, το μήκος διάδοσης και το αριθμητικό άνοιγμα της δέσμης στην είσοδο. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, η μία δέσμη ενός laser στα 635 nm εισήλθε παράλληλα και η δεύτερη δέσμη στα 658 nm (λόγω έλλειψης δεύτερου laser στα 635 nm) εισήλθε υπό γωνία 20° ως προς τον άξονα της ίνας. Με αυτό τον τρόπο διεγέρθηκαν δύο διαφορετικές ομάδες τρόπων και διαδόθηκαν κατά μήκος μία τυπικής SI-POF με αριθμητικό άνοιγμα ίσο με 0.5 σε απόσταση 25 μέτρων. Καθεμία δέσμη ήταν διαμορφωμένη κατά ΟΟΚ με εφαρμογή NRZ παλμών και ο ρυθμός ανά ροή ήταν 500 Mbit/s. Στο άλλο άκρο, χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά ένας φακός, δύο κατάλληλα ομόκεντρα κάτοπτρα και ένας δεύτερος φακός ώστε να διαχωριστούν οι δύο ροές και να εστιαστεί η καθεμία ροή σε διαφορετικό δέκτη. Τα διαγράμματα οφθαλμού έδειξαν αμελητέα διαφωνία μεταξύ των δύο καναλιών. Επιτεύχθηκε $BER < 10^{-10}$ ανά κανάλι. Και σε αυτή την τεχνική, παρά το γεγονός ότι αντιμετωπίζεται έμμεσα ο περιορισμός του εύρους ζώνης της ίνας, ένα μειονέκτημα είναι η αναπόφευκτα περιορισμένη απόσταση λόγω του ότι θα αρχίσει να διαχέεται ο φωτεινός δακτύλιος μέσα στον φωτεινό δίσκο και ανάποδα με την αύξηση του μήκους της ζεύξης και δε θα είναι δυνατός ο διαχωρισμός των δύο ροών με χρήση πολύ απλών μέσων χωρίς ισχυρή επεξεργασία σήματος. Επομένως, η απόσταση πρέπει να είναι μικρότερη και από την απόσταση που αντιστοιχεί στην κατάσταση EMD. Άλλο μειονέκτημα είναι και σε αυτή την περίπτωση η αυξημένη πολυπλοκότητα, επειδή πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο πηγές για να προκύψουν ένας δακτύλιος και ένας φωτεινός δίσκος και δύο φωτοφωρατές για να ληφθούν οι πληροφορίες από το δακτύλιο και τον κεντρικό δίσκο.

Η έντονα πολύτροπη συμπεριφορά των SI-POF είναι η αιτία της διεύρυνσης των διαδιδόμενων παλμών κατά τη διάδοσή τους κατά μήκος τέτοιων ινών. Ακόμα και καλά εστιασμένη να εισέλθει η οπτική δέσμη στην ίνα, εξαιτίας των ατελειών της SI-POF είναι αδύνατο να μην διεγερθούν τρόποι κατά τη διάδοση του φωτός. Αυτός είναι ένας δομικός περιορισμός των SI-POFs που είναι δύσκολο να αποφευχθεί. Αντί να εφαρμοσθεί η εξίσωση του καναλιού στο δέκτη, όταν έχει προηγηθεί η μετάδοση κάποιου παλμικού σχήματος διαμόρφωσης, πχ OOK, PAM, ώστε να αντισταθμιστεί η αλληλοπαρεμβολή συμβόλων, ή η μετάδοση σημάτων βάσει φασματικά αποδοτικών σχημάτων διαμόρφωσης, μία άλλη λύση θα ήταν το φιλτράρισμα κάποιων τρόπων υψηλής τάξης που επιδρούν αρνητικά στη διασπορά των τρόπων. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί προσαρμόζοντας τη θέση του φωτοφωρατή σε σχέση με την κάθετη διατομή στο τέλος της ίνας [91]. Αυτή η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί πειραματικά με την εφαρμογή μίας μετατόπισης του φωτοφωρατή από το άκρο της SI-POF συγκεκριμένου μήκους, με μεσολάβηση αέρα μεταξύ ίνας και φωτοφωρατή. Μέχρι κάποια μετατόπιση, ο συμβιβασμός μεταξύ της αύξησης των απωλειών (λόγω πτώσης της εξερχόμενης ισχύος από την ίνα) και της μείωσης της διασποράς των τρόπων (λόγω του φιλτραρίσματος των τρόπων) δρα υπέρ της βελτίωσης των επιδόσεων και την πτώση του BER. Ωστόσο, από κάποια απόσταση και μετά, η μετατόπιση οδηγεί σε ανάδειξη των απωλειών ως τον παράγοντα που θα επικρατήσει, με αποτέλεσμα να αρχίζει η επιδείνωση του BER. Το μήκος μεταξύ ίνας και επιφάνειας του δέκτη στο οποίο επιτυγχάνονται οι βέλτιστες επιδόσεις εξαρτάται από το μήκος της ίνας, τα χαρακτηριστικά της ίδιας της ίνας, τις συνθήκες εισόδου της δέσμης στην ίνα, πχ πέρασμα της δέσμης με πλήρη κάλυψη της διατομής στην είσοδο της ίνας (overfilled launching), τη σχέση της υψηλότερης στάθμης ισχύος του σήματος με τη μικρότερη. Μετάδοση OOK σήματος με NRZ παλμούς μεταδόθηκε με ρυθμό 1.25 Gbit/s σε απόσταση 37.5 μέτρων με BER μικρότερο από 10^{-9} όταν η απόσταση μεταξύ της εξόδου της ίνας και της φωτοδιόδου κυμάνθηκε μεταξύ 4 mm και 6 mm με τη διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη ισχύ (Optical Modulation Amplitude – OMA) να είναι 0.5 dBm.

Σε μία άλλη εκδοχή, το χωρικό φιλτράρισμα των τρόπων πραγματοποιήθηκε με τη μεσολάβηση αέρα μεταξύ των άκρων των ινών που αποτελούσαν τη ζεύξη. Πιο συγκεκριμένα, μία ίνα SI-POF και μία ίνα επίσης SI-POF αλλά πολύ μικρού μήκους πριν τη φωτοδίοδο συνδέονταν στις δύο εισόδους ενός σωλήνα και μεταξύ τους μέσα στο σωλήνα μεσολαβούσε αέρας [92]. Ο σωλήνας είχε εσωτερική διάμετρο 1 mm, για να συνδέονται οι ίνες, και εξωτερική διάμετρο 2 mm. Το μήκος αυτού του κενού τμήματος ήταν δυνατό να προσαρμοστεί. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμιζόταν η γωνία απόκλισης της εξερχόμενης δέσμης από τη δεύτερη ίνα. Η εξερχόμενη δέσμη περιλάμβανε πια τρόπους μικρότερη τάξης λόγω της μεσολάβησης του κενού στην είσοδο της δεύτερης ίνας. Με αυτήν παραλλαγή, επιτεύχθηκε μετάδοση NRZ σήματος ρυθμού 1 Gbit/s με BER = 10^{-8} στα 30 μέτρα, όταν το μήκος του τμήματος κενού μεταξύ των ινών ήταν 3 mm. Η πηγή ήταν RC-LED με οπτική ισχύ εξόδου ίση με -3 dBm.

Όλες οι τεχνικές που περιγράφηκαν αφορούν κυρίως την αντιμετώπιση του εύρους ζώνης του καναλιού. Αυτό που έχουν κοινό είναι η «παρέμβαση» στα άκρα της ζεύξης με την προσθήκη κάποιας διάταξης ή μονάδας εξίσωσης ή μεθόδου επεξεργασίας σήματος ή με την εφαρμογή κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης. Το επόμενο βήμα θα ήταν η παρέμβαση στο ίδιο το μέσο. Σε μία τέτοια περίπτωση, κάποια αλλαγή στον τρόπο κυματοδότησης θα μείωνε της διασπορά των τρόπων για κάποιο συγκεκριμένο μήκος και θα επιτρεπόταν η υποστήριξη μεγαλύτερων ρυθμών. Σύμφωνα με την ενότητα 2.1, αν αντί για SI-POF εγκατασταθεί GI-POF (PMMA-based) ή POF πολλαπλών πυρήνων με Step-Index προφίλ δείκτη διάθλασης για καθένα πυρήνα (Multi-Core SI-POF – MC-SI-POF), ο ρυθμός θα αυξηθεί, αλλά απαιτείται λίγο πιο

πολύπλοκη διαδικασία κατασκευής αυτών των ινών [36]. Με τις MC-SI-POFs είναι δυνατό να κρατηθούν ακόμα πιο χαμηλά οι απώλειες λόγω λυγισμάτων. Έχουν αναπτυχθεί πολλές πειραματικές δομές όπου με τη χρήση GI-POF έχουν επιτευχθεί καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες SI-POFs για το ίδιο μήκος εφαρμόζοντας τα ίδια σχήματα διαμόρφωσης και τις ίδιες τεχνικές για αντιμετώπιση του περιορισμένου εύρους ζώνης [93], όπως είναι αναμενόμενο. Για παράδειγμα, laser (edge emitting) στα 650 nm διαμορφώθηκε άμεσα με ΟΟΚ σήμα. Το οπτικό σήμα διαδόθηκε κατά μήκος μίας ίνας GI-POF 50 m και με διάμετρο 1 mm. Γι' αυτό τον τύπο ίνας αναφέρθηκε και νωρίτερα στην ενότητα 2.1 ότι δεν γίνεται ντοπάριασμα με άλλο υλικό στον πυρήνα [34], δηλαδή δεν πρόκειται για PF-GI-POF. Ο δέκτης αποτελούνταν από μία pin φωτοδίοδο πυριτίου και ένα ενισχυτή διαγωγιμότητας (TIA) με κέρδος 10 ΚΩ. Ο τρόπος σύζευξης της ισχύος από την έξοδο της ίνας στο δέκτη είχε βελτιστοποιηθεί ώστε να μεγιστοποιείται η ισχύς. Στο δέκτη, εφαρμόστηκε εξίσωση με εφαρμογή DFE προσαρμοστικού αλγορίθμου εκτός της ζεύξης (post-processing). Για BER ίσο με 10^{-3} , ο ρυθμός ήταν 5.8 Gbit/s [36].

Με βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών και οπτικών τμημάτων του συστήματος, με εφαρμογή DMT σε συνδυασμό με την τεχνική bit loading, ο ρυθμός μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 5.3 Gbit/s στα 50 μέτρα χρησιμοποιώντας ως κανάλι μία (PMMA-based) GI-POF με διάμετρο 1 mm [36], [34]. Έγινε χρήση VCSEL στα 667 nm εύρους ζώνης διαμόρφωσης 3 GHz στο οποίο το ηλεκτρικό σήμα που εφαρμόστηκε είχε 7 mA μέγιστη τιμή πλάτους από κορυφή-σε-κορυφή. Το επίπεδο ισχύος που εισερχόταν στην ίνα ήταν 0 dBm, ικανοποιώντας την απαίτηση προστασίας των ματιών. Μετά τη διάδοση κατά μήκος των 50 μέτρων, η λαμβανόμενη ισχύς ήταν -15 dBm λόγω του σχετικά μεγαλύτερου συντελεστή απωλειών της ίνας (0.3 dB/m) στα 667 nm. Στο τμήμα της λήψης, η φωτοδίοδος ήταν μία pin πυριτίου και ακολουθούνταν από ενισχυτή διαγωγιμότητας κέρδους 10 ΚΩ. Ο δέκτης μπορούσε να διαχειριστεί σήματα πάνω από 1.6 GHz και η επεξεργασία γινόταν εκτός της ζεύξης. Το ηλεκτρικό φάσμα του συστήματος (φασματική πυκνότητα ηλεκτρικής ισχύος) μαζί με την ίνα GI-POF των 50 μέτρων ήταν 1.3 GHz. Για την τεχνική bit-loading, για την αύξηση της φασματικής απόδοσης χρησιμοποιήθηκαν 256 υποφέροντα που κάλυπταν ένα εύρος από 0 μέχρι 2.25 GHz με απόσταση υποφερόντων 8.8 MHz. Ο αλγόριθμος εκτελούνταν κι αυτός εκτός της ζεύξης και αποδιδόταν ο κατάλληλος αστερισμός σε καθένα υποφέρον κατά βέλτιστο τρόπο μεγιστοποιώντας το πλήθος των bits ανά υποφέρον, μεγιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο το ρυθμό μετάδοσης. Το φάσμα που χρησιμοποιήθηκε έφθανε μέχρι 1.42 GHz (μέχρι και το 161-ο υποφέρον). Ο στόχος για BER κάτω από 10^{-3} στο συγκεκριμένο ρυθμό επιτεύχθηκε για τα περισσότερα από τα υποφέροντα που χρησιμοποιήθηκαν, δίνοντας μέση τιμή 8.5×10^{-4} . Σε παρόμοια λογική και διατηρώντας το τμήμα του πομπού ως έχει, η GI-POF αντικαταστάθηκε από την ίνα 19 πυρήνων με βηματικό προφίλ δείκτη διάθλασης μήκους επίσης 50 μέτρων και διαμέτρου πυρήνα της ίνας ίσο με 1 mm. Στη λήψη, χρησιμοποιήθηκε φωτοδίοδος χιονοστιβάδας με 3 dB εύρος ζώνης ίσο με 1.3 GHz. Το ηλεκτρικό εύρος ζώνης στα 3 dB (της φασματικής πυκνότητας ηλεκτρικής ισχύος) για την MC-SI-POF των 19 πυρήνων ήταν 350 MHz που είναι μεγαλύτερο από αυτό μίας SI-POF με ένα πυρήνα και μικρότερο από αυτό μίας GI-POF με πυρήνα ίδιας διαμέτρου. Και σε αυτή τη διερεύνηση, ακολουθήθηκε η εφαρμογή της DMT διαμόρφωσης με επιλογή των τάξεων M-QAM διαμορφώσεων που θα εφαρμοσθούν σε καθένα υποφέρον μετά την εφαρμογή του σχετικού αλγορίθμου bit loading προσαρμοσμένο στη μεγιστοποίηση του ρυθμού για BER το πολύ ίσο με 10^{-3} . Οι βέλτιστες επιδόσεις προέκυψαν για 512 υποφέροντα μεταξύ 0 και 3 GHz, αν και τελικά αξιοποιήθηκαν τα πρώτα 275 υποφέροντα μέχρι τα 1.6 GHz. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο ρυθμός μετάδοσης ήταν 4.7 Gbit/s. Συγκριτικά, με την GI-POF τα δεδομένα μεταδόθηκαν με ρυθμό 5.3 Gbit/s που ήταν ο μεγαλύτερος, ακολουθούσε η MC-SI-POF με 4.7 Gbit/s, ενώ στο παράδειγμα υλοποίησης WDM πάνω σε SI-POF που

αναφέρθηκε νωρίτερα, σε ένα από τα μήκη κύματος, ο ρυθμός μετάδοσης άγγιξε τα 4 Gbit/s [89]. Ωστόσο, στα πειράματα με τις POFs αυξημένων δυνατοτήτων, δεν τέθηκαν στα άκρα οι δυνατότητες ώστε να αυξηθεί περισσότερο ο ρυθμός, καθώς ορίστηκαν κάποια όρια των τάξεων των M-QAM αστερισμών που μπορούσαν να αποδοθούν σε καθένα υποφέρον, ώστε να διατηρηθεί η υλοποίηση όσο το δυνατό πιο απλή. Από την άλλη, στην περίπτωση της απλής SI-POF με εφαρμογή C-WDM, το επίπεδο ισχύος ανά μήκος κύματος ήταν σχετικά υψηλό, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις ινών το επίπεδο ισχύος που εισερχόταν στην ίνα ήταν τέτοιο, ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση προστασίας των ματιών. Ικανοποιώντας την ίδια συνθήκη για SI-POF, ο ρυθμός που επιτεύχθηκε ήταν της τάξης των 2 Gbit/s [36].

Όπως φάνηκε μέχρι τώρα, οι τρόποι παρέμβασης για την αντιστάθμιση της επίδρασης της διασποράς των τρόπων στο εύρος ζώνης είναι σε συντομία:

- ⇒ κατάλληλη εξίσωση στο δέκτη παλμικών σχημάτων διαμόρφωσης
- ⇒ μεγαλύτερης τάξης σχήματα διαμόρφωσης, πχ M-QAM, M-CAP
- ⇒ φασματικά αποδοτικά σχήματα διαμόρφωσης και με κατάλληλη κατανομή των bits σε υποφέροντα με επαρκές SNR, δηλαδή συνδυασμός DMT με bit loading
- ⇒ Coarse WDM με συνδυασμό DMT και bit loading ανά χρώμα
- ⇒ εφαρμογή σχήματος πολυπλεξίας γωνιακής διαφορικής ομάδας τρόπων
- ⇒ χωρικό φιλτράρισμα κάποιων τρόπων υψηλής τάξης
- ⇒ αλλαγή του μέσου με άλλο που υποστηρίζει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, πχ χρήση GI-POF, MC-SI-POF

Ένα ζήτημα που θα είχε ενδιαφέρον να εξεταστεί θα ήταν ο έλεγχος της δυνατότητας επέμβασης απευθείας στην PMMA SI-POF ώστε να τροποποιηθούν τα χαρακτηριστικά της και να βελτιωθεί το εύρος ζώνης της, αλλά και υπό ποιες συνθήκες μπορεί να συμβεί αυτό. Αυτό είναι το αντικείμενο των επόμενων δύο ενοτήτων αυτού του κεφαλαίου. Αρχικά, θα περιγραφεί ένα ενσύρματο σύστημα οπτικών επικοινωνιών με PMMA SI-POF ως μέσο διάδοσης. Στόχος είναι η καταγραφή των μηχανισμών που δρουν στην ίνα προκαλώντας αύξηση των απωλειών και επιβάρυνση της μετάδοσης από τη διασπορά των τρόπων όσο αυξάνεται η απόσταση διάδοσης. Έχοντας μία θεωρητική εικόνα των παραμέτρων και των μεγεθών που περιορίζουν το ρυθμό δεδομένων που μπορεί να υποστηριχθεί και το επίπεδο της ισχύος που θα λάβει ο δέκτης σε μία ζεύξη δεκάδων μέτρων από SI-POF, το επόμενο βήμα είναι η μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στις ιδιότητες της ίνας από PMMA. Η επιλογή της θερμοκρασίας ως τον παράγοντα που θα αποτελέσει την αιτία αλλαγής των ιδιοτήτων μίας PMMA SI-POF δεν είναι τυχαία. Έχει εξεταστεί πειραματικά η επίδραση της θερμοκρασίας σε bulk υλικό PMMA και έχει αποδειχθεί η αλλαγή του δείκτη διάθλασης [94]. Μέσω χοντρικών και απλουστευμένων σχέσεων, ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της ίνας από PMMA μπορεί να συσχετιστεί με τη διασπορά των τρόπων και κατ'επέκταση με το εύρος ζώνης. Σύμφωνα με την [95], η αλλαγή του δείκτη διάθλασης υπό την επίδραση της θερμοκρασίας σε bulk PMMA υλικό θα είναι ίδια με την αλλαγή του δείκτη διάθλασης του πυρήνα μίας SI-POF από το ίδιο υλικό και για τις ίδιες θερμοκρασίες. Το θεωρητικό αποτέλεσμα της αλλαγής του δείκτη διάθλασης ήταν η μικρή πτώση της διασποράς των τρόπων και η μικρή αύξηση του εύρους ζώνης με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η ελλιπής και απλουστευμένη αυτή θεώρηση ήταν το σημείο εκκίνησης για να διερευνηθεί συστηματικά η επίδραση της θερμοκρασίας στις απώλειες και στο εύρος ζώνης εμπορικά διαθέσιμων μοντέλων SI-POFs από PMMA υλικό. Η συστηματική διερεύνηση περιλάμβανε τόσο την πειραματική μελέτη όσο και τη θεωρητική εξήγηση των αλλαγών που παρατηρήθηκαν. Σαφέστερα, μετά από συγκεκριμένο μοτίβο θέρμανσης από αυτά που δοκιμάστηκαν, προέκυψε σημαντική αύξηση του εύρους ζώνης και μικρή μείωση των απωλειών που παρουσιάζει μία PMMA SI-POF μεγάλου πυρήνα. Το εύρος ζώνης και οι απώλειες των ινών που υπέστησαν τη

θερμική κατεργασία συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες ιδιότητες ινών αναφοράς ίδιου μήκους από την ίδια καλούμπα και τον ίδιο κατασκευαστή μέσω πολλαπλών μετρήσεων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η βελτίωση ήταν σταθερή για χιλιάδες ώρες για τα τμήματα ινών που υπέστησαν τη θέρμανση και αυτό επιβεβαιώθηκε από τις πολλαπλές μετρήσεις εύρους ζώνης και απωλειών. Οι ίνες που υπέστησαν τη θερμική επεξεργασία και οι αντίστοιχες ίνες αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν σε μεταδόσεις δεδομένων, όπου φάνηκε ότι ο ρυθμός σήματος ΟΟΚ με NRZ παλμούς που μπορούν να υποστηρίξουν οι ίνες που πέρασαν από τη διαδικασία θέρμανσης είναι σταθερά μεγαλύτερος από αυτόν των αντίστοιχων ινών αναφοράς. Αυτή ήταν η δεύτερη επιβεβαίωση της βελτίωσης των ιδιοτήτων των ινών. Η πειραματική διερεύνηση συνδυάστηκε με την θεωρητική αιτιολόγηση των φαινομένων. Τα πειραματικά και τα θεωρητικά αποτελέσματα δίνονται στην ενότητα 2.4. Το κεφάλαιο κλείνει με κάποια συμπεράσματα πάνω στα θεωρητικά και στα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

2.3 Περιγραφή συστημάτων επικοινωνιών με χρήση πλαστικών οπτικών ινών

Στο πλαίσιο της κάλυψης μικρών αποστάσεων με χρήση SI-POFs, θα μελετηθούν ζεύξεις σημείου-προς-σημείο. Το σύστημα επικοινωνίας που θα θεωρηθεί είναι πολύ απλό. Ο πομπός αποτελείται από μία πηγή που διαμορφώνεται άμεσα. Στην περίπτωση μας, αυτή η πηγή ήταν ένα laser. Στον πομπό συνδέεται η ίνα είτε απευθείας είτε με τη μεσολάβηση ενός μικρού τμήματος ίνας κατάλληλα διευθετημένου, ώστε η δέσμη να περνά στην ίνα καλύπτοντας πλήρως τη διατομή στην είσοδό της (overfilled launching). Η ίνα συνδέεται απευθείας σε ένα δέκτη που είναι μία φωτοδίοδος pin πυριτίου, ακολουθούμενη από ένα ΤΙΑ. Σε αυτό το πολύ απλό σύστημα για το οποίο λεπτομέρειες θα περιγραφούν στη συνέχεια, το επίκεντρο γίνεται το κομμάτι της μετάδοσης που περιλαμβάνει αποκλειστικά την ίνα.

2.3.1 Γενική περιγραφή καναλιού πλαστικής οπτικής ίνας – περιορισμοί και πρόελευση αυτών

Δεδομένου ότι στόχος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς της SI-POF ως τηλεπικοινωνιακό κανάλι σε ένα σύστημα μικρής εμβέλειας, αλλά και υπό ποιες συνθήκες αυτή η συμπεριφορά μπορεί να μεταβληθεί, θα απομονωθεί η περιγραφή της διάδοσης του φωτός κατά μήκος της ίνας. Με αυτό τον τρόπο θα φανούν οι περιορισμοί που εισάγει το οπτικό κανάλι. Το φως αποτελεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που θα διαδοθεί κατά μήκος ενός κυματοδηγού που είναι η ίνα. Μία παράμετρος που η τιμή της αποτελεί κριτήριο για την υποστήριξη ενός ή περισσότερων τρόπων διάδοσης μέσα από μία οπτική ίνα καλείται κανονικοποιημένη συχνότητα ή απλά παράμετρος V , η οποία είναι εξάρτηση του μήκους κύματος και ορίζεται ως

$$V = \frac{2 \times \pi \times r_{co}}{\lambda} \times NA, \quad \text{με} \quad NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.1)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο και NA είναι το αριθμητικό άνοιγμα (Numerical Aperture) της ίνας, r_{co} είναι η ακτίνα της ίνας και n_{co} , n_{cl} είναι οι δείκτες διάθλασης πυρήνα και μανδύα, αντίστοιχα. Με αριθμητικό άνοιγμα ίσο με 0.5 και $r_{co} = 490 \mu\text{m}$ για τις SI-POFs μεγάλου πυρήνα, για μήκος κύματος 650 nm η κανονικοποιημένη συχνότητα θα είναι $V \approx 2368$. Χρησιμοποιώντας την κανονικοποιημένη συχνότητα, το συνολικό πλήθος των τρόπων που μπορούν να κυματοδηγηθούν είναι ίσο με $M_{modes} = V^2/2$ και για την περίπτωση των SI-POFs ξεπερνά τους 2.8×10^6 τρόπους, λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο πολώσεις ανά τρόπο.

Παρά το γεγονός ότι η διάδοση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά μήκος οπτικών κυματοδηγών περιγράφεται με ακρίβεια από τις εξισώσεις του Maxwell, η γεωμετρική οπτική μπορεί να αποτελέσει μία καλή προσέγγιση για τη διάδοση του φωτός σε περιοχές όπου ο δείκτης διάθλασης μπορεί να μεταβάλλεται μόνο ελάχιστα σε μία

απόσταση συγκρίσιμη με το μήκος κύματος του φωτός [96]. Αυτό σημαίνει ότι σε ίνες μεγάλου πυρήνα με βηματικό δείκτη διάθλασης, η διάδοση του φωτός μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά με τη διάδοση ακτινών κατά μήκος της ίνας.

Η γεωμετρική οπτική μπορεί να εφαρμοσθεί σε οπτικές ίνες υπό την προϋπόθεση ότι $V \gg 1$ [96]. Εύκολα διαπιστώνει κανείς ότι για τις SI-POFs καλύπτεται η προϋπόθεση $V \gg 1$ και επομένως, η γεωμετρική οπτική μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ικανοποιητική προσέγγιση στην περίπτωση αυτών των ινών. Με αυτή την παραδοχή απλοποιείται η μελέτη της διάδοσης, καθώς ο πυρήνας έχει τον ίδιο δείκτη διάθλασης κάθετα στον άξονά του και επομένως, το φως μπορεί να θεωρηθεί ότι διαδίδεται σαν ευθείες ακτίνες. Οι ακτίνες ανακλώνται στα όρια του πυρήνα με το μανδύα, όπως έχει φανεί και στο απλοποιημένο σχήμα Σχήμα 2.1(α). Κατά τα γνωστά, μία ακτίνα θα ανακλαστεί πλήρως όταν η συμπληρωματική της γωνίας πρόσπτωσης της στα όρια πυρήνα και μανδύα είναι μικρότερη από ή το πολύ ίση με την κρίσιμη γωνία. Η κρίσιμη γωνία από το νόμο του Snell είναι ίση με $\theta_c = \text{asin}(NA/n_{co})$. Οι ακτίνες μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε αυτές που διέρχονται από τον άξονα της ίνας μεταξύ ανακλάσεων κατά μήκος της διάδοσης (ακτίνες meridional) και σε αυτές που δεν περνούν ποτέ από τον άξονα της ίνας (ακτίνες skew) [96]. Οι meridional ακτίνες μπορούν να περιγραφούν από τη γωνία θ που σχηματίζουν με τον άξονα της ίνας, καθώς καθεμία τέτοια ακτίνα βρίσκεται πάντα σε ένα επίπεδο στα όρια της διαμέτρου της ίνας που περιλαμβάνει τον άξονα της ίνας κατά τη διάδοση του φωτός. Οι skew ακτίνες ακολουθούν ελικοειδή μονοπάτια κατά τη διάδοση και η νοητή προβολή τους πάνω στη διατομή της ίνας δημιουργεί τεθλασμένες που μπορεί με τη σειρά τους να δημιουργήσουν πολύγωνα. Για κάποιες από τις skew ακτίνες, η προβολή τους κατά την ανάκλασή τους στα όρια πυρήνα-μανδύα πάνω στο επίπεδο στο οποίο μεταδίδεται μία meridional ακτίνα, σχηματίζει γωνία με τον άξονα διάδοσης θ' η οποία είναι σταθερή. Τότε, ο χρόνος για τη μετάδοση μίας τέτοιας ακτίνας εξαρτάται από τη γωνία θ που σχηματίζεται με τον άξονα διάδοσης του φωτός. Τελικά, η γωνία θ που δημιουργείται από τις ακτίνες που περιγράφηκαν μπορεί να θεωρηθεί συνεχής για ίνες με μεγάλο πλήθος τρόπων και αυτό σημαίνει πολύ μικρές διαφορές χρόνων μεταξύ γειτονικών τρόπων.

Η περιγραφή με τις ακτίνες που μόλις δόθηκε αποτελεί απλοποιημένη εξέλιξη της διάδοσης καθώς υπάρχουν πρόσθετα θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάδοση. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν ακτίνες με συμπληρωματική της γωνίας πρόσπτωσης στα όρια πυρήνα-μανδύα στο διάστημα $\theta_c \leq \theta \leq \pi/2$, τότε πρέπει να υπολογιστεί και η απώλεια που θα προκύψει από τις διαθλάσεις. Άρα, στην περιγραφή των απωλειών κατά τη διάδοση πρέπει να μπου πρόσθετες παράμετροι που δεν έχουν να κάνουν αποκλειστικά με το υλικό κατασκευής του πυρήνα. Επιπροσθέτως, από το πλήθος των τρόπων που μπορεί να υποστηρίξει η ισχυρά πολύτροπη SI-POF, φαίνεται ότι εισάγεται περιορισμός από τη διασπορά των τρόπων. Οι δύο συνιστώσες που επιδρούν στην επιδείνωση των επιδόσεων μετά τη διάδοση σημάτων κατά μήκος μίας SI-POF είναι τα αντικείμενα των δύο υποενοτήτων που ακολουθούν.

2.3.2 Περιορισμοί λόγω απωλειών

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.4, οι απώλειες των SI-POFs ανά μονάδα μήκους εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Σε παρόμοια λογική με τις ίνες διοξειδίου πυριτίου οι μηχανισμοί που επιδρούν στις απώλειες διακρίνονται σε εγγενείς (intrinsic) και εξωγενείς (extrinsic) [97]. Τόσο για τους εγγενείς όσο και για τους εξωγενείς παράγοντες, ορίζονται οι υποκατηγορίες των μηχανισμών απορρόφησης και σκέδασης. Οι εγγενείς μηχανισμοί είναι έμφυτοι στο ίδιο το πολυμερές υλικό, ενώ οι εξωγενείς παράγοντες προκύπτουν κατά τη διαδικασία κατασκευής των ινών.

Όσον αφορά τους εγγενείς μηχανισμούς απορρόφησης, πρόκειται για απορροφήσεις από ηλεκτρονιακές μεταβάσεις (electronic transition absorption), οι οποίες είναι σχετικά

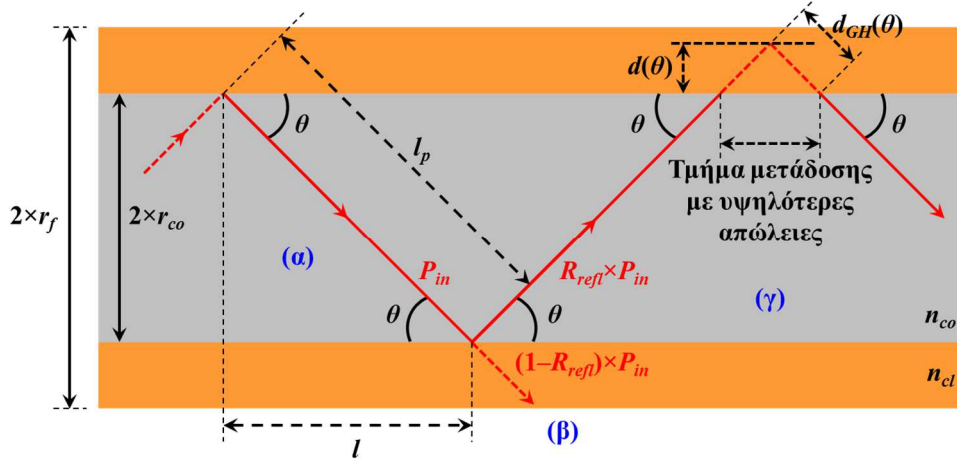
χαμηλές για το PMMA στην περιοχή του ορατού φάσματος, και για απορροφήσεις από μοριακές δονήσεις (molecular vibration absorption), που έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά. Η απορρόφηση από μοριακές δονήσεις παρατηρείται συνήθως σε μήκη κύματος στο υπέρυθρο φάσμα. Ωστόσο, εξαιτίας της δομής των μορίων των πολυμερών [98], αρμονικές απορρόφησης και συνδυασμοί από μπάντες απορρόφησης εμφανίζονται σε μήκη κύματος στο ορατό και στο κοντινό υπέρυθρο. Ο επικρατέστερος παράγοντας απορρόφησης από μοριακές δονήσεις, αλλά και ο σημαντικότερος παράγοντας εξασθένισης στις POFs είναι οι αρμονικές απορρόφησης των δεσμών C-H [97]. Οι εγγενείς απώλειες λόγω σκέδασης στα πολυμερή προκύπτουν από πολύ μικρές μεταβολές στην πυκνότητα του υλικού του πυρήνα [97], δηλαδή σε μεταβολές στο δείκτη διάθλασης. Αυτές οι μικρές μεταβολές είναι αιτίες ενεργοποίησης της σκέδασης Rayleigh, καθώς οι διαταραχές αυτές είναι υποπολλαπλάσιες σε μέγεθος του μήκους κύματος.

Όσον αφορά τις απώλειες από εξωγενείς παράγοντες, οι απορροφήσεις προκύπτουν από οργανικά μολύνοντα υλικά που έχουν απομείνει κατά την κατασκευή της ίνας και από ηλεκτρονιακές μεταβάσεις μέσα στα ίδια τα μολύνοντα υλικά, με αμελητέα, όμως, επίδραση. Μένοντας στους εξωγενείς παράγοντες εξασθένισης, η σκέδαση οφείλεται σε σκόνες, μικρο-κενά ή μικρο-ρωγμές, φυσαλίδες, διακυμάνσεις στη διάμετρο του πυρήνα, ατέλειες στα όρια πυρήνα-μανδύα, όλα λόγω αστοχιών κατά τη διαδικασία κατασκευής των ινών που προσανατολίζεται σε απλή παραγωγή χαμηλού κόστους. Αυτού του είδους η σκέδαση που αναφέρεται κάπως καταχρηστικά και σαν σκέδαση ανεξάρτητη από το μήκος κύματος [98]. Επιπλέον, αφορά «μεγάλες» δομές, όπως οι φυσαλίδες και οι ρωγμές, που ενσωματώνονται στον πυρήνα της ίνας κατά την κατασκευή [98], παραπέμποντας στη σκέδαση Mie. Με βελτιστοποίηση της διαδικασίας κατασκευής, η επίδραση των εξωγενών παραγόντων στις απώλειες μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Ενδεικτικά, για την περιοχή των 650 nm οι εγγενείς απορροφήσεις αντιστοιχούν σε συντελεστή εξασθένισης κοντά στα 120 dB/km, η σκέδαση Rayleigh αποδίδει συντελεστή εξασθένισης λίγο πάνω από 10 dB/km και οι υπόλοιποι εξωγενείς μηχανισμοί και ατέλειες έχουν ως αποτέλεσμα συντελεστή απωλειών που κυμαίνεται μεταξύ 10 dB/km και 40 dB/km [96], [99]. Αθροιστικά, αυτοί οι συντελεστές δίνουν την τιμή του συντελεστή εξασθένισης των PMMA SI-POFs μέσα στο όρια του περιγράφηκαν. Για τα παράθυρα μικρότερων απωλειών (Σχήμα 2.4), η απορρόφηση λόγω των εγγενών μηχανισμών μειώνεται σημαντικά, η εξασθένιση λόγω της σκέδασης Rayleigh αυξάνεται, επειδή τα παράθυρα αυτά βρίσκονται γύρω από μικρά μήκη κύματος κάτω από το υπέρυθρο φάσμα, και η εξασθένιση λόγω των εξωγενών μηχανισμών αυξάνεται ελαφρώς και τείνει να γίνει η ισχυρότερη συνιστώσα εξασθένισης [99].

Είναι προφανές ότι τα παράθυρα για επικοινωνίες με PMMA SI-POFs προκύπτουν εκεί όπου ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις των μηχανισμών εξασθένισης. Από την τυπική καμπύλη απωλειών για PMMA SI-POFs στο Σχήμα 2.4, οι περιοχές όπου οι απώλειες είναι μειωμένες είναι στα 530 nm, 570 nm και 650 nm, όλες στο ορατό φάσμα. Στο παράθυρο των 650 nm, πιθανές ολισθήσεις του μήκους κύματος της πηγής, πχ λόγω θερμοκρασίας, μπορεί να προκαλέσουν υποβάθμιση των επιδόσεων λόγω απότομης αύξησης των απωλειών από τη ολίσθηση. Επιπλέον, ο συντελεστής απωλειών της τάξης των 0.16 dB/m είναι μεγαλύτερος από τους αντίστοιχους συντελεστές απωλειών των δύο άλλων παραθύρων στα 530 nm και στα 570 nm. Παρά το ότι οι δύο τελευταίες περιοχές έχουν μεγαλύτερο εύρος και δεν υπάρχει κίνδυνος υποβάθμισης από πιθανές ολισθήσεις του μήκους κύματος των πηγών λόγω θερμοκρασίας, το παράθυρο στα 650 nm είναι αυτό που συνήθως χρησιμοποιείται σε ζεύξεις λόγω των φθηνών πηγών ώριμης τεχνολογίας με επαρκές φάσμα που υπάρχουν στο κόκκινο χρώμα. Ταυτόχρονα, για την επίτευξη ρυθμών της τάξης των λίγων gigabits και για τα επίπεδα

ισχύος εκπομπής που μπορούν να εφαρμοσθούν ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη ασφαλείας για τα ανθρώπινα μάτια φαίνεται ήδη ότι οι απώλειες θα περιορίσουν τα μήκη των ζεύξεων σε αποστάσεις μέχρι 100 μέτρα με χρήση κόκκινου χρώματος.

Οι απώλειες στις οποίες υπόκεινται οι ακτίνες και θα ληφθούν υπόψη στην εξήγηση των φαινομένων είναι αυτές που προκύπτουν λόγω των διαφορετικών μηκών που καλύπτουν διαφορετικές ακτίνες μέσα στην ίνα, λόγω των ανακλάσεων στα όρια πυρήνα-μανδύα και λόγω του φαινομένου Goos-Haechen. Οι τρεις περιπτώσεις απωλειών απεικονίζονται με τη σειρά στο Σχήμα 2.5, στα τμήματα (α), (β) και (γ), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι αυτές οι θεωρήσεις όπως απεικονίζονται αφορούν meridional ακτίνες. Ωστόσο, θεωρούνται επαρκείς για τις εκτιμήσεις των απωλειών σε ίνες μεγάλου πυρήνα και υψηλών απωλειών στο μανδύα [100].



Σχήμα 2.5. Πηγές εξασθένισης σε εξάρτηση με τη γωνία θ εξαιτίας (α) της διάδοσης, (β) των απωλειών στις ανακλάσεις και (γ) του φαινομένου Goos-Haenchen.

Οι απώλειες ισχύος λόγω της εξασθένισης για κάθε ακτίνα, που όπως αναφέρθηκε νωρίτερα περιγράφεται από τη γωνία θ που είναι η γωνία που σχηματίζεται με τον άξονα διάδοσης του φωτός, ορίζεται ως $a(\theta)$ και μετράται σε μονάδες 1/m. Αυτή θα εξαρτάται από τη γωνία θ (mode-dependent attenuation) και για ένα μήκος ίνας L μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$p(\theta, L) = p(\theta, 0) \times e^{-a(\theta) \times L} = p(\theta, 0) \times e^{-(a_p(\theta) + a_R(\theta) + a_{GH}(\theta)) \times L} \quad (2.2)$$

όπου $a_p(\theta)$, $a_R(\theta)$ και $a_{GH}(\theta)$ είναι οι τρεις συνιστώσες εξασθένισης και θα αναλυθούν σε συντομία, $p(\theta, L)$ είναι η ισχύς για την ακτίνα που περιγράφεται από τη γωνία θ στο μήκος L και $p(\theta, 0)$ είναι η ισχύς για την ίδια ακτίνα στην αρχή της ίνας. Όσον αφορά κάποια ακτίνα σε γωνία θ ως προς τον άξονα διάδοσης, θα έχει μετακινηθεί κατά τμήμα l_p , το οποίο σε σχέση με το πραγματικό μήκος της ίνας (l) μπορεί να εκφραστεί πολύ εύκολα ως: $l_p = l / \cos(\theta)$. Η πρώτη συνιστώσα απωλειών για τμήμα ίνας 1 μέτρου ($l = 1$ m) θα είναι

$$a_p(\theta) = a_{co} \times l_p = \frac{a_{co}}{\cos(\theta)} \quad (2.3)$$

με a_{co} το συντελεστή εξασθένισης του πυρήνα της ίνας που βρίσκεται μέσα σε ένα εύρος μεταξύ των τιμών 0.150 και 0.170 dB/m σε λογαριθμική κλίμακα, όπως έχει ήδη αναφερθεί (και απεικονίζει ο Πίνακας 2.2) και είναι το αποτέλεσμα των απορροφήσεων και των σκεδάσεων είτε λόγω εγγενών είτε λόγω εξωγενών μηχανισμών εξασθένισης. Η δεύτερη συνιστώσα απωλειών που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5(β) έχει να κάνει με το γεγονός ότι η ολική ανάκλαση δεν είναι τέλεια χωρίς απώλειες. Επομένως, σε κάθε ανάκλαση εμφανίζονται απώλειες, καθώς μικρή ποσότητα ισχύος διαθλάται στο

μανδύα. Για να γίνει αναγωγή ανά μονάδα μήκους, για ίνας μήκους $L' = 1$ m, το πλήθος των ανακλάσεων θα είναι $N_{ref} = L'/(2 \times r_{co}/\tan(\theta)) = \tan(\theta)/(2 \times r_{co})$, με $2 \times r_{co}/\tan(\theta)$ το μήκος μεταξύ δύο διαδοχικών ανακλάσεων. Για την περιγραφή των απωλειών στην ανάκλαση των ορίων πυρήνα-μανδύα, εισάγεται ένας παράγοντας ανακλάσεων R_{refl} , με $0 \leq R_{refl} \leq 1$ που εκφράζει το ποσοστό της ισχύος που παραμένει στον πυρήνα μετά από κάθε ανάκλαση. Μετά από ένα πλήθος N_{ref} ανακλάσεων, η ισχύς μίας ακτίνας θα υποβιβαστεί κατά μία ποσότητα $R_{refl}^{N_{ref}}$. Άρα, η δεύτερη συνιστώσα εξασθένισης (ανά μονάδα μήκους) θα είναι

$$e^{-a_R(\theta) \times l} = R_{refl}^{N_{ref}} \Rightarrow -a_R(\theta) = N_{ref} \times \ln(R_{refl}) \Rightarrow a_R(\theta) = -\frac{\tan(\theta)}{2 \times r_{co}} \times \ln(R_{refl}) \quad (2.4)$$

Η τρίτη συνιστώσα απωλειών έχει να κάνει με το φαινόμενο Goos-Haenchen. Η ολική ανάκλαση δε συμβαίνει αποκλειστικά στα όρια πυρήνα-μανδύα, αλλά συμβαίνει μέσα στο μανδύα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5(γ). Αυτό το πέρασμα της ακτίνας μέσα στο μανδύα της ίνας είναι αιτία πρόσθετων απωλειών από αυτές της απλής διάδοσης μέσα στον πυρήνα, εξαιτίας του πολύ μεγαλύτερου συντελεστή απωλειών στο μανδύα της ίνας που μπορεί να φθάσει ακόμα και μία τιμή $a_{cl} = 50000$ dB/km [96]. Το βάθος στο οποίο διεισδύει η ακτίνα μέσα στο μανδύα εξαρτάται από τη γωνία θ και ορίζεται ως [96]

$$d(\theta) = \frac{\lambda}{2 \times \pi \times \sqrt{n_{co}^2 \times \{\cos(\theta)\}^2 - n_{cl}^2}} \quad (2.5)$$

Το μήκος που καλύπτει η ακτίνα μέσα στο μανδύα μέχρι το σημείο ανάκλασης είναι $d_{GH}(\theta) = d(\theta)/\sin(\theta)$. Η ακτίνα χρειάζεται το διπλάσιο μήκος για να εισέλθει ξανά στον πυρήνα. Με αναγωγή ανά μονάδα μήκους, για N_{ref} ανακλάσεις ανά μέτρο, η τρίτη συνιστώσα εξασθένισης, θα είναι

$$a_{GH}(\theta) = a_{cl} \times 2 \times d_{GH}(\theta) \times N_{ref} = a_{cl} \times 2 \times \frac{d(\theta)}{\sin(\theta)} \times \frac{\tan(\theta)}{2 \times r_{co}} = \frac{a_{cl} \times d(\theta)}{r_{co} \times \cos(\theta)} \quad (2.6)$$

Τελικά, $a(\theta) = a_P(\theta) + a_R(\theta) + a_{GH}(\theta)$.

2.3.3 Περιορισμοί λόγω διασποράς των τρόπων

Ως πολύτροπη ίνα, η PMMA SI-POF μεγάλου πυρήνα θα επηρεάζεται σημαντικά από τη διασπορά των τρόπων, ένα φαινόμενο κατά το οποίο οι παλμοί ενός σήματος διευρύνονται χρονικά μετά τη διάδοση κατά μήκος μίας τέτοιας ίνας. Το πρόβλημα τη διεύρυνσης των παλμών εμφανίζεται λόγω των διαφορετικών χρόνων άφιξης των τρόπων στο άκρο της ίνας μετά τη διάδοσή τους. Λαμβάνοντας υπόψη την ακτινική θεώρηση, στις SI-POFs, οι ακτίνες αφικνούνται στο άλλο άκρο της ζεύξης σε διαφορετικούς χρόνους. Οι διαφορετικοί χρόνοι διάδοσης των ακτίνων οφείλονται στα διαφορετικά μήκη μονοπατιών (Σχήμα 2.1(α)). Ακτίνες που διαδίδονται με μεγαλύτερη γωνία θ θα καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις και κατ' επέκταση οι χρόνοι διάδοσης θα είναι μεγαλύτεροι. Με τη βοήθεια της (2.3) και από το Σχήμα 2.5, σε ένα μήκος ίνας L , για μία ακτίνα διαδιδόμενη υπό γωνία θ θα συμβεί μία ανάκλαση ανά τμήμα μήκους l με $L = N'_{ref} \times l$, όπου N'_{ref} το πλήθος των ανακλάσεων στο μήκος L . Το μήκος που θα καλύψει η ακτίνα θα είναι $L_p = N'_{ref} \times l_p = N'_{ref} \times l/\cos(\theta) = L/\cos(\theta)$. Θέτοντας ως c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, και θεωρώντας μόνο τα μήκη που καλύπτει η ακτίνα κατά τη διάδοσή της, ο χρόνος για να διαδοθεί μία ακτίνα υπό γωνία θ ως προς τον άξονα διάδοσης για μήκος ίνας ίσο με L θα είναι

$$t_{transit} = \frac{L_p}{c/n_{co}} = \frac{L}{\cos(\theta)} \times \frac{n_{co}}{c} \quad (2.7)$$

Θεωρώντας ένα μεγάλο πλήθος διαδιδόμενων ακτίνων, που σημαίνει ότι η γωνία θ είναι συνεχής μεταβλητή, το αποτέλεσμα των διαφορετικών καθυστερήσεων των ακτίνων στο άκρο εξόδου της ίνας θα είναι η περιβάλλουσα αυτών όπου πια δε θα είναι δυνατή η διάκριση των διαφορετικών ακτίνων. Η μορφή της περιβάλλουσας έχει μία μορφή διευρυμένου παλμού και αντιστοιχεί σε μία μορφή χαμηλοπερατού φίλτρου.

Η μέγιστη διεύρυνση του παλμού στην έξοδο της ίνας μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά του μέγιστου από τον ελάχιστο χρόνο διάδοσης και αντιστοιχεί στις γωνίες $\theta = \theta_c$ και $\theta = 0^\circ$, αντίστοιχα. Ο μέγιστος χρόνος, ο ελάχιστος χρόνος διάδοσης και η διαφορά των δύο που αντιστοιχεί στη χρονική διεύρυνση είναι αντίστοιχα

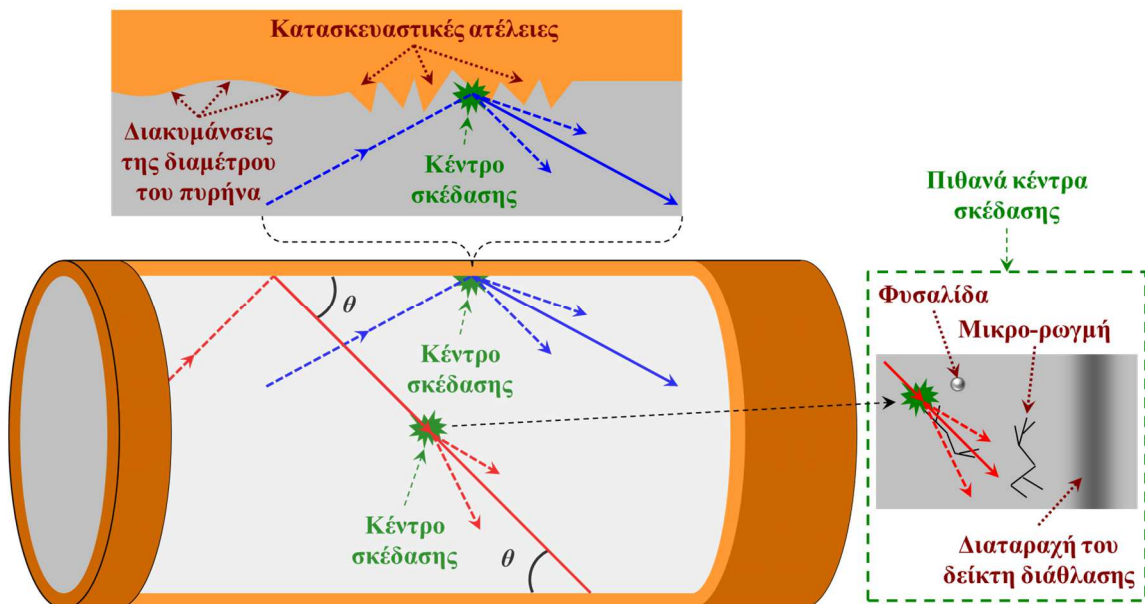
$$t_{tr,max} = \frac{L}{\cos(\theta_c)} \times \frac{n_{co}}{c}, \quad t_{tr,min} = L \times \frac{n_{co}}{c}, \quad \Delta t_{tr} = t_{tr,max} - t_{tr,min} = \frac{L \times n_{co}}{c} \times \left(\frac{1}{\cos(\theta_c)} - 1 \right) \quad (2.8)$$

με θ_c την κρίσιμη γωνία.

2.3.4 Σύζευξη των τρόπων

Η σύζευξη των τρόπων είναι ένα κρίσιμο ζήτημα. Αφορά τη μεταφορά ισχύος μεταξύ τρόπων. Αυτή η μεταφορά ισχύος μπορεί να συμβεί σε κέντρα σκέδασης μέσα στην ίνα. Όπως σημειώθηκε νωρίτερα στην παράγραφο 2.3.2, τα κέντρα σκέδασης εγγενή ή εξωγενή θα προκαλέσουν αύξηση των απωλειών. Από την άλλη, ο μηχανισμός της σκέδασης είναι ο λόγος για τη μεταφορά ισχύος μεταξύ τρόπων*. Περιοχές στις οποίες μπορεί να συμβεί σκέδαση κατά τη διάδοση του φωτός διακρίνονται στο Σχήμα 2.6.

Ως εγγενής μηχανισμός, οι μικρές διαταραχές του δείκτη διάθλασης λόγω μεταβολών στην πυκνότητα του πυρήνα (σκέδαση Rayleigh) είναι πάντα παρούσες λόγω υλικού και μπορούν να θεωρηθούν ως κέντρα σκέδασης στην ίνα. Από την άλλη, ως εξωγενείς παράγοντες, σκόνες, μικρο-κενά ή μικρο-ρωγμές και φυσαλίδες μπορούν να αποτελέσουν επίσης κέντρα σκέδασης στην ίνα. Εκτός από τον πυρήνα, σύζευξη ισχύος μεταξύ τρόπων μπορεί να συμβεί και στα όρια πυρήνα-μανδύα λόγω κατασκευαστικών ατελειών.



Σχήμα 2.6. Σύζευξη των τρόπων μέσα στην ίνα σε κέντρα σκέδασης είτε μέσα στον πυρήνα είτε στα όρια πυρήνα-μανδύα.

* Εδώ θεωρείται ότι υπάρχει ισοδυναμία μεταξύ τρόπων και ακτίνων.

Στο μοντέλο του καναλιού που θα περιγραφεί, η σύζευξη ισχύος μεταξύ τρόπων μοντελοποιείται ως διαδικασία διάχυσης (diffusion process), όπου η σύζευξη ισχύος μπορεί να συμβεί μόνο μεταξύ γειτονικών τρόπων [96]. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο περιγραφής της σύζευξης ισχύος και την ενσωμάτωσή της στην σχετική εξίσωση ροής ισχύος που περιγράφει το κανάλι της SI-POF μπορούν να βρεθούν στις αναφορές [96], [101].

Σε αυτό το σημείο θα εξηγηθεί σε συντομία η αναγωγή από τρόπους σε ακτίνες και κατ' επέκταση σε γωνίες θ που σχηματίζονται με τον άξονα της ίνας. Για το μεγάλο πλήθος τρόπων της SI-POF, ένα πλήθος τρόπων μπορούν να «αντιπροσωπευτούν» από ένα αριθμό m . Τότε, ο εγκάρσιος κυματάρθρωτος για την m -οστή ομάδα τρόπων θα είναι $u_m = \pi \times m / (2 \times r_{co})$ [101]. Σε αυτή την περίπτωση, η διεύθυνση διάδοσης μίας ομάδας τρόπων μέσα στην ίνα θα είναι $\theta_m = u_m / (2 \times n_{co} \times \pi / \lambda) = \lambda \times m / (4 \times r_{co} \times n_{co})$ [101]. Η γωνία θ_m συνεχίζει να αποτελεί γωνία που σχηματίζεται με τον άξονα διάδοσης, όπως φάνηκε στα παραδείγματα στο Σχήμα 2.5. Η διαφορά των γωνιών δύο γειτονικών ομάδων τρόπων θα είναι $\Delta\theta = \theta_{m+1} - \theta_m = \lambda / (4 \times r_{co} \times n_{co})$. Για την τελική σχέση της ροής ισχύος, η παράμετρος θ θεωρείται συνεχής [101] και το μοντέλο των ακτίνων παραμένει ικανοποιητικό. Λόγω της θεώρησης συνεχούς γωνίας θ , οι διαφορές ισχύος γειτονικών ομάδων τρόπων θα αντικατασταθούν από διαφορικά για να προκύψει μία εξίσωση ροής ισχύος που είναι συνεχής όχι μόνο στο χρόνο και στο μήκος διάδοσης, αλλά και στο εύρος των γωνιών που σχηματίζονται με τον άξονα διάδοσης.

2.4 Θερμική κατεργασία – Βελτιώσεις

Έχοντας διακρίνει τους περιορισμούς που εισάγουν οι PMMA SI-POFs μεγάλου πυρήνα όσον αφορά τις απώλειες και την επίδραση της διασποράς των τρόπων, στην ενότητα 2.2 τέθηκε το ζήτημα της επέμβασης στο ίδιο το μέσο για την πιθανή βελτίωση των δυνατοτήτων της ίνας μέσω του περάσματος της ίνας από κάποια διαδικασία θέρμανσης. Αρχικά, από πειράματα σε bulk PMMA υλικό είχε αποδειχθεί αλλαγή του δείκτη διάθλασης του υλικού με την αλλαγή της θερμοκρασίας [94]. Αυτή η αλλαγή ήταν πτωτική με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό ήταν το σημείο εκκίνησης στην αναφορά [95]. Στη συγκεκριμένη αναφορά, έγινε αποκλειστικά η θεώρηση ότι η σχετική καθυστέρηση για τη διάδοση δύο ακραίων ακτίνων μέσα στην ίνα, της πιο γρήγορης η οποία συμπίπτει με τον άξονα της ίνας και της πιο αργής η οποία είναι αυτή που ανακλάται στα όρια πυρήνα-μανδύα με γωνία πρόσπτωσης στον μανδύα τη συμπληρωματική της κρίσιμης γωνίας, είναι $\Delta t = L_f \times n_{co} \times \Delta / (2 \times c)$, όπου L_f είναι το μήκος της ίνας, $\Delta = (n_{co} - n_{cl}) / n_{cl}$, n_{co} είναι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα, n_{cl} είναι ο δείκτης διάθλασης του μανδύα, $\text{acos}(\cdot)$ είναι η αντίστροφη συνάρτηση του ημιτόνου και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Έπειτα, θεωρήθηκε ότι οι αλλαγές στο δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της POF λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας θα είναι ίδιες με αυτές τις αλλαγές που θα εμφανιστούν στο δείκτη διάθλασης του bulk PMMA υλικού που υπόκειται σε θέρμανση. Επίσης, η ποσότητα Δ θεωρείται ότι μένει σταθερή. Με αυτές τις παραδοχές υπολογίζεται η (διασπορά των τρόπων) Δt για ένα συγκεκριμένο μήκος ίνας και προκύπτει φθίνουσα, λόγω φθίνουσας συμπεριφοράς του n_{co} με τη θερμοκρασία. Τέλος, το (ηλεκτρικό) εύρος ζώνης του καναλιού θεωρήθηκε B και τέθηκε το όριο $\Delta t \times B \approx 0.44$ [102]. Οπότε, για ένα συγκεκριμένο μήκος POF L_f , μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στο εύρος ζώνης. Με δεδομένη την μείωση του δείκτη διάθλασης με τη θερμοκρασία, το αποτέλεσμα ήταν η αύξηση του εύρους ζώνης της ίνας. Προφανώς, αυτή η θεώρηση ήταν τελείως προσεγγιστική και απλουστευμένη. Αυτό που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη ήταν η πειραματική μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στο εύρος ζώνης, αλλά και στις απώλειες, σε εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα SI-POFs από PMMA υλικό. Η αλλαγή της θερμοκρασίας επιβλήθηκε απευθείας σε οπτικές ίνες συγκεκριμένων μηκών. Επιπλέον, η πειραματική μελέτη ενισχύθηκε με την απαιτούμενη θεωρητική δικαιολόγηση.

2.4.1 Θεωρητική περιγραφή φαινομένων

Το μοντέλο του καναλιού που υιοθετήθηκε για την SI-POF βασίζεται στην χρονικά εξαρτώμενη εξίσωση ροής ισχύος [96]. Με αυτό το μοντέλο ενσωματώνονται οι απώλειες που είναι εξαρτώμενες από τον τρόπο ή ορθότερα από την ακτίνα και είναι συνάρτηση της γωνίας θ που σχηματίζεται με τον άξονα της ίνας, η διασπορά των τρόπων και η σύζευξη των τρόπων. Η εξίσωση αυτή ακολουθεί [96]

$$\frac{\partial p(\theta, z, t)}{\partial z} = -a(\theta) \times p(\theta, z, t) - \tau_{tr,rel}(\theta) \times \frac{\partial p(\theta, z, t)}{\partial t} + \frac{1}{\theta} \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\theta \times D(\theta) \times \frac{\partial p(\theta, z, t)}{\partial \theta} \right] \quad (2.9)$$

όπου η παράμετρος θ είναι η γωνία διάδοσης ως προς τον άξονα της ίνας, η παράμετρος z αφορά τη διάσταση του μήκους, t είναι η μεταβλητή του χρόνου, $p(\theta, z, t)$ είναι η κατανομή ισχύος στην γωνία, στην απόσταση διάδοσης και στο χρόνο διάδοσης, αντίστοιχα. Για την παράμετρο $a(\theta)$ ισχύει ότι $a(\theta) = a_P(\theta) + a_R(\theta) + a_{GH}(\theta)$ και είναι ο συντελεστής εξασθένισης της ίνας που εξαρτάται από τη γωνία θ και $a_P(\theta)$, $a_R(\theta)$, $a_{GH}(\theta)$ είναι οι τρεις συνιστώσες εξασθένισης που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 2.3.2. Η διασπορά των τρόπων αντιπροσωπεύεται από την ποσότητα $\tau_{tr,rel}(\theta)$ που είναι η καθυστέρηση της ομάδας τρόπων που χαρακτηρίζονται από την γωνία θ κανονικοποιημένη ως προς το μήκος της ζεύξης, δηλαδή ως προς ένα μήκος ίσο με 1 m. Ωστόσο, με τη βοήθεια της (2.8), αν αφαιρεθεί η επίδραση της κανονικοποιημένης καθυστέρησης διάδοσης n_{co}/c της ακτίνας που αντιστοιχεί σε γωνία $\theta = 0^\circ$ και είναι κοινή σε όλες τις ακτίνες, τότε η $\tau_{tr,rel}(\theta)$ γίνεται κανονικοποιημένη σχετική καθυστέρηση και υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$\tau_{tr,rel}(\theta) = \frac{n_{co}}{c} \times \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Η ποσότητα $D(\theta)$ είναι ο συντελεστής σύζευξης που εξαρτάται από τον τρόπο (mode-dependent coupling coefficient). Ο συντελεστής σύζευξης σχετίζεται με όλες τις πηγές σκέδασης και θα θεωρηθεί ανεξάρτητος από τη γωνία. Σύμφωνα με την [103], αυτή η επιλογή θα οδηγήσει σε ασήμαντη απόκλιση από τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν στην περίπτωση όπου οι συντελεστές σύζευξης ήταν συναρτήσεις της γωνίας θ , όπως στην [104]. Έτσι, στην (2.9) ο συντελεστής $D(\theta)$ αντικαθίσταται από ένα παράγοντα D . Τυπικές τιμές του συντελεστή σύζευξης D για PMMA SI-POFs διαφορετικών κατασκευαστών χωρίς τάσεις (από τεντώματα) (unstrained ίνες) καλύπτουν ένα εύρος μεταξύ 1×10^{-4} και $10 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$ [103], [105], [106], [107].

Συνδέοντας ροή ισχύος και σύζευξη αυτής μεταξύ τρόπων, υπό την υπόθεση ότι μία στενή και καλά εστιασμένη οπτική δέσμη εισάγεται στο κεντρικό τμήμα του πυρήνα στην έδρα εισόδου της SI-POF, διεγείροντας μόνο τους τρόπους κατώτερης τάξης, η προέλευση της ενεργοποίησης τρόπων υψηλότερης τάξης είναι οι ανομοιογένειες (πυκνότητα του υλικού) και οι ακαθαρσίες (σκόνες, μικρο-κενά ή μικρο-ρωγμές, φυσαλίδες) στον πυρήνα, καθώς και οι κατασκευαστικές ατέλειες στα όρια πυρήνα-μανδύα που δρουν σαν κέντρα σκέδασης για την προσπίπτουσα οπτική δέσμη, όπως έχει ήδη περιγραφεί στην υποενότητα 2.3.4 και έχει απεικονιστεί στο Σχήμα 2.6. Αυτές οι σκεδάσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη σύζευξη της οπτικής ισχύος και σε τρόπους υψηλότερης τάξης και κατά συνέπεια, το χαμηλότερο εύρος ζώνης εξαιτίας της σωρευμένης διασποράς των τρόπων στο τέλος της ίνας.

Επομένως, αν υπήρχε ένας μηχανισμός που θα εξάλειφε όσο το δυνατό περισσότερα κέντρα σκέδασης κατά μήκος μίας SI-POF, το μήκος σύζευξης (coupling length) (πέρα από το οποίο ισχύει η EMD) θα αυξανόταν, ενώ δε θα ενεργοποιούνταν αμέσως υψηλότερης τάξης τρόποι σε μικρά μήκη. Η σύζευξη ισχύος μεταξύ τρόπων εξαιτίας των ανομοιογενειών που αντιστοιχούν από τη μία σε μεταβολές του δείκτη διάθλασης κατά

μήκος του πυρήνα λόγω εγγενών ή εξωγενών μηχανισμών (όπως φυσαλίδες, ρωγμές κ), και από την άλλη στις ατέλειες στα όρια πυρήνα-μανδύα φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της σωρευμένης διασποράς των τρόπων μετά τη διάδοση [103]. Επομένως, αυτός ο επιθυμητός μηχανισμός θα έπρεπε να μετριάξει την επίδραση που έχουν οι δύο «περιοχές» σκέδασης στο εύρος ζώνης της ίνας.

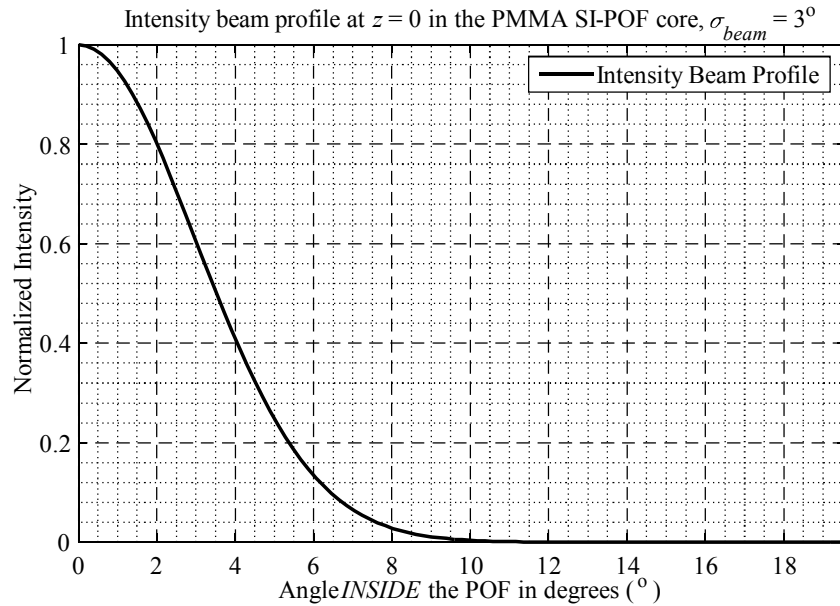
Θεωρώντας την άμεση σύνδεση μεταξύ της πηγής και της SI-POF και διατηρώντας όλες τις παραμέτρους της εξίσωσης ροής ισχύος στην (2.9) σταθερές εκτός από το συντελεστή σύζευξης, όταν ο συντελεστής σύζευξης για μία SI-POF μειωθεί, το μήκος σύζευξης θα αυξηθεί και το ίδιο θα συμβεί και για το εύρος ζώνης για ένα συγκεκριμένο μήκος (μικρότερο από το μήκος σύζευξης) [106]. Μία θεωρητική εκτίμηση μπορεί να δοθεί από την επίλυση της (2.9) ώστε να προκύψει η απόκριση συχνότητας της SI-POF και μέσω αυτής το οπτικό εύρος ζώνης στα 3 dB του καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, η μερική διαφορική εξίσωση ροής ισχύος της (2.9) εξαρτάται από το χρόνο και για να εκτιμηθεί η απόκριση συχνότητας, θα πρέπει να μετατραπεί στο χώρο των συχνοτήτων με εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier μέσω της σχέσης $P(\theta, z, \omega) = F\{p(\theta, z, t)\}$. Με αυτό τον τρόπο, υπάρχει πρόσθετο κέρδος που έχει να κάνει με την εξάλειψη της παραγωγή ως προς το χρόνο στο δεύτερο όρο του δεξιού μέλους της (2.9) και έτσι, αυτή η εξίσωση γίνεται:

$$\frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial z} = -[a(\theta) + j \times \omega \times \tau_{tr,rel}(\theta)] \times P(\theta, z, \omega) + \frac{1}{\theta} \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\theta \times D \times \frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta} \right] \quad (2.11)$$

Η εξίσωση (2.11) με παραγώγους μόνο ως προς την απόσταση και την γωνία μπορεί να λυθεί αριθμητικά με την εφαρμογή κάποιου σχήματος πεπερασμένων διαφορών. Για την εξαγωγή της απόκρισης συχνότητας $P(\theta, z, \omega)$ στην (2.11) έχουν εφαρμοσθεί διάφορες τεχνικές. Ενδεικτικά, η εξίσωση ροής ισχύος έχει λυθεί αναλυτικά [108] χωρίς αριθμητική επίλυση, αλλά σε αυτή την προσέγγιση εισάγονται υπό συνθήκες περιορισμοί ακρίβειας των εκτιμώμενων αποτελεσμάτων. Οι αριθμητικές τεχνικές επίλυσης διαφορικών εξισώσεων όπως αυτή στην (2.11) δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα. Η απόκριση συχνότητας των SI-POFs έχει εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια με εφαρμογή της Μεθόδου Ρητών Πεπερασμένων Διαφορών (Explicit Finite Difference Method) σε συμβατική μορφή [103] και με εφαρμογή πράξεων πινάκων μετά την μετατροπή των παραγώγων σε λόγους πεπερασμένων διαφορών [109]. Άλλη μέθοδος, με διαμερίσεις στις διαστάσεις της απόστασης και της γωνίας και με ξεχωριστή επίλυση του πρώτου και του δεύτερου όρου του δεξιού μέλους της (2.11) ανά βήμα, έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απόκρισης συχνότητας της SI-POF [110]. Εδώ, εφαρμόστηκε η Μέθοδος των Συνεπαγόμενων Πεπερασμένων Διαφορών (Implicit Finite Difference Method) και πιο συγκεκριμένα το σχήμα Crank-Nicolson [96]. Η επίλυση περιγράφεται εκτενώς στην αναφορά [96]. Οι οριακές συνθήκες περιγράφονται στην ενότητα Π.1 του παραρτήματος.

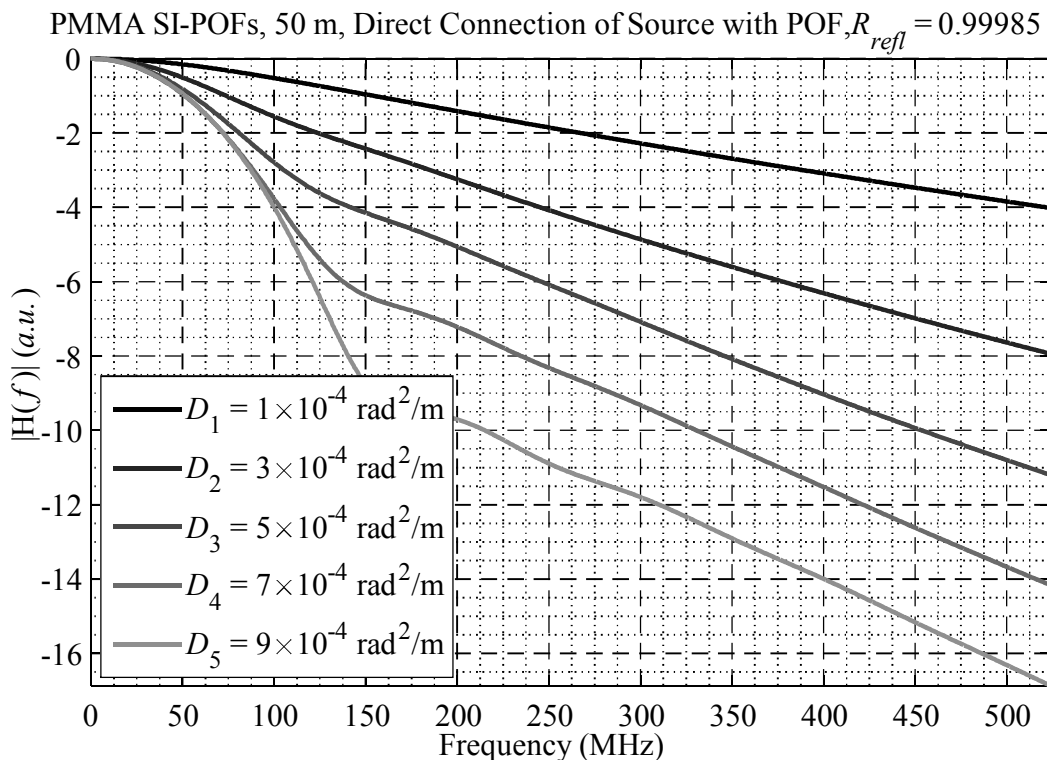
Επιστρέφοντας στην εκτίμηση της επίδρασης του συντελεστή σύζευξης (D) στην απόκριση συχνότητας της SI-POF, η (2.11) λύθηκε για PMMA SI-POFs μήκους 50 μέτρων. Ο συντελεστής εξασθένισης της ίνας τέθηκε $a_{co} = 0.15/(10 \times \log_{10}(e)) \approx 0.03454$ 1/m, θεωρώντας την αντίστοιχη τιμή στην κλίμακα των dB ίση με 0.15 dB/m. Η ακτίνα της ίνας τέθηκε ίση με $r_{co} = 490$ μm. Ο παράγοντας ανακλάσεων R_{refl} τέθηκε σε τιμή ίση με 0.99985. Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα (n_{co}) τέθηκε ίσος με 1.492. Το αριθμητικό άνοιγμα τέθηκε ίσο με αυτό μίας τυπικής SI-POF, δηλαδή 0.5. Το μήκος κύματος εκπομπής θεωρήθηκε $\lambda = 650$ nm. Η επίδραση του φαινόμενου Goos-Haenchen θεωρήθηκε πολύ μικρή. Η δέσμη θεωρήθηκε ότι εισερχόταν στο κεντρικό τμήμα του πυρήνα και είχε Gaussian κατανομή κατά τη γωνία θ με τυπική απόκλιση (σ_{beam}) 3° μέσα στον πυρήνα της POF στο σημείο $z = 0$. Θεωρώντας κυκλική συμμετρία στην επιφάνεια του πυρήνα κατά την είσοδο της δέσμης, ο λοβός της δέσμης σε καρτεσιανό

σύστημα συντεταγμένων δίνεται στο Σχήμα 2.7. Πρόκειται για την κανονικοποιημένη γωνιακή κατανομή της ισχύος της δέσμης μέσα στην ίνα. Αυτό το προφίλ της δέσμης ισοδυναμεί με την είσοδο μίας δέσμης laser στο ορατό φως απευθείας μέσα στην ίνα χωρίς τη μεσολάβηση κάποιας διάταξης μεταξύ πηγής και ίνας που θα προκαλούσε άνοιγμα της δέσμης.



Σχήμα 2.7. Κανονικοποιημένη γωνιακή κατανομή της στενής δέσμης μέσα στην ίνα προτού ξεκινήσει η διάδοση.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον συντελεστή σύζευξης ήταν διαδοχικά $[1, 3, 5, 7, 9] \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$. Τα αντίστοιχα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας που προέκυψαν από την επίλυση της (2.11) απεικονίζονται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8. Μέτρο της απόκρισης συχνότητας που παράγεται για διάφορες τιμές του συντελεστή σύζευξης (D). $R_{refl} = 0.99985$.

Από τα αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι το εύρος ζώνης αυξάνεται με την μείωση του συντελεστή σύζευξης. Αντιστρόφως, καθώς ο συντελεστής σύζευξης αυξάνεται, γίνεται εντονότερη η σύζευξη ισχύος μεταξύ γειτονικών τρόπων. Αυτό, όμως, οδηγεί και σε εντονότερη σύζευξη ισχύος σε τρόπους που προσπίπτουν στα όρια του πυρήνα με το μανδύα. Ο ρυθμός μείωσης του εύρους ζώνης τείνει να ελαχιστοποιηθεί με τη μεγαλύτερη αύξηση του D . Για μεγάλες τιμές του D οι μεταβολές στο εύρος ζώνης που θα προέκυπταν θα ήταν μικρές, διότι από την εντονότερη σύζευξη ισχύος μεταξύ τρόπων θα μεταφερόταν ισχύς και στους κεντρικούς τρόπους, οπότε η διέγερση τρόπων στα όρια διαχωρισμού του πυρήνα με το μανδύα θα μετριαζόταν από τη μεταφορά ισχύος προς το κέντρο. Ταυτόχρονα, με δεδομένο ότι δεν είναι τέλεια τα όρια πυρήνα-μανδύα (Σχήμα 2.6), ισχύς θα κόβεται κατά τη διάδοση εξαιτίας της ακτινοβόλησης εκτός του πυρήνα, μειώνοντας τους τρόπους υψηλότερης τάξης, οι οποίοι όμως θα επανεμφανιστούν γρήγορα με την έντονη σύζευξη ισχύος. Για PMMA SI-POFs με μεγάλο συντελεστή σύζευξης ($\text{px} \geq 7 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$ στο Σχήμα 2.8), είναι αναμενόμενο η κατάσταση EMD να έχει επιτευχθεί σε αποστάσεις πολύ κάτω από τα 50 μέτρα που δοκιμάστηκαν [111], παρά το ότι το ακριβές μήκος εξαρτάται από το μοντέλο της ίνας. Μετά την επίτευξη της EMD, η πτώση του εύρους ζώνης επέρχεται με μικρότερο ρυθμό με την περαιτέρω αύξηση του μήκους [112]. Οπότε, για μεγαλύτερες αποστάσεις, οι SI-POFs ίνες με υψηλό συντελεστή σύζευξης που είναι κατώτερων επιδόσεων για τα μικρά μήκη θα αρχίσουν να έχουν παραπλήσιο εύρος ζώνης με ίνες μικρότερου συντελεστή σύζευξης [106], για τις οποίες η απόσταση επίτευξης της EMD είναι μεγαλύτερη.

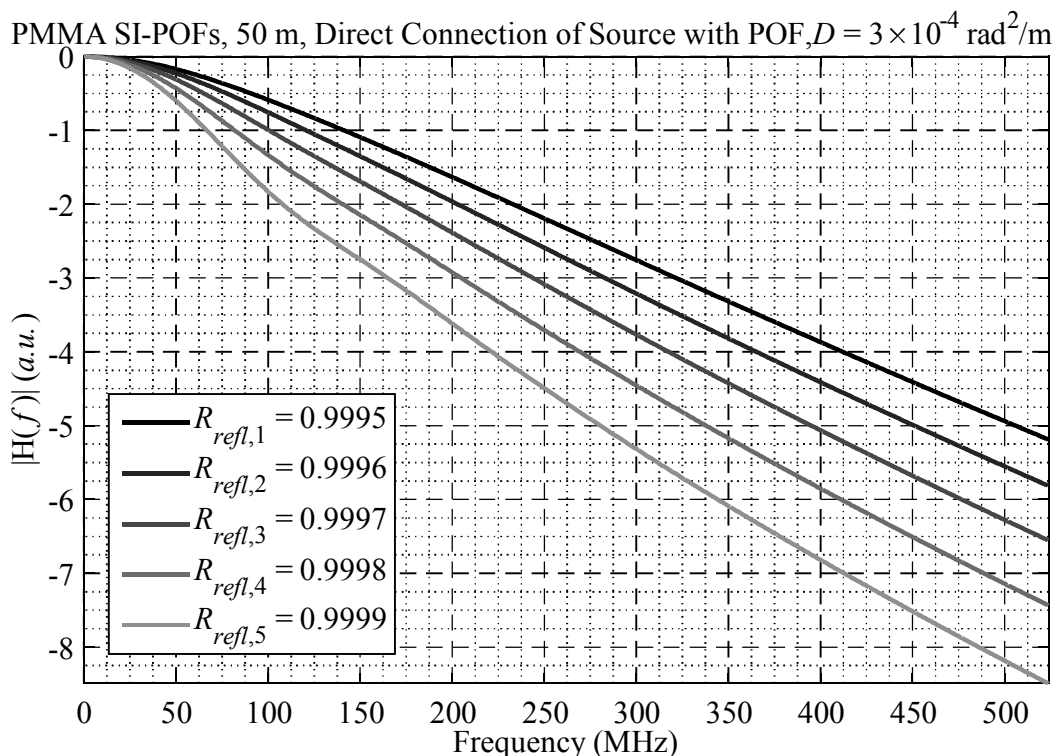
Η ταλάντωση γύρω από τη λύση μερικών διαφορικών εξισώσεων της μορφής της (2.11) όταν αυτές επιλύονται με τη μέθοδο Crank-Nicolson είναι αιτία των ασυνεχειών μεταξύ των αρχικών συνθηκών και των οριακών συνθηκών [113]. Οι οριακές συνθήκες επιβάλλονται κατά την επίλυση της εξίσωσης επειδή υπάρχει ασυνέχεια στα όρια της μέγιστης γωνίας διάδοσης σύμφωνα. Εδώ επιλέχθηκε η κάλυψη της ανισότητας $D \times \Delta z / (\Delta \theta^2) < 1/2$ για τις τιμές του D που δοκιμάστηκαν, με Δz το βήμα στο μήκος της ίνας και $\Delta \theta$ το βήμα στις γωνίες διάδοσης (μέσα στην ίνα) κατά μήκος της POF. Πιο συγκεκριμένα, τέθηκαν $\Delta z = 15.625 \times 10^{-3} \text{ m}$ και $\Delta \theta = \text{asin}(NA/n_{co})/50$, ώστε να ισχύει η ανισότητα και να είναι όσο το δυνατόν ελαχιστοποιημένες οι ταλαντώσεις. Από το σχήμα, φαίνεται ότι οι ταλαντώσεις είναι εντονότερες για την περίπτωση της μεγάλης τιμής του D . Επιπλέον, περαιτέρω επιβάρυνση προκύπτει και από την υψηλή τιμή του παράγοντα ανακλάσεων (R_{refl}), καθώς δεν υποβιβάζεται η ισχύς για τους ακραίους τρόπους (ως προς τη γωνία μέσα στην ίνα), οπότε οι ταλαντώσεις δεν εξαφανίζονται πλήρως παρά την κάλυψη της συνθήκης που αναφέρθηκε ($D \times \Delta z / (\Delta \theta^2) > 1/2$). Η κάλυψη της τελευταίας ανισότητας θα αρκούσε αν στην εξίσωση (2.11) απουσίαζε ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος και επιπλέον δεν υπήρχε η γωνία θ στο δεύτερο όρο, έχοντας η (2.11) την απλούστερη μορφή $\partial P(\theta, z, \omega) / \partial z = D \times \partial^2 P(\theta, z, \omega) / \partial z^2$. Ωστόσο, εδώ απομονώθηκε η επίδραση του παράγοντα σύζευξης στο εύρος ζώνης, ενώ οι ταλαντώσεις ήταν σε αποδεκτά επίπεδα παρά την πολυπλοκότερη μορφή της (2.11). Συγκεντρωτικά, ο Πίνακας 2.3 περιέχει τις τιμές του οπτικού εύρους ζώνης στα 3 dB που προέκυψαν για τις τιμές του συντελεστή σύζευξης που εφαρμόστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο πρώτες στήλες περιλαμβάνουν τους συντελεστές σύζευξης και τις τιμές εύρους ζώνης από τις προσομοιώσεις, αντίστοιχα.

Πίνακας 2.3. Τιμές οπτικού εύρους ζώνης από τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας στο Σχήμα 2.8 και στο Σχήμα 2.9 για τις τιμές του συντελεστή σύζευξης (D) και του παράγοντα ανακλάσεων (R_{refl}) που εξετάστηκαν, αντίστοιχα.

Συντελεστής σύζευξης ($D - \text{rad}^2/\text{m}$)	Οπτικό εύρος ζώνης (MHz)	Παράγοντας ανακλάσεων (R_{refl})	Οπτικό εύρος ζώνης (MHz)
1×10^{-4}	388.74	0.9995	321.5439

3×10^{-4}	185.25	0.9996	282.9018
5×10^{-4}	105.40	0.9997	243.8986
7×10^{-4}	88.66	0.9998	204.7818
9×10^{-4}	87.37	0.9999	165.1249

Επίδραση στο εύρος ζώνης έχει και η ποιότητα της επιφάνειας στα όρια του πυρήνα με το μανδύα. Όπως φάνηκε στο Σχήμα 2.6, στα όρια πυρήνα με μανδύα είναι πιθανή η ενεργοποίηση τρόπων υψηλής τάξης. Εκτός από αυτό, όμως, εισάγονται και πρόσθετες απώλειες, όπως φάνηκε στο Σχήμα 2.5(β). Αυτό σημαίνει ότι ενώ λόγω των κέντρων σκέδασης θα εμφανίζονται νέοι τρόποι, κάποια ποσότητα ισχύος θα φεύγει εκτός πυρήνα μειώνοντας την ισχύ για κάποιον/ους τρόπο/ους. Το ερώτημα που γεννάται είναι πώς ο παράγοντας ανακλάσεων R_{refl} επηρεάζει το εύρος ζώνης. Μειώνοντας τον παράγοντα R_{refl} , η ισχύς που ανακλάται μέσα στην POF μειώνεται σημαντικά κατά μήκος της διάδοσης και οι τρόποι υψηλότερης τάξης που ενεργοποιήθηκαν κατά τη διάδοση θα εμφανιστούν αρκετά εξασθενημένοι στο άκρο εξόδου της SI-POF από ότι στην περίπτωση υψηλότερης τιμής του παράγοντα R_{refl} . Αυτό παρατηρήθηκε κατά τις μετρήσεις του εύρους ζώνης μία Poly(steryne) GI-POF, όπου οι κατασκευαστικές αστοχίες κατά την παραγωγή της ίνας δημιούργησαν μία ακανόνιστη επιφάνεια στα όρια του πυρήνα και του μανδύα της GI-POF, με αποτέλεσμα να προκαλείται έντονη σκέδαση για τους τρόπους ανώτερης τάξης [114]. Έτσι, η οπτική ισχύς των τρόπων υψηλότερης τάξης εμφανιζόταν ελαττωμένη στην έξοδο της GI-POF, καταλήγοντας σε υψηλότερο μετρούμενο εύρος ζώνης από ότι εκτιμήθηκε θεωρητικά, λόγω της μείωσης της επίδρασης των τρόπων υψηλότερης τάξης.



Σχήμα 2.9. Μέτρο της απόκρισης συχνότητας που παράγεται για διάφορες τιμές του παράγοντα ανακλάσεων (R_{refl}). $D = 3 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$.

Επιστρέφοντας στις PMMA SI-POFs, για το ίδιο καθεστώς εισόδου του φωτός στην ίνα, όπως όταν εξετάστηκε η επίδραση του συντελεστή σύζευξης όσον αφορά το εύρος της δέσμης, και διατηρώντας τις τιμές των παραμέτρων σταθερές, αν ο παράγοντας R_{refl} μίας SI-POF μειωθεί, τότε θα αναμενόταν μία αύξηση του εύρους ζώνης. Σταθεροποιώντας τον συντελεστή σύζευξης σε μία τιμή D τιμή ίση με $3 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$ και

θέτοντας τις τιμές 0.9995, 0.9996, 0.9997, 0.9998 and 0.9999 για τον παράγοντα R_{refl} , οι εκτιμήσεις του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας που προέκυψαν απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9. Η αύξηση του R_{refl} έχει δυσμενή επίδραση στο εύρος ζώνης, παρά την πιο «ομαλή» επιφάνεια μεταξύ πυρήνα και μανδύα και τις μειωμένες απώλειες στην ισχύ. Παρά τη μικρή μεταβολή του παράγοντα R_{refl} , η διαφορά του εύρους ζώνης στα 3 dB είναι σχεδόν 156.42 MHz μεταξύ της μεγαλύτερης από τη μικρότερη τιμή, για τις δύο ακραίες τιμές του παράγοντα R_{refl} . Η τρίτη και η τέταρτη στήλη στον πιο πάνω πίνακα (Πίνακας 2.3) περιλαμβάνουν τις τιμές οπτικού εύρους ζώνης στα 3 dB για τις αντίστοιχες τιμές του παράγοντα ανακλάσεων.

Φαίνεται, λοιπόν, ότι υπάρχει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην βελτιωμένη ομοιογένεια μίας SI-POF ίνας με μικρότερο συντελεστή σύζευξης D και στη μείωση των ακανόνιστων επιφανειών στα όρια πυρήνα και μανδύα. Σύμφωνα με την αναφορά [115], αποδείχθηκε πειραματικά ότι αυξάνοντας την θερμοκρασία μέσα στα όρια λειτουργίας των SI-POFs που μελετήθηκαν, οι απώλειες μειώνονται ως αποτέλεσμα της μείωσης των σκεδάσεων και των απωλειών από ακτινοβολή στα άκρα του πυρήνα. Ωστόσο, σε αυτή την αναφορά εφαρμόστηκαν πρόσθετες επιμηκύνσεις στις ίνες κατά τη διαδικασία θέρμανσης. Για να μειωθούν τα κέντρα σκέδασης, εκτιμήθηκε ότι μία λύση θα ήταν η θερμική επεξεργασία των SI-POFs, στοχεύοντας στην αύξηση της ομοιογένειας του πυρήνα.

2.4.2 Πειραματική μελέτη

Για να ελεγχθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στις PMMA SI-POFs διαμέτρου 1 mm, τα πρώτα βήματα της διαδικασίας που ακολουθήθηκαν ήταν αρχικά να κοπούν από δύο τμήματα 50 μέτρων από δύο διαφορετικές καλούμπες διαφορετικών κατασκευαστών PMMA SI-POF. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο ίνες ανά κατασκευαστή προέκυψαν από την ίδια καλούμπα. Ο λόγος που κόπηκαν δύο τμήματα ίνας ήταν η χρήση της μίας εκ των δύο σαν ίνα αναφοράς κατευθείαν από την καλούμπα της ίνας και της άλλης ως το τμήμα που θα υποστεί τη θερμική επεξεργασία. Έπειτα, τα άκρα των ινών καθαρίστηκαν προσεκτικά με γυαλόχαρτο και ακολούθησε η κατάλληλη τοποθέτηση των συνδετήρων στα άκρα των ινών για να είναι άμεση η δυνατότητα σύνδεσης του κάθε άκρου ίνας με τον πομπό και το δέκτη. Με αυτό τον τρόπο ήταν εύκολη και δίκαιη η σύγκριση των χαρακτηριστικών δύο ινών ανά κατασκευαστή. Επιπλέον, έχοντας δύο τμήματα ίδιου μήκους από την ίδια καλούμπα, η σύγκριση μέσω μετρήσεων που θα αναλυθούν στη συνέχεια δεν χρειαζόταν να γίνει μία φορά μετά την θέρμανση της μίας εκ των δύο ινών από την ίδια καλούμπα, αλλά ανά ζεύγη ινών μπορούσε να επαναληφθεί ανά τακτά διαστήματα για να εξεταστεί η μονιμότητα ή όχι των αλλαγών λόγω της θερμικής επεξεργασίας με μέτρηση των αποκρίσεων και των δύο ινών.

Για την ίνα κάθε ζεύγους που υπέστη τη θερμική επεξεργασία, τα βασικά βήματα περιλάμβαναν τις σταδιακές βηματικές αλλαγές της θερμοκρασίας και σε κάθε βήμα διατηρούνταν η ίδια ονομαστική τιμή θερμοκρασίας για κάποιο χρονικό διάστημα. Σαφέστερα, χρησιμοποιήθηκε ένας φούρνος Heraeus AG. Ο φούρνος ήταν δυνατό να προσαρμοστεί σε ένα εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 25°C και 250°C. Επίσης, στις ρυθμίσεις περιλαμβανόταν και η δυνατότητα ρύθμισης άνω ορίου θερμοκρασίας. Στο αρχικό σύνολο πειραμάτων και μετρήσεων, αυτό το όριο τέθηκε στους 100°C για λόγους ασφαλείας. Ωστόσο, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, αυτή η ρύθμιση σε κάποιες περιπτώσεις δεν χρησιμοποιήθηκε.

Έχοντας εξετάσει τις ανάγκες για την εγκατάσταση ζεύξεων μικρών αποστάσεων μέχρι 50 μέτρα, αρχικά κόπηκαν τέσσερα τμήματα SI-POFs από PMMA 50 μέτρων έκαστο. Τα δύο τμήματα ινών ήταν από καλούμπα της LUCEAT (vun Naria Security) και τα άλλα δύο από καλούμπα της TORAY. Οι δύο ίνες της LUCEAT ήταν της σειράς LiteWire και ακριβέστερα ήταν το anti-UV μονό καλώδιο από καλούμπα 200 μέτρων

(LPL1020P022M). Γι' αυτές τις ίνες, ο πυρήνας είναι από PMMA και ο μανδύας από fluorinated polymer. Το εξωτερικό κάλυμμα είναι από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (High Density Polyethylene – HDPE). Οι διάμετροι πυρήνα, ίνας και καλωδίου είναι 0.980 mm, 1 mm και 2.2 mm, αντίστοιχα, το αριθμητικό άνοιγμα είναι ίσο με 0.46 και η ονομαστική τιμή του συντελεστή απωλειών στα 650 nm είναι ίση με 0.150 dB/km. Το εύρος θερμοκρασιών για το οποίο οι LUCEAT SI-POFs υποτίθεται ότι λειτουργούν απρόσκοπτα είναι μεταξύ των ονομαστικών τιμών -40°C και $+85^{\circ}\text{C}$ [73].

Όσον αφορά τις TORAY SI-POFs, το ακριβές μοντέλο των ινών ήταν το PGU-CD1001-22-E [74] για το οποίο οι διαστάσεις πυρήνα, μανδύα και καλωδίου παραμένουν ίδιες με αυτές των SI-POFs της LUCEAT. Το υλικό του πυρήνα παραμένει PMMA, το υλικό του μανδύα είναι fluorinated polymer, αλλά το αριθμητικό άνοιγμα είναι ίσο με 0.5 που σημαίνει ότι υπάρχει μικρή διαφοροποίηση στα ακριβή υλικά του μανδύα για τους δύο κατασκευαστές ινών. Προφανώς, αυτά τα υλικά ανήκουν στην ίδια κατηγορία, αλλά δεν είναι διαθέσιμα από τους κατασκευαστές μέσα στις τεχνικές προδιαγραφές των μοντέλων των ινών. Το εξωτερικό κάλυμμα των ινών είναι από πολυαιθυλένιο. Και γι' αυτή την ίνα η ονομαστική τιμή του συντελεστή απωλειών στα 650 nm είναι ίση με 0.150 dB/km. Η καλούμπα είχε 500 μέτρα μήκος. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εταιρείας, το αντίστοιχο εύρος θερμοκρασιών για τις TORAY SI-POFs είναι μεταξύ των ονομαστικών τιμών -55°C και $+70^{\circ}\text{C}$.

Επαναλαμβάνεται ότι από κάθε ζεύγος ίδιων ινών 50 μέτρων, η μία χρησιμοποιούνταν ως ίνα αναφοράς και η άλλη περνούσε από μία διαδικασία θέρμανσης. Οι ίνες διαφορετικών κατασκευαστών που υπέστησαν τη θερμική επεξεργασία δεν θερμαίνονταν ταυτόχρονα, καθώς ούτε ο χώρος μέσα στο φούρνο υπήρχε, αλλά ούτε και το πλήθος των μετρητικών διατάξεων, ώστε να πραγματοποιηθεί η ταυτόχρονη θέρμανση και να υπάρχει εποπτικός έλεγχος της διαδικασίας και των αλλαγών που θα προέκυπταν ταυτόχρονα και για τις δύο ίνες. Επιπροσθέτως, περίπου 1.0 μέτρο από κάθε άκρο καθεμίας ίνας που υπέστη τη διαδικασία θέρμανσης έμενε εκτός του φούρνου μέσω μίας οπής στην κορυφή του φούρνου. Πριν τη θέρμανση τα ζεύγη ινών του ίδιου κατασκευαστή τυλίγονταν σε χαλαρούς βρόχους με σχετικά μεγάλη διάμετρο ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα διέγερσης τρόπων μεγάλης τάξης, θεωρώντας ότι το φως εισερχόταν στο κέντρο της ίνας ως μία στενή δέσμη παράλληλα στον νοητό άξονα της SI-POF. Ανά ζεύγος ινών του ίδιου κατασκευαστή, γινόταν προσπάθεια οι βρόχοι κατά το τύλιγμα να έχουν σχεδόν την ίδια διάμετρο. Για το ζεύγος των LUCEAT SI-POFs, η διάμετρος του τυλίγματος ήταν περίπου 24 cm. Για το ζεύγος των TORAY SI-POFs, η διάμετρος ήταν περίπου 31 cm. Όλες οι ίνες παρέμειναν τυλιγμένες πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας θέρμανσης ανεξάρτητα αν πέρασαν από την διαδικασία θέρμανσης. Πριν από την εκκίνηση της διαδικασίας θέρμανσης, μετρούνταν οι αποκρίσεις συχνότητας και οι συντελεστές απωλειών για όλες τις ίνες, ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι POFs που ανήκουν στο ίδιο ζεύγος ενός κατασκευαστή, δηλαδή η SI-POF αναφοράς και η δεύτερη SI-POF προς θέρμανση που κόπηκαν από την ίδια καλούμπα, έχουν παρόμοιο εύρος ζώνης και παρόμοιες απώλειες με αμελητέα απόκλιση μεταξύ τους. Αυτό επιβεβαιώθηκε και πειραματικά.

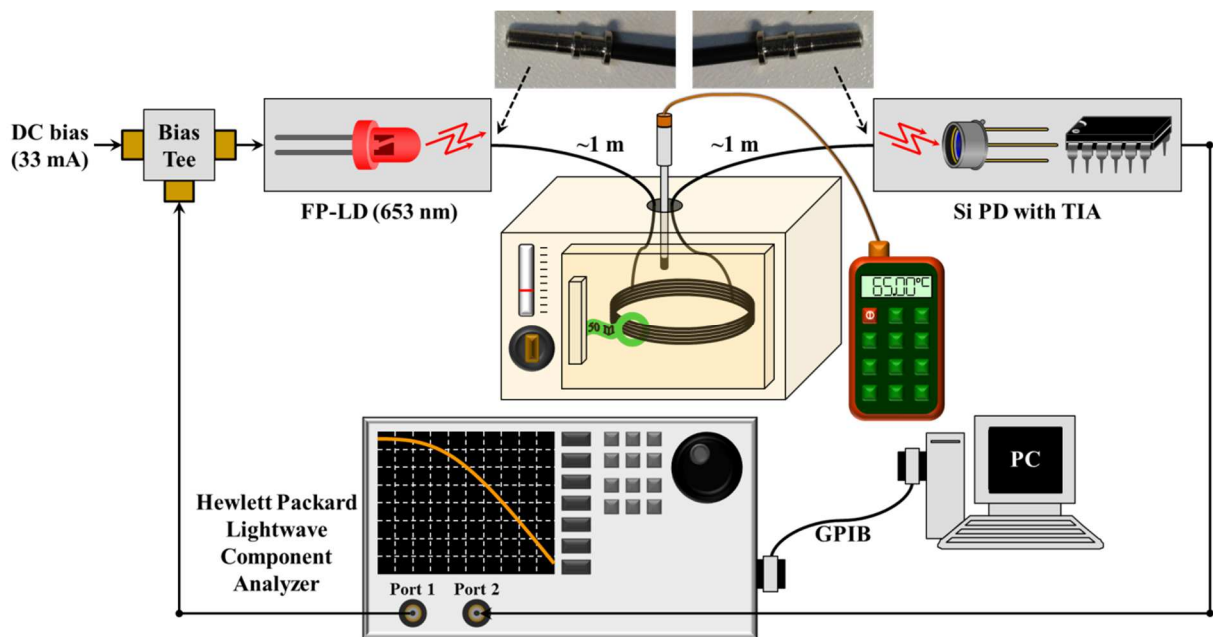
Εδώ τονίζεται ότι διάφορα μοτίβα θέρμανσης που ακολουθήθηκαν κατά τη θέρμανση τμημάτων ίνας είτε δεν έδωσαν τα ίδια αποτελέσματα είτε δεν έδωσαν μόνιμα αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι για να προκύψουν τα δύο τελικά τμήματα ίνας από την ίδια καλούμπα τα οποία και συγκρίθηκαν σε μεγάλο χρονικό διάστημα, έπρεπε να περάσουν από διαδικασίες θέρμανσης με μικρές τροποποιήσεις κάποια πρόσθετα τμήματα ίνας μέχρι να εξασφαλιστεί η σταθεροποίηση-μονιμότητα των αλλαγών και να παγιωθεί η διαδικασία της θέρμανσης και τα ενδιάμεσα βήματα αλλαγής της θερμοκρασίας. Το επιτυχές μοτίβο αλλαγής θερμοκρασίας θα περιγραφεί στην

παράγραφο που ακολουθεί. Οι ίνες που πέρασαν από αυτή τη διαδικασία είναι και αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις.

Η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων λαμβανόταν από ένα ψηφιακό θερμόμετρο υψηλής ακρίβειας, παρά την όποια ένδειξη του φούρνου. Το ψηφιακό θερμόμετρο ήταν ένα θερμοζεύγος (thermocouple) από την Extech Instruments το οποίο είχε εισαχθεί πριν την εκκίνηση της θέρμανσης μέσα στο φούρνο μέσω της οπής στην κορυφή του φούρνου από την οποία έβγαιναν τα άκρα του τμήματος ίνας που περνούσε από τη διαδικασία θέρμανσης. Αρχικά, το τμήμα της SI-POF που θα περνούσε τη διαδικασία τοποθετούνταν μέσα στο σβηστό φούρνο μέχρι η θερμοκρασία να φθάσει και να σταθεροποιηθεί στους 22.5°C με 23°C, σύμφωνα με την ένδειξη του θερμομέτρου. Μετά από 15 λεπτά από τη σταθεροποίηση, ο φούρνος ρυθμίστηκε στους 25°C και τέθηκε σε λειτουργία. Προφανώς, αυτή η ένδειξη θερμοκρασίας στο φούρνο ήταν η ονομαστική τιμή, ενώ η ακριβής τιμή καταγραφόταν από τις ενδείξεις του θερμομέτρου και η οποία μάλιστα δεν ήταν σταθερή αλλά μεταβαλλόταν γύρω από την τιμή στην οποία ήταν ρυθμισμένος ο φούρνος. Μετά το πέρασμα 20 λεπτών ή περισσότερων αν χρειαζόταν περισσότερος χρόνος για να υπάρξει σταθερή εικόνα για το σύστημα, η θερμοκρασία του φούρνου αυξήθηκε κατά 5°C στους 30°C. Και πάλι, η ονομαστική τιμή της θερμοκρασίας διατηρήθηκε σταθερή για 20 λεπτά, όπως και στο προηγούμενο βήμα. Ακολουθώντας αυτό το μοτίβο, κατά τη διαδικασία θέρμανσης, η θερμοκρασία του φούρνου αυξανόταν σταδιακά κατά 5°C κάθε 20 λεπτά μέχρι και τη θερμοκρασία των 75°C. Μετά τα 20 λεπτά στους 75°C, η θερμοκρασία μειώθηκε στους 65°C και διατηρήθηκε ο φούρνος σε αυτή τη θερμοκρασία για μία ώρα. Αυτή η επιστροφή ήταν ένα κρίσιμο τμήμα της διαδικασίας, καθώς από όλα τα μοτίβα θέρμανσης που δοκιμάστηκαν, αυτή η επιστροφή ήταν που έδωσε τη μονιμότητα των αλλαγών. Μετά το πέρασμα της μίας ώρας, ο φούρνος έσβηνε και οι ίνες που υπέστησαν τη θέρμανση αφήθηκαν να κρυώσουν αργά, φθάνοντας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (ambient temperature) μετά από περίπου μία ώρα. Εδώ σημειώνεται ότι παρά το γεγονός ότι οι προδιαγραφές της ίνας TORAY αναφέρουν ως μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία τους 70°C, δεν προκλήθηκε καταστροφή σε όσα τμήματα TORAY SI-POFs υπέστησαν θέρμανση πάνω από αυτή τη θερμοκρασία.

Η πειραματική διάταξη κατά τη διαδικασία της θέρμανσης των δειγμάτων POFs φαίνεται στο Σχήμα 2.10 που ακολουθεί. Η οπτική δέσμη με στενή μέση (beam waist) (πολύ μικρότερη από τη διάμετρο των SI-POFs) εισάγεται στο εκάστοτε δείγμα SI-POF όσο το δυνατό πιο καλά ευθυγραμμισμένη με το κέντρο του πυρήνα της ίνας. Η οπτική πηγή ήταν μία δίοδος laser (Laser Diode) τύπου Fabry-Perot (FP-LD) στα 653 nm [63] πολωμένη στα 33 mA. Από τη διάταξη μέτρησης και απεικόνισης της απόκρισης συχνότητας, η οποία ήταν ο Lightwave Component Analyzer της Hewlett Packard, εξερχόταν το ηλεκτρικό σήμα που ήταν ένα σήμα σάρωσης ημιτόνων. Ακολουθούσε η πρόσθεση του ηλεκτρικού σήματος με το ρεύμα πόλωσης και διαμορφωνόταν άμεσα η πηγή laser. Υπήρξε πρόνοια, ώστε η πόλωση να είναι κατάλληλη και το ηλεκτρικό σήμα να μην έχει μεγάλο πλάτος, ώστε να εξασφαλιστεί η αποφυγή μη γραμμικής συμπεριφοράς στην πηγή και στο σύστημα γενικότερα. Η σύνδεση μεταξύ οπτικής πηγής και ίνας γινόταν με την είσοδο της ίνας απευθείας στην πηγή με το άκρο της ίνας να περιλαμβάνει μόνο τον μεταλλικό κρίκο (ferrule). Η SI-POF συνδέθηκε άμεσα με το φωτοφωρατή με το άλλο άκρο της ίνας να περιλαμβάνει μόνο το μεταλλικό κρίκο, όπως και φαίνεται και στο Σχήμα 2.10. Ο δέκτης ήταν ο HAS-X-S-1G4-SI από τη Femto και αποτελούνταν από τη φωτοδίοδο πυριτίου (Silicon Photodiode – Si PD) [69] με ενσωματωμένο TIA και είχε εύρος ζώνης ίσο με 1.4 GHz. Μετά τη λήψη του σήματος, το ηλεκτρικό σήμα οδηγούνταν ξανά στον Analyzer. Τα δεδομένα λαμβάνονταν από προσωπικό υπολογιστή (Personal Computer – PC) μέσω διαύλου GPIB (General Purpose Interface Bus) και ακολουθούσε η επεξεργασία σε περιβάλλον Matlab.

Πριν την εκκίνηση των μετρήσεων πραγματοποιούνταν η βαθμονόμηση (calibration) όλου του συστήματος. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνταν μία SI-POF μήκους 30 cm της LEONI [75] που συνδεόταν όπως ακριβώς και η υπό εξέταση SI-POF σε πηγή και δέκτη όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.10. Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται στην [116], με το τμήμα των 30 cm της SI-POF μετρούνταν η απόκριση των ηλεκτρονικών μερών πομπού και δέκτη και αποθηκευόταν στον Analyzer. Αυτή η απόκριση χρησιμοποιούνταν σαν καμπύλη αναφοράς, ώστε μετά την αντικατάσταση της ίνας των 30 cm από άλλο τμήμα ίνας του οποίου τα χαρακτηριστικά θα αξιολογούνταν, η απόκριση συχνότητας όλου του συστήματος που περιλαμβάνει την υπό εξέταση ίνα να διαιρεθεί με την απόκριση αναφοράς (αυτόματα από τον Analyzer). Έτσι διατηρούνταν μόνο η απόκριση συχνότητας του οπτικού καναλιού που είναι αποκλειστικά η οπτική ίνα, δηλαδή επρόκειτο για την optical-to-optical απόκριση συχνότητας της SI-POF. Βάσει της προηγούμενης διαδικασίας που περιγράφηκε, κατά τη διάρκεια παραμονής σε κάποια θερμοκρασία, η απόκριση συχνότητας του οπτικού καναλιού μετρούνταν και καταγραφόταν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

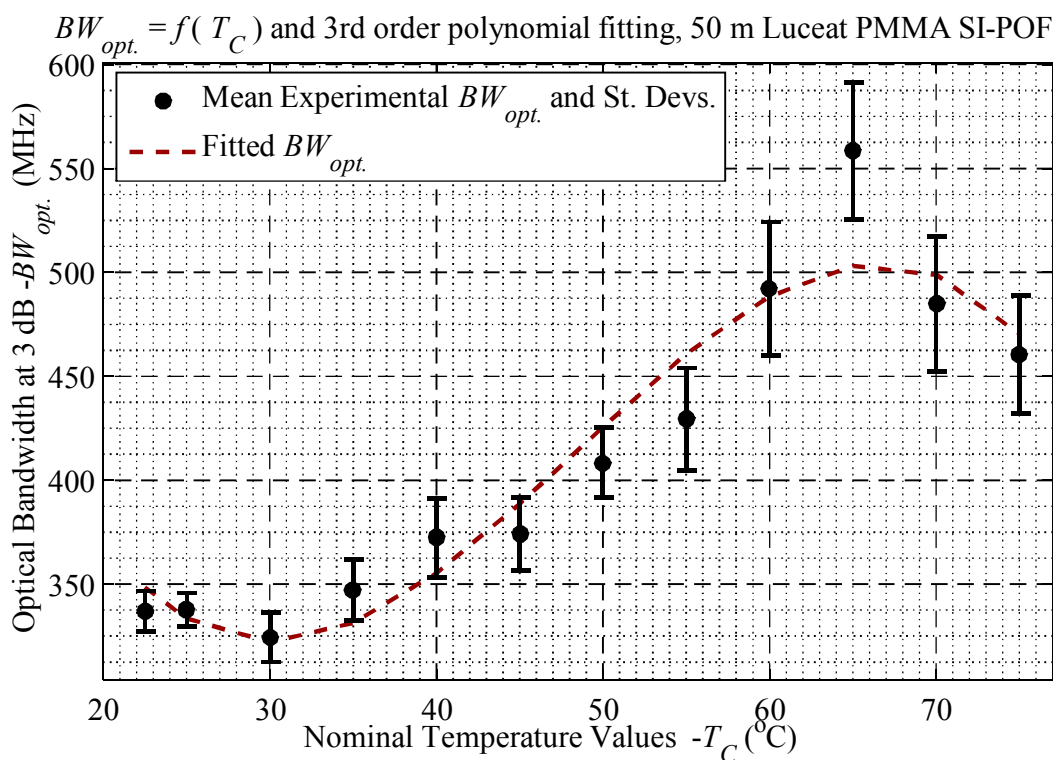


Σχήμα 2.10. Πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις του μέτρου της απόκρισης συχνότητας της πλαστικής οπτικής ίνας (optical-to-optical) κατά τη διαδικασία θέρμανσης.

Ξεκινώντας από την περίπτωση της LUCEAT PMMA SI-POF των 50 μέτρων, κατά τη διάρκεια της αλλαγής της θερμοκρασίας με βήματα 5°C και διατήρηση για 20 λεπτά σε κάθε ονομαστική τιμή, λαμβάνονταν μετρήσεις του μέτρου της απόκρισης συχνότητας κάθε ένα λεπτό (στην ίδια θερμοκρασία) μετά τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας μέσα στο φούρνο και μετά τη σταθεροποίηση της όποιας αλλαγής στο εύρος ζώνης. Συνήθως, η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας γινόταν γρήγορα, ενώ η σταθεροποίηση της όποιας αλλαγής σε εύρος ζώνης και απώλειες γινόταν σε λίγα λεπτά. Γι' αυτό και αρκούσαν 20 λεπτά παραμονής ανά θερμοκρασία. Κάθε στιγμιότυπο απόκρισης συχνότητας ήταν αποτέλεσμα ομαλοποίησης (smoothing) και υπολογισμού ως μέσου όρου (averaging) που επιβαλλόταν από τον Analyzer μέσω κατάλληλων ρυθμίσεων. Εκτός από εξαιρέσεις, κατά την παραμονή σε μία θερμοκρασία, το πλήθος των αποκρίσεων συχνότητας που λαμβάνονταν από τον Analyzer ήταν 10.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, από αυτές τις καμπύλες αποκρίσεων συχνότητας υπολογίστηκε η μέση τιμή του οπτικού εύρους ζώνης της LUCEAT SI-POF στα 3 dB για καθεμία θερμοκρασία. Το διάγραμμα με τις μέσες τιμές απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11. Μαζί με τις μέσες τιμές δίνονται και οι τυπικές αποκλίσεις από το σείτο μετρήσεων που ελήφθησαν ανά θερμοκρασία. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και μία

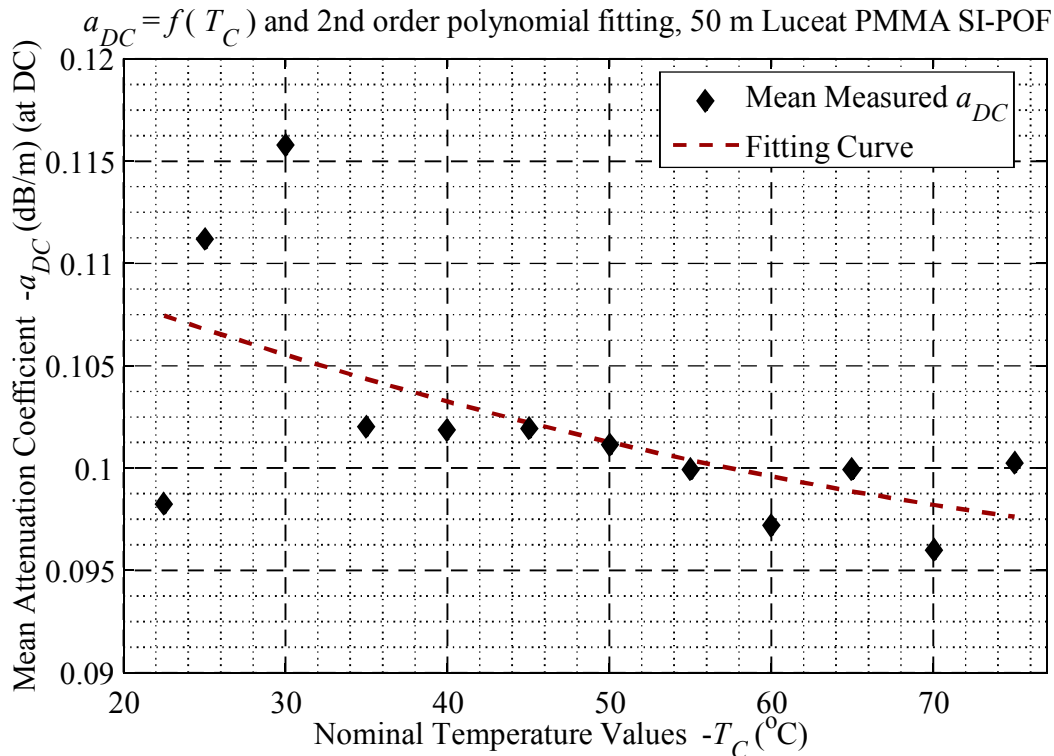
προσαρμογή στις μετρήσεις με χρήση πολυωνύμου 3ου βαθμού. Το οπτικό εύρος ζώνης σε Hz σε συνάρτηση της θερμοκρασίας (T_C) σε βαθμούς κελσίου από το πολυώνυμο μπορεί να εκφραστεί ως εξής: $BW_{opt.}(T_C) = -7464.23 \times (T_C)^3 + 1081661.78 \times (T_C)^2 - 44777523.45 \times T_C + 893435806.74$. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, προέκυψε μία αλλαγή που γίνεται αισθητή αμέσως ακόμα κι αν είναι σχετικά ασταθείς οι μετρήσεις. Με τη συγκεκριμένη βαθμονόμηση στους 22.5°C πριν την έναρξη της θέρμανσης, το εύρος ζώνης μετρήθηκε περίπου 337.05 MHz, η οποία παρέμεινε σχεδόν σταθερή και στους 25°C (337.66 MHz) για να υποχωρήσει ελαφρώς στα 324.48 MHz στους 30°C. Μεγάλη αύξηση παρατηρήθηκε από τους 55°C στους 60°C, καθώς έγινε μετάβαση από τα 429.49 MHz στα 492.07 MHz. Η μέγιστη τιμή προέκυψε στους 65°C και ήταν 558.51 MHz, δηλαδή μία αλλαγή 65.71% σε σχέση με τα 337.05 MHz στους 22.5°C. Έπειτα, ακολούθησε μία πτώση σε μία τιμή λίγο πάνω από 484.79 MHz στους 70°C. Τελικά, το εύρος ζώνης στους 75°C εκτιμήθηκε στα 460.43 MHz περίπου, που σημαίνει αλλαγή λίγο πάνω 36.60% σε σχέση με την τιμή των 337.05 MHz στους 22.5°C. Ενδεχομένως, μετά τους 55°C να απαιτούνταν περισσότερες μετρήσεις και όχι 10 για να προκύψει η μέση τιμή εύρους ζώνης ανά θερμοκρασία, ώστε να περιοριστεί η αυξημένη τυπική απόκλιση για τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Παρά την πτώση που προέκυψε μετά τους 65°C, όταν έπειτα έγινε η επιστροφή από τους 75°C στους 65°C, δεν προέκυψε άλλη πτώση, αλλά το εύρος ζώνης παρέμεινε σε υψηλό επίπεδο όπως θα δούμε και σε άλλες μετρήσεις που παρουσιάζονται πιο κάτω. Η επιστροφή στους 65°C δεν παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11. Μεταβολή του οπτικού εύρους ζώνης με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα LUCEAT PMMA SI-POF 50 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.

Για καθεμία ονομαστική τιμή θερμοκρασίας, εκτός από το εύρος ζώνης, μέσω των στιγμιότυπων του μέτρου της απόκρισης συχνότητας που ελήφθησαν από τον Analyzer, εκτιμήθηκαν και οι μέσες τιμές του συντελεστή εξασθένισης στο DC. Αυτή η μέτρηση ήταν βοηθητική ώστε να καταδειχθεί και το γεγονός της μείωσης των απωλειών με την συγκεκριμένη διαδικασία θέρμανσης. Οι τιμές απεικονίζονται στο Σχήμα 2.12. Στο ίδιο σχήμα δίνεται και μία καμπύλη προσαρμογής που προέκυψε από πολυώνυμο 2ου βαθμού. Σε γενικές γραμμές, οι μετρήσεις είναι ασταθείς, αλλά υπάρχει μία πτωτική τάση. Στο τμήμα μεταξύ 35°C-45°C, οι απώλειες ήταν σχετικά σταθερές κοντά στα 0.102

dB/m για να ακολουθήσει μία σταδιακή πτώση μετά τους 55°C. Η πτώση των απωλειών τελικά θα σταθεροποιηθεί και θα φανεί τελικά στις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν για την ίδια ίνα. Η εξίσωση της προσαρμογής για το συντελεστή απωλειών που προέκυψε ήταν η εξής: $a_{DC,d}(T_C) = 3.4641 \times 10^{-7} \times (T_C)^2 - 7.6853 \times 10^{-5} \times (T_C) + 0.026295$, όπου ο συντελεστής απωλειών στο DC ($a_{DC,d}$) εκτιμήθηκε σε δεκαδικές τιμές (1/m). Για το συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών που εξετάστηκε εδώ, τη μεγαλύτερη επίδραση είχε ο γραμμικός όρος.

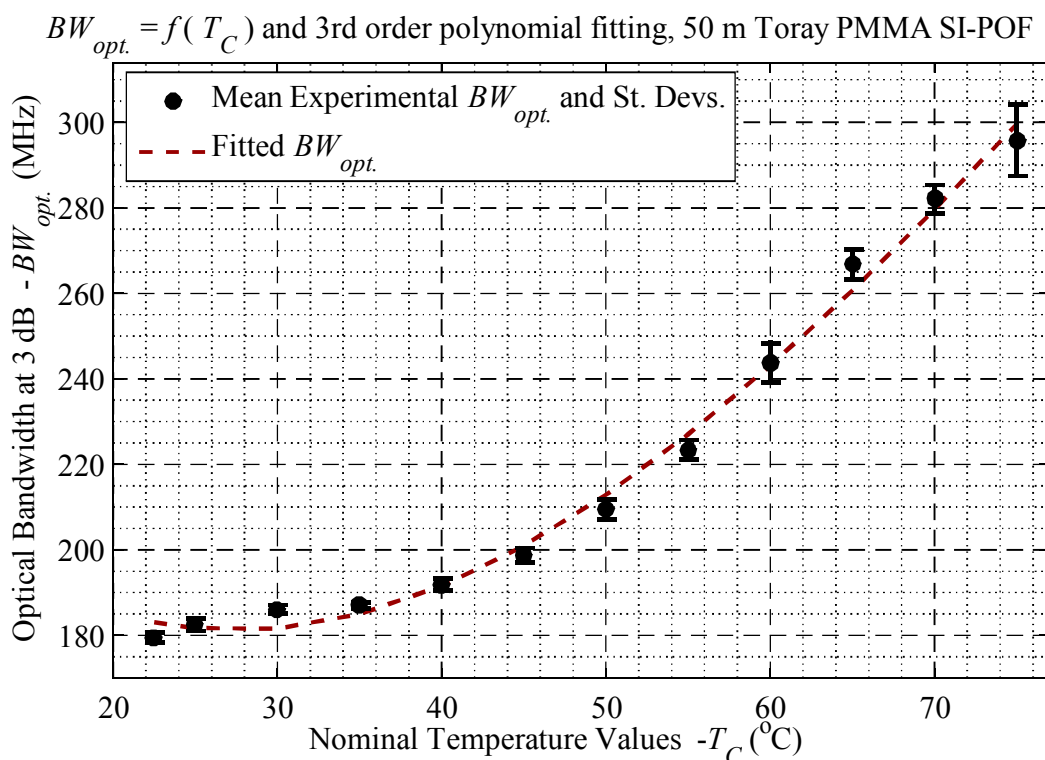


Σχήμα 2.12. Μεταβολή του συντελεστή εξασθένισης στο DC με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα LUCEAT PMMA SI-POF 50 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.

Από τα δύο διαγράμματα, η εκτίμηση ότι η θέρμανση οδηγεί σε μείωση των ανομοιογενειών μέσα στον πυρήνα που σημαίνει λιγότερα κέντρα σκέδασης (όπως οι περιπτώσεις που απεικονίστηκαν στο Σχήμα 2.6) και άρα ασθενέστερη σύζευξη ισχύος μεταξύ τρόπων φαίνεται ότι ευσταθεί, αλλά απαιτείται η επιβεβαίωση και με δεύτερο τμήμα ίνας διαφορετικού κατασκευαστή. Η ανάγκη επιβεβαίωσης της αύξησης του εύρους ζώνης οδήγησε στη επιλογή του μοντέλου PGU-CD1001-22-E SI-POF της TORAY [74], όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε γι' αυτό το τμήμα ίνας 50 μέτρων ήταν ακριβώς η ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε για την ίνα του προηγούμενου κατασκευαστή. Επαναλαμβάνεται ότι στη διαδικασία της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε το τμήμα SI-POF μήκους 30 cm. Όμοια με πριν, από τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας, οι τιμές οπτικού εύρους ζώνης στα 3 dB εκτιμήθηκαν και απεικονίζονται στο Σχήμα 2.13. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η SI-POF της TORAY έχει ως σημείο εκκίνησης μικρότερο εύρος ζώνης και πιο συγκεκριμένα τα 179.58 MHz στους 22.5°C, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω του μεγαλύτερου αριθμητικού ανοίγματος της TORAY (NA = 0.5) σε σχέση με αυτό της SI-POF της LUCEAT (NA = 0.46). Ωστόσο, με άμεση σύνδεση του laser με την ίνα, διατηρώντας μόνο το μεταλλικό κρίκο στην ίνα στη πλευρά της εκπομπής, όπως και στο άλλο άκρο που συνδέεται με το δέκτη (Σχήμα 2.10), προέκυψε μία καθαρή βελτίωση του εύρους ζώνης και μάλιστα σ' αυτή την περίπτωση η αύξηση είναι μονότονη μέχρι την θερμοκρασία των 75°C που είναι λίγο πάνω από τα όρια λειτουργίας της ίνας σύμφωνα με τις προδιαγραφές της TORAY [74]. Δεν προέκυψε κάποια καταστροφή της ίνας στο εξωτερικό περιβάλλον, αφού η ίνα λειτούργησε σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων που ακολούθησαν. Η

προσεκτική αρχική βαθμονόμηση αλλά και η προσεκτική άμεση σύνδεση της ίνας με την πηγή είχαν σαν αποτέλεσμα την μειωμένη τυπική απόκλιση από τις μετρήσεις εύρους ζώνης, όπως φαίνεται από το σχήμα. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η καμπύλη που είναι το αποτέλεσμα της προσαρμογής των συντελεστών ενός πολυωνύμου τρίτου βαθμού στα δεδομένα που προέκυψαν από τις μέσες τιμές εύρους ζώνης για καθεμία θερμοκρασία. Το πολυώνυμο που προέκυψε είχε την εξής μορφή: $BW_{opt.}(T_C) = -418.98 \times (T_C)^3 + 107210.33 \times (T_C)^2 - 4960190.38 \times T_C + 245220164.71$ και δίνει το εύρος ζώνης σε Hz.

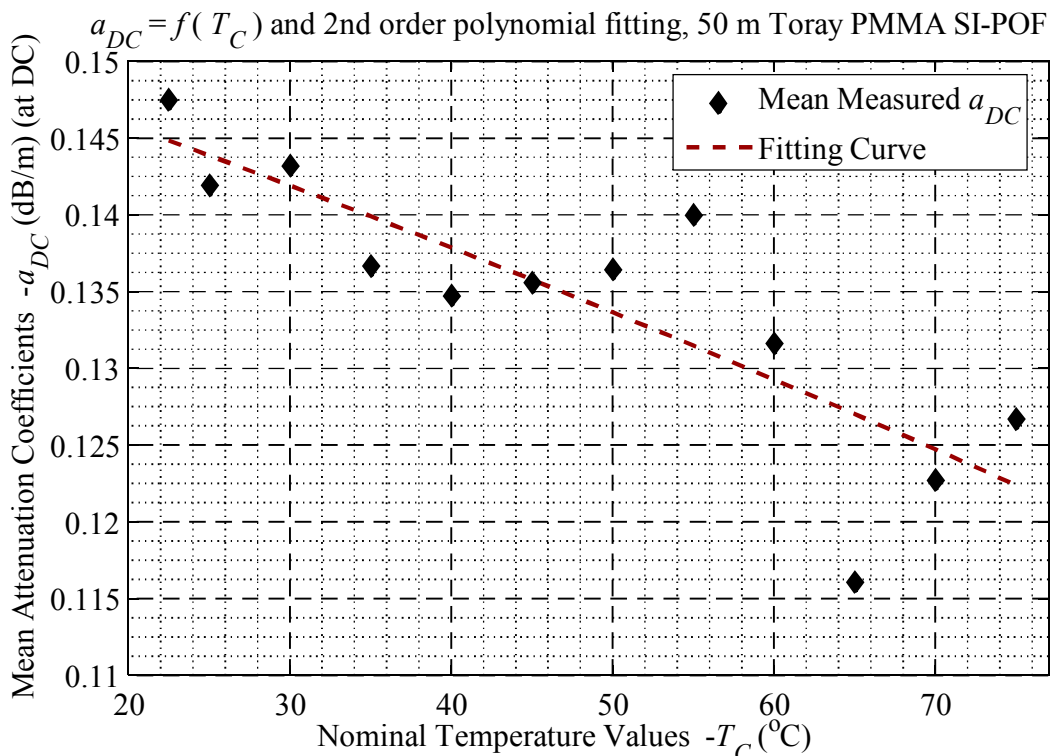
Σε αυτό το σημείο γίνεται σαφές ότι η βελτίωση της ομοιογένειας του πυρήνα και η ομαλοποίηση των ορίων πυρήνα πυρήνα-μανδύα (Σχήμα 2.6), θα δώσουν ως αποτέλεσμα μία σημαντική βελτίωση του εύρους ζώνης μέσω μίας διαδικασίας θέρμανσης σαν αυτή που περιγράφηκε και με προϋπόθεση την εισαγωγή μίας στενής δέσμης κεντρικά στον πυρήνα της ίνας. Από το Σχήμα 2.13, από μία τιμή οπτικού εύρους ζώνης περίπου 179.58 MHz στους 22.5°C, στους 40°C, το εύρος ζώνης είχε αυξηθεί κατά λίγο πάνω από 12 MHz ή όμοια κατά 6.84% στα 191.87 MHz. Στους 50°C το εύρος ζώνης αυξήθηκε στα 209.32 MHz, που σημαίνει αύξηση κατά 16.56%. Η κατάληξη ήταν τα 295.76 MHz στους 75°C, δηλαδή αύξηση κατά 86.44 MHz μέσα σε 25°C, προτού γίνει η ρύθμιση στους 65°C και παραμείνει σε αυτή τη θερμοκρασία η ίνα για μία ώρα (αυτό το στάδιο δεν απεικονίζεται στο σχήμα). Η μέγιστη τιμή η οποία σε αυτή την περίπτωση προέκυψε στους 75°C ήταν κατά 64.70% μεγαλύτερη σε σχέση με την τιμή πριν την εκκίνηση της διαδικασίας θέρμανσης. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι προτού τοποθετηθεί η μία ίνα στο φούρνο και ξεκινήσει η διαδικασία θέρμανσης, μετρήθηκαν οι αποκρίσεις συχνότητας τόσο για την ίνα αναφοράς όσο και για την ίνα που θα περνούσε από τη θερμική κατεργασία. Η ίνα αναφοράς είχε εύρος ζώνης 184.33 MHz και η ίνα που θα περνούσε από τη διαδικασία θέρμανσης είχε εύρος ζώνης 182.68 MHz υπό την ίδια βαθμονόμηση.



Σχήμα 2.13. Μεταβολή του οπτικού εύρους ζώνης με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα TORAY PMMA SI-POF 50 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.

Συνεχίζοντας τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά της ίνας, αυτή εστιάστηκε στη μελέτη των απωλειών. Όπως σημειώθηκε και νωρίτερα, στην [115]

αναφέρεται ότι σωρευμένες τάσεις μέσα στην πλαστική ίνα έχουν σαν αποτέλεσμα μη ομοιόμορφη κατανομή του δείκτη διάθλασης μέσα στον πυρήνα, και αυτή η ανομοιομορφία είναι η αιτία απωλειών λόγω σκεδάσεων και λόγω ακτινοβολήσης στα άκρα του πυρήνα. Ταυτόχρονα, με την αύξηση της θερμοκρασίας οι συσσωρευμένες τάσεις μέσα στην ίνα μειώθηκαν και αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μειωθούν και οι απώλειες. Εδώ, δεν εφαρμόστηκαν πρόσθετες τάσεις μέσω τραβηγμάτων, αλλά ο ισχυρισμός της αύξησης ομοιογένειας του πυρήνα με μείωση των κέντρων σκέδασης φαίνεται να ευσταθεί. Όμοια με πριν, από τις απώλειες στο DC που προέκυψαν από τις τιμές των αποκρίσεων συχνότητας, προέκυψαν οι συντελεστές εξασθένισης για τις τιμές θερμοκρασίας που τέθηκαν. Οι τιμές των συντελεστών δίνονται στο Σχήμα 2.14. Και πάλι αυτή η μέτρηση αποτυπώνει την πτωτική τάση για τις απώλειες στο DC με την αύξηση της θερμοκρασίας, παρά την αστάθεια που παρατηρήθηκε στις μετρήσεις. Η τιμή που μετρήθηκε στο DC στους 22.5°C ήταν λίγο πάνω 0.147 dB/m. Στους 40°C η τιμή ήταν λίγο κάτω 0.135 dB/m, ενώ φαίνεται μία σχετικά σταθερή συμπεριφορά σε ένα εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 35°C και 50°C, όπως είχε παρατηρηθεί και για την SI-POF της LUCEAT, στο Σχήμα 2.12. Ωστόσο, από τους 60°C και έπειτα, επέρχεται σημαντική πτώση. Η τελική τιμή στους 75°C ήταν περίπου 0.127 dB/m. Μαζί με τις μέσες τιμές σε dB/m που προέκυψαν για καθεμία θερμοκρασία, στο ίδιο σχήμα δίνεται και μία καμπύλη που είναι το αποτέλεσμα της προσαρμογής των συντελεστών πολυωνύμου δεύτερου βαθμού στα δεδομένα από τις μετρήσεις. Η καμπύλη έχει προκύψει από την μαθηματική έκφραση $a_{DC,d}(T_C) = -1.9283 \times 10^{-7} \times (T_C)^2 - 7.9637 \times 10^{-5} \times (T_C) + 0.03524$ στην οποία ο συντελεστής απωλειών στο DC ($a_{DC,d}$) εκτιμήθηκε και πάλι σε δεκαδικές τιμές 1/m και για την απεικόνιση εφαρμόστηκε η σχέση $a_{DC} = 10 \times \log_{10}(\exp(a_{DC,d}))$. Και σε αυτή την περίπτωση, ο δεύτερος όρος είχε μεγαλύτερη επίδραση σε σχέση με τον πρώτο για το εύρος των θερμοκρασιών που εξετάστηκαν.



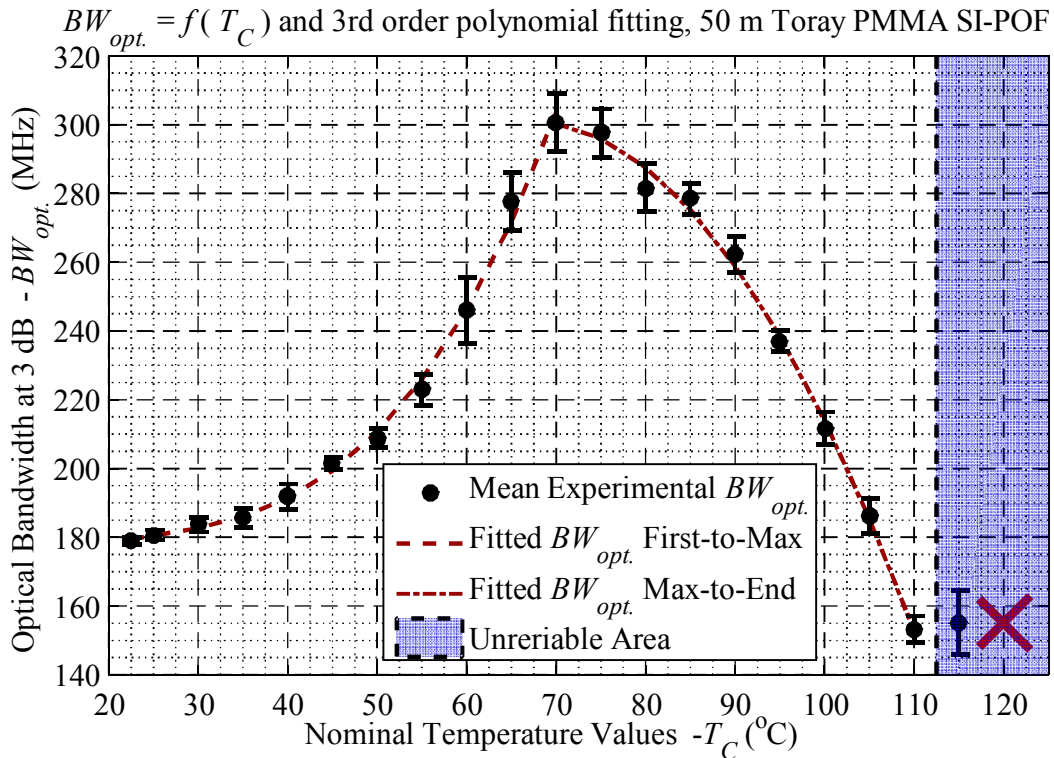
Σχήμα 2.14. Μεταβολή του συντελεστή εξασθένισης στο DC με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα TORAY PMMA SI-POF 50 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.

Δεδομένου ότι εμφανίστηκε βελτίωση των χαρακτηριστικών των ινών με την αύξηση της θερμοκρασίας και με άμεση σύνδεση της ίνας με την πηγή και το δέκτη στα δύο άκρα, ο έλεγχος των επιδόσεων των ινών, όσον αφορά το εύρος ζώνης και τις απώλειες, επεκτάθηκε και σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, από την ίδια

καλούμπα της TORAY από την οποία κόπηκε το προηγούμενο κομμάτι των 50 μέτρων, κόπηκε ένα ακόμα τμήμα ίνας 50 μέτρων το οποίο υπέστη τα ίδια βήματα θέρμανσης μέχρι τους 75°C, αλλά μετά τους 75°C η διαδικασία συνεχίστηκε με βήματα των 5°C μέχρι την πλήρη καταστροφή της ίνας. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας έδωσε μία ενδιαφέρουσα συμπεριφορά. Οι τιμές του εύρους ζώνης μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις των τιμών που προέκυψαν από τις μετρήσεις δίνονται στο Σχήμα 2.15. Προερχόμενη και αυτή η ίνα από την ίδια καλούμπα της TORAY με τα υπόλοιπα δείγματα και επιπλέον, με ίδια διαδικασία βαθμονόμησης αλλά η οποία πραγματοποιήθηκε από την αρχή για τη δεύτερη TORAY SI-POF, το εύρος ζώνης κατά την εκκίνηση υπολογίστηκε κοντά στα 178.92 MHz, μία τιμή πολύ κοντά στην αντίστοιχη τιμή στους 22.5°C για την περίπτωση της ίνας στο Σχήμα 2.13, που ήταν κοντά στα 179.6 MHz. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στις προηγούμενες, δόθηκε προσοχή στο ξύσιμο της ίνας με το γυαλόχαρτο. Το ατελές ξύσιμο της ίνας μπορεί να προκαλέσει μεταβολή των συνθηκών εισόδου του φωτός στην ίνα αν έχει παραμείνει κάποια τραχύτητα πάνω στην εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα της ίνας. Έχοντας προσέξει τη διαδικασία της βαθμονόμησης για να αντιμετωπιστούν πιθανές αστάθειες της πηγής, πρόσθετος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει το εύρος ζώνης και τις απώλειες που θα μετρηθούν είναι οι συνδέσεις πομπού με ίνα και ίνας με δέκτη. Η απευθείας σύνδεση στην αρχή της ίνας μπορεί υπό συνθήκες να επηρεάσει τις συνθήκες εισόδου του φωτός στην ίνα διεγείροντας ελαφρώς διαφορετικές ομάδες τρόπων κατά την εκκίνηση της διάδοσης. Στη λήψη, μικρές μετατοπίσεις της ίνας (ως προς το δέκτη μεγαλώνοντας ελάχιστα την απόστασή τους) ήταν δυνατό να προκαλέσουν μεταβολές στις απώλειες ή ακόμα και φιλτράρισμα ακραίων τρόπων αλλάζοντας το εύρος ζώνης του καναλιού [91]. Ωστόσο, με προσεκτική πραγματοποίηση της διαδικασίας σύνδεσης των διατάξεων και βαθμονόμησης, οι αρχικές τιμές εύρους ζώνης για τις δύο ίνες που υπέστησαν τη διαδικασία θέρμανσης ήταν αρκετά κοντά. Επομένως, αυτή η μικρή διαφορά μεταξύ των τμημάτων των ινών προτού θερμανθούν θεωρείται δικαιολογημένη.

Περνώντας στα αποτελέσματα, διαπιστώθηκε μία παρόμοια συμπεριφορά με την προηγούμενη περίπτωση θέρμανσης ίνας από την TORAY μέχρι και τους 70°C, με το εύρος ζώνης να αυξάνεται σταθερά. Ωστόσο, στην υψηλότερη τιμή, το εύρος ζώνης ξεπέρασε οριακά τα 300.62 MHz. Αντίθετα, στην περίπτωση του προηγούμενου τμήματος ίνας από την ίδια καλούμπα (από το Σχήμα 2.13), η υψηλότερη τιμή εύρους ζώνης που μετρήθηκε ήταν 295.76 MHz. Επιπροσθέτως, αυτή η τιμή για την πρώτη ίνα της TORAY δε μετρήθηκε στους 70°C όπως στη δεύτερη ίνα, αλλά στους 75°C όπως γίνεται προφανές στο Σχήμα 2.13. Επειδή η θερμοκρασία ελεγχόταν και από τις ενδείξεις του φούρνου, αλλά και από τις ενδείξεις του θερμομέτρου, η διαφορά των θερμοκρασιών στις οποίες προέκυψε η μέγιστη τιμή εύρους ζώνης δεν ήταν λόγω λανθασμένης ρύθμισης της θερμοκρασίας. Η αιτία ήταν πιθανότατα η συσσώρευση τάσεων στη δεύτερη ίνα (στο Σχήμα 2.15). Προς ενίσχυση αυτής της άποψης, για την πρώτη TORAY ίνα που υπέστη τη διαδικασία θέρμανσης (για την οποία προέκυψε το Σχήμα 2.13), η μέγιστη αύξηση του εύρους ζώνης από 179.58 MHz στα 295.76 MHz αντιστοιχεί σε αύξηση 64.70%, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Η μέγιστη αλλαγή από την αρχική τιμή εύρους ζώνης στη μέγιστη για το δεύτερο τμήμα ίνας που τελικά καταστράφηκε αντιστοιχεί σε αύξηση 68.02%. Αυτό σημαίνει ότι η συσσώρευση τάσεων στη δεύτερη SI-POF που προήλθε από πιο εσωτερικό τμήμα της καλούμπας ίσως τελικά είναι πιο πιθανό να οδήγησε σε ελαφρώς διαφορετική συμπεριφορά ως προς τη θερμοκρασία σε σχέση με την προηγούμενη ίνα που υπέστη την ίδια θερμοκρασία θέρμανσης. Η λίγο μεγαλύτερη συσσώρευση τάσεων στο δεύτερο δείγμα της TORAY, που είναι διαταραχές του δείκτη διάθλασης, εξομαλύνθηκαν σε λίγο χαμηλότερη θερμοκρασία αποδίδοντας και το ελαφρώς καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά το μέγιστο δυνατό εύρος ζώνης. Και για τις δύο ίνες, η συμπεριφορά κατά τα βήματα της θέρμανσης είναι παρόμοια μέχρι και τους 60°C. Η μεγάλη αλλαγή συμβαίνει για τη

δεύτερη ίνα στο βήμα των 65°C βλέποντας συνδυαστικά το Σχήμα 2.13 και το Σχήμα 2.15. Το ελαφρώς μεγαλύτερο «περιθώριο» βελτίωσης της δεύτερης ίνας επιτεύχθηκε στο επόμενο βήμα, δηλαδή στους 70°C.

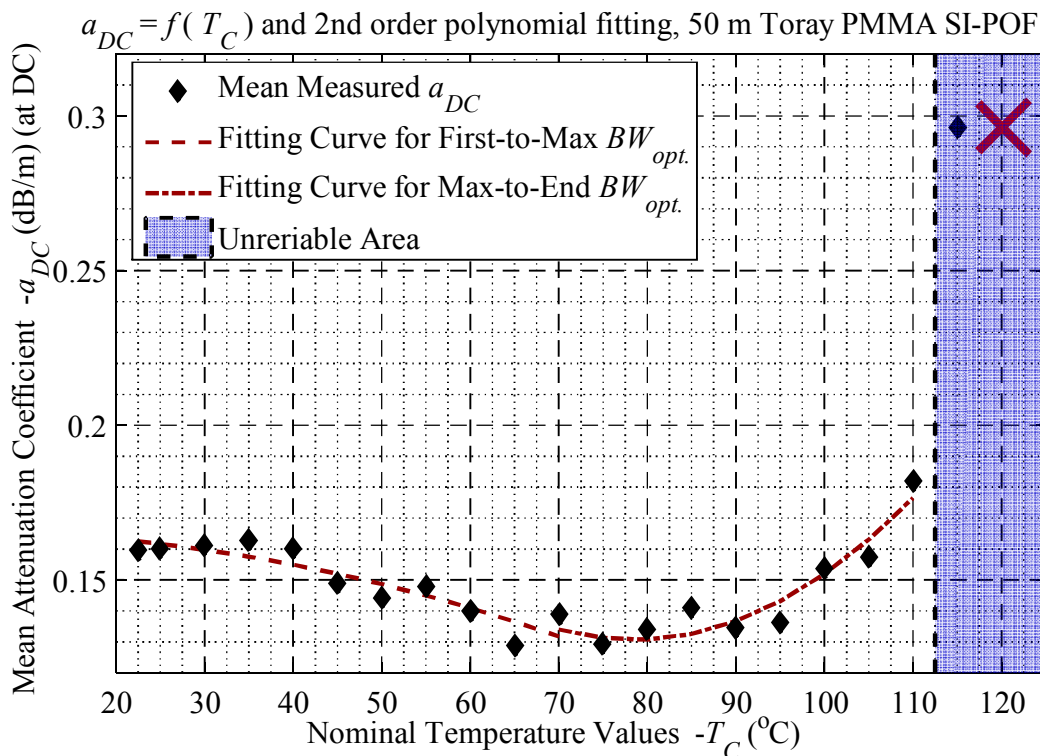


Σχήμα 2.15. Μεταβολή του οπτικού εύρους ζώνης με τη θερμοκρασία για ένα τμήμα ίνας TORAY PMMA SI-POF 50 μέτρων. Οι θερμοκρασίες κάλυψαν το εύρος από 22.5°C μέχρι 120°C, θερμοκρασία στην οποία η SI-POF καταστράφηκε. Δίνονται και οι καμπύλες προσαρμογής.

Μένοντας στο δεύτερο τμήμα ίνας TORAY που θερμάνθηκε, μέχρι τους 70°C, η προσαρμογή των συντελεστών πολυωνύμου τρίτου βαθμού στις μετρηθείσες τιμές εύρους ζώνης έδωσε πολυώνυμο της μορφής $BW_{opt.}(T_C) = 951.45 \times (T_C)^3 - 61595.07 \times (T_C)^2 + 1665871.29 \times T_C + 162440760.83$. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, οι αποκρίσεις συχνότητας ήταν εντονότερα μεταβαλλόμενες σε σχέση με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Μετά από τους 75°C, επήλθε αλλαγή της συμπεριφοράς καθώς άρχισε να μειώνεται το εύρος ζώνης. Η πτώση του εύρους ζώνης είναι σταδιακή. Μετά τους 105°C, το εύρος ζώνης πλησίασε την αρχική τιμή στους 22.5°C και στους 110°C το εύρος ζώνης έπεσε κάτω από αυτή την τιμή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στους 115°C κρίθηκαν ως αναξιόπιστα διότι η θερμοκρασία ήταν πολύ πάνω από τα όρια λειτουργίας [74] και η ίνα δεν είχε περίβλημα ανθεκτικό στη θερμότητα. Επιπλέον, μετά την καταστροφή της στους 120°C, κατά την αφαίρεσή της από το φούρνο, η ίνα είχε διαλυθεί. Φαίνεται, ότι η βελτίωση στο εύρος ζώνης δε συμβαίνει για όλες τις θερμοκρασίες, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας από κάποια τιμή και πάνω λειτουργεί καταστροφικά για την ίνα. Όσον αφορά το δεύτερο τμήμα μεταξύ 70°C και 110°C στο Σχήμα 2.15, η προσαρμοσμένη καμπύλη στις μετρήσεις που δίνεται για το συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών έχει προκύψει από το πολυώνυμο $BW_{opt.}(T_C) = -10.77 \times (T_C)^3 - 77846.33 \times (T_C)^2 + 10591237.67 \times T_C - 55954745.6$ με τις τιμές να αντιστοιχούν σε Hz.

Όσον αφορά τους συντελεστές απωλειών στο DC, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.16, στο πρώτο στάδιο μέχρι και τους 70°C οι συντελεστές εξασθένισης έχουν μία πτωτική τάση παρά τις διακυμάνσεις με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Η τιμή εκκίνησης από περίπου 0.159 dB/m ήταν μεγαλύτερη από αυτή του προηγούμενου τμήματος 50 μέτρων που υπέστη τη θερμική κατεργασία (~0.147 dB/m). Πιθανές αιτίες γι' αυτή τη διαφορά είναι οι ίδιες με αυτές για τις οποίες προέκυψαν και οι διαφορές στο εύρος

ζώνης. Μεγαλύτερη πιθανότητα έχουν η επίδραση της διαφορετικής βαθμονόμησης και οι απώλειες στις συνδέσεις της ίνας με πομπό και δέκτη. Μετά την αρχικά σταθερή συμπεριφορά μέχρι και τους 30°C, ακολούθησε μία μικρή άνοδος στους 35°C (0.163 dB/km) για να επανέλθουν οι απώλειες σε μία τιμή κοντά στην αρχική στους 40°C. Έπειτα, ακολούθησε μία γενικά πτωτική συμπεριφορά. Στο τμήμα μεταξύ 60°C και 80°C οι τιμές των απωλειών φαίνονται σταθεροποιημένες γύρω από την περιοχή των 0.135 dB/m. Πάνω από τους 80°C, φαίνεται η αρνητική επίδραση της θερμοκρασίας. Παρά το γεγονός ότι για 90°C και 95°C οι απώλειες πέφτουν ξανά (σε σχέση με τους 85°C), η τάση άνοδου μετά τους 85°C φαίνεται στις υπόλοιπες μετρήσεις και σε συνδυασμό με την ραγδαία πτώση του εύρους ζώνης για τις ίδιες θερμοκρασίες, προκύπτει ότι έχουν ξεπεραστεί κατά πολύ τα όρια της SI-POF ως προς τη θερμοκρασία. Στους 110°C, ο συντελεστής απωλειών στο DC έφθασε πολύ κοντά στα 0.182 dB/m. Η μέτρηση στους 115°C δε θεωρήθηκε αξιόπιστη και τελικά η καταστροφή της ίνας επήλθε στους 120°C, όπως αναφέρθηκε ήδη. Όπως έγινε και με το εύρος ζώνης, η προσαρμογή έγινε σε δύο στάδια. Από 22.5°C μέχρι και 70°C από 70°C ως και 110°C. Στο πρώτο στάδιο, το πολυώνυμο προσαρμογής ήταν το εξής: $a_{DC,d}(T_C) = -1.6898 \times 10^{-6} \times (T_C)^2 + 7.5306 \times 10^{-6} \times (T_C) + 3.809 \times 10^{-2}$ δίνοντας το συντελεστή εξασθένισης σε μονάδες 1/m. Στο δεύτερο τμήμα από 70°C ως και 110°C, το πολυώνυμο προσαρμογής ήταν το εξής: $a_{DC,d}(T_C) = 1.0671 \times 10^{-5} \times (T_C)^2 - 1.6763 \times 10^{-3} \times (T_C) + 9.5917 \times 10^{-2}$. Αναφέρεται ότι κατά την προσαρμογή με το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού στο τμήμα από 70°C μέχρι τους 110°C, η πρώτη τιμή για την προσαρμογή δεν είναι η τιμή των μετρήσεων, αλλά η τελευταία τιμή $a_{DC,d}(70^\circ\text{C})$ από την προσαρμογή του προηγούμενου πολυωνύμου.



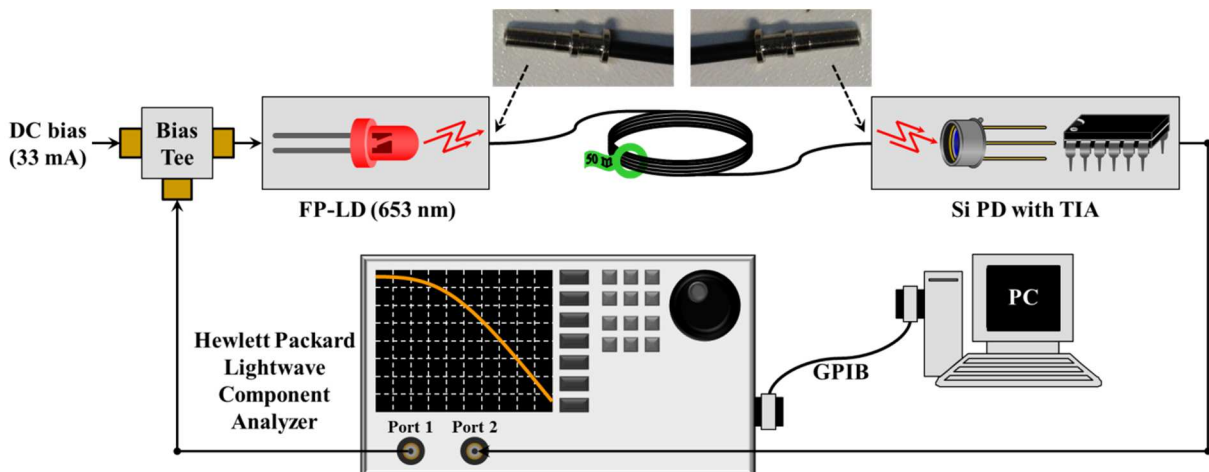
Σχήμα 2.16. Μεταβολή του συντελεστή εξασθένισης στο DC με τη θερμοκρασία για ένα τμήμα ίνας TORAY PMMA SI-POF 50 μέτρων. Οι θερμοκρασίες κάλυψαν το εύρος από 22.5°C μέχρι 120°C, θερμοκρασία στην οποία η SI-POF καταστράφηκε. Δίνονται και οι καμπύλες προσαρμογής.

Από τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο τμήμα ίνας, φαίνεται ότι όσον αφορά την θετική επίδραση της θερμοκρασίας στην ομογενοποίηση του πυρήνα και την ομαλοποίηση των ορίων πυρήνα-μανδύα που οδήγησε σε αύξηση του εύρους ζώνης και μείωση των απωλειών, αυτή φθάνει μέχρι τους 70°C που είναι η ανώτερη τιμή του ορίου λειτουργίας από τις προδιαγραφές τους κατασκευαστή [74]. Όσον αφορά τις απώλειες στο DC, η καθοδική συμπεριφορά σταθεροποιήθηκε σε μία τιμή γύρω από τα

0.135 dB/m μέχρι τους 80°C. Αυτή η θερμοκρασία έχει χρησιμοποιηθεί ως όριο δοκιμών για τη μέτρηση απωλειών σε PMMA SI-POFs υπό την επιβολή διαφορετικών θερμοκρασιών και υπό την επιβολή επιμηκύνσεων [115], [117].

Ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή του εκάστοτε ζεύγους ίνας, τονίζεται ότι κάθε φορά που ακολουθούνταν τα βήματα που περιγράφηκαν, δηλαδή αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5°C μέχρι και τους 75°C και έπειτα επιστροφή στους 65°C για μία ώρα, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρατηρούνταν αύξηση του εύρους ζώνης και μία μικρή μείωση των απωλειών. Αυτό που ήταν εξίσου σημαντικό ήταν και ο τρόπος εισαγωγής της οπτικής δέσμης μέσα στην ίνα. Για να φανούν τα αποτελέσματα της βελτίωσης, η οπτική δέσμη που εισερχόταν στην ίνα ήταν στενή και κεντραρισμένη με τον άξονα της ίνας, με άμεση σύνδεση πομπού-ίνας με χρήση μόνο του μεταλλικού κρίκου στο άκρο της ίνας (Σχήμα 2.10). Η επανάληψη της ίδιας διαδικασίας για διαφορετικό τμήμα ίνας ίδιου μήκους ακόμα και από την ίδια καλούμπα δε θα προκαλέσει την ίδια ακριβώς βελτίωση, επειδή η βελτιωμένη ομοιογένεια του πυρήνα της ίνας που προκύπτει μετά τη διαδικασία της θέρμανσης μπορεί να μην είναι ακριβώς η ίδια για όλα τα δείγματα από την ίδια καλούμπα. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα βήματα έδωσαν μία σαφή και ορατή αλλαγή του εύρους ζώνης και των απωλειών. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε μία μικρή παραμόρφωση των ινών που υπέστησαν τη διαδικασία θέρμανσης η οποία παρέμεινε και μετά τη διαδικασία θέρμανσης και το χρόνο επαναφοράς σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το επόμενο βήμα ήταν ο έλεγχος της χρονικής διάρκειας των βελτιώσεων, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσον οι αλλαγές ήταν μόνιμες ή όχι. Επομένως, μετά τις αποκρίσεις συχνότητας και των τιμών εύρους ζώνης του οπτικού καναλιού που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας των ινών, ακολούθησε σειρά μετρήσεων. Αρχικά, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η ίνα κάθε ζεύγους που υπέστη την επεξεργασία επανερχόταν σε θερμοκρασία δωματίου και έπειτα ακολούθησε ένα πλήθος μετρήσεων σε μεγάλο διάστημα για την επιβεβαίωση ή τη διάψευση της μονιμότητας της βελτίωσης. Η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 2.17.

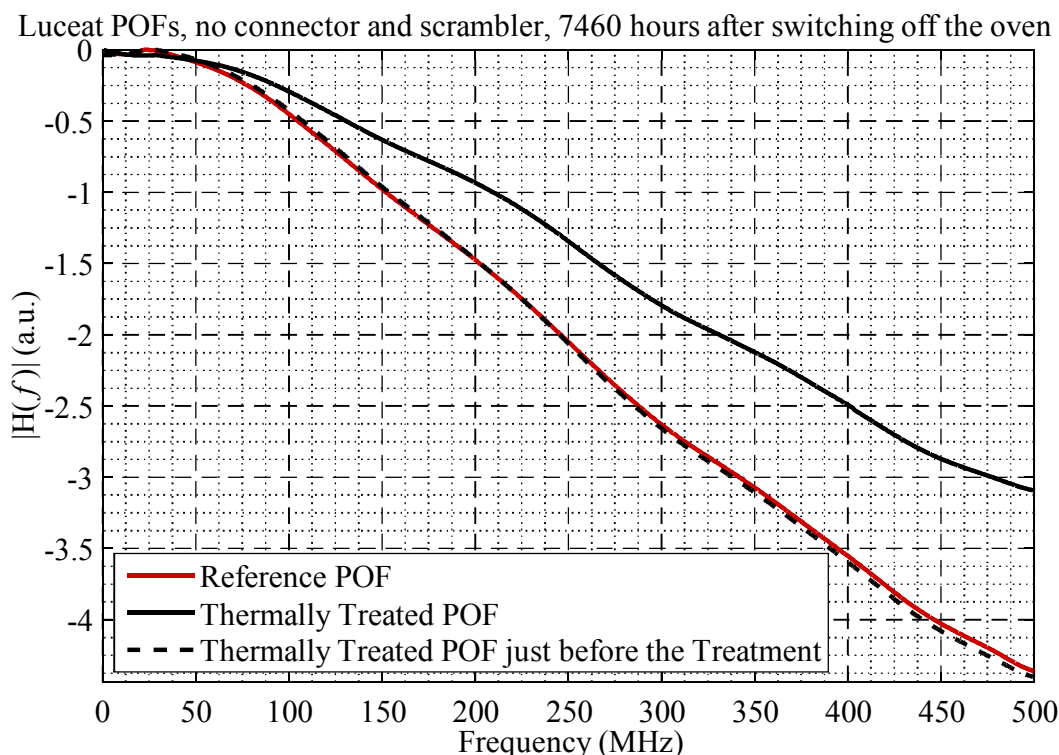


Σχήμα 2.17. Πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις του μέτρου της απόκρισης συχνότητας (optical-to-optical) τόσο της SI-POF που υπέστη τη θέρμανση όσο και της SI-POF αναφοράς. Οι συνδέσεις μεταξύ ίνας και πηγής και μεταξύ ίνας και δέκτη είναι άμεσες (underfilled launching), χωρίς κάποια πρόσθετη διάταξη που διεγείρει πρόσθετους τρόπους.

Αυτό που διαφοροποιεί την πλήρη διάταξη των μετρήσεων για τη σύγκριση των ζευγών ινών ανά κατασκευαστή με αυτή στο Σχήμα 2.10 είναι μόνο η χρήση του φούρνου. Και πάλι γινόταν η απαραίτητη αρχική βαθμονόμηση για την απομόνωση της απόκρισης συχνότητας και τον υπολογισμό του οπτικού εύρους ζώνης τόσο της ίνας αναφοράς όσο και της ίνας που πέρασε από τη διαδικασία θέρμανσης ανά ζεύγος ινών του ίδιου κατασκευαστή. Οι μετρήσεις των δύο ινών ανά ζεύγος του ίδιου κατασκευαστή γίνονταν

πρώτα για τη μία ίνα και έπειτα για τη δεύτερη, χωρίς να αλλάξει η βαθμονόμηση, ώστε να είναι δίκαιη η σύγκριση. Δηλαδή, κατά τη διαδικασία των μετρήσεων μετά το πέρας της διαδικασίας θέρμανσης στο Σχήμα 2.17 το μόνο που άλλαζε ήταν το τμήμα ίνας 50 μέτρων υπό εξέταση.

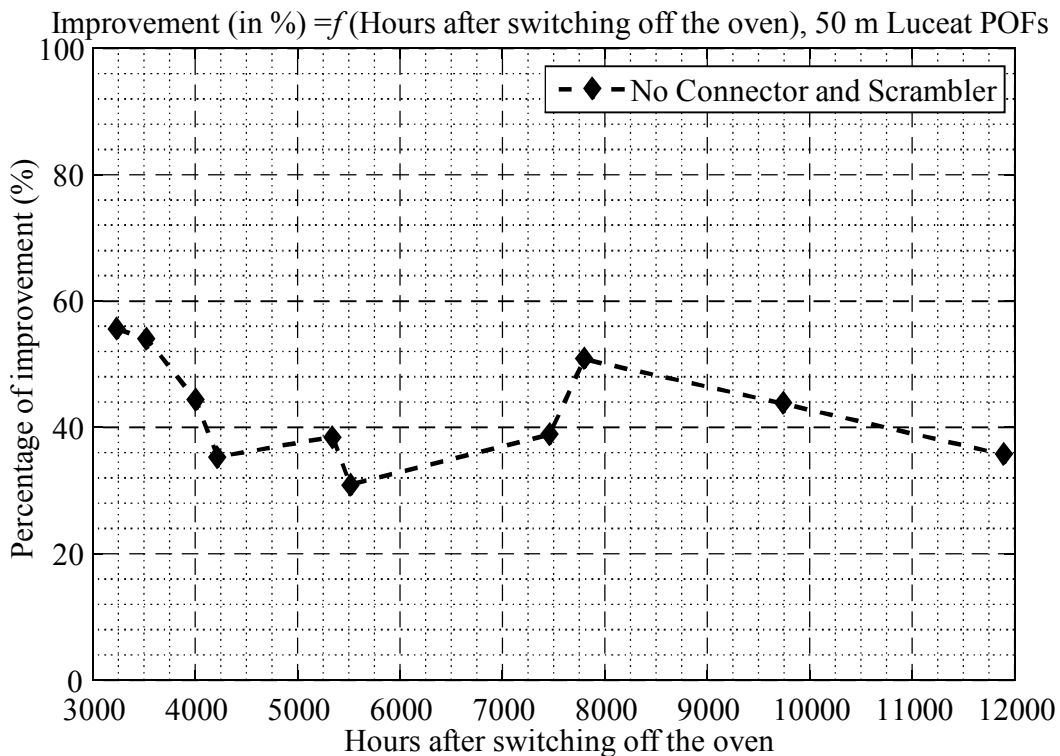
Βάσει της πειραματικής διάταξης στο Σχήμα 2.17, δύο στιγμιότυπα του πλάτους της απόκρισης συχνότητας ένα για καθεμία SI-POF του ζεύγους ινών της LUCEAT (αναφοράς και θερμικά επεξεργασμένη) φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Τα στιγμιότυπα ήταν αποτέλεσμα μετρήσεων 7460 ώρες από τη στιγμή που έσβησε ο φούρνος. Όπως και κατά τη διαδικασία της θέρμανσης, οι ρυθμίσεις του οργάνου (Analyzer) ήταν ίδιες όσον αφορά το εξερχόμενο ηλεκτρικό σήμα, αλλά και την επεξεργασία της λαμβανόμενης καμπύλης. Τα στιγμιότυπα κανονικοποιήθηκαν ως προς τη μέγιστη τιμή τους. Η διαφορά είναι οφθαλμοφανώς υπέρ της ίνας που υπέστη τη θερμική διαδικασία. Το οπτικό εύρος ζώνης στα 3 dB του στιγμιότυπου της απόκρισης συχνότητας της θερμικά κατεργασμένης POF ήταν 477.82 MHz, σχεδόν 40% υψηλότερο από αυτό της POF αναφοράς που μετρήθηκε περίπου 341.97 MHz υπό την ίδια βαθμονόμηση. Στο ίδιο σχήμα, απεικονίζεται και ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας της ίνας που θερμάνθηκε προτού όμως τοποθετηθεί στο φούρνο και ακριβώς πριν περάσει από αυτή διαδικασία που περιγράφηκε. Αυτό το στιγμιότυπο αντιστοιχεί στην διακεκομμένη καμπύλη. Η POF πριν την θερμική κατεργασία (και έξω από το φούρνο) παρουσίαζε εύρος ζώνης κοντά στα 338.22 MHz, μία τιμή κοντά στα 341.97 MHz της POF αναφοράς. Η αρχική απόκριση συχνότητας για την POF, προτού περάσει την θερμική επεξεργασία, έχει προκύψει από άλλη βαθμονόμηση σε σχέση με τις άλλες δύο μετρήσεις, αλλά είναι κοντά στην τιμή εύρους ζώνης της ίνας αναφοράς. Επιπλέον, υπενθυμίζεται ότι η μέση τιμή που είχε μετρηθεί αρχικά στους 22.5°C (Σχήμα 2.11) ήταν 337.05 MHz και αυτή η τιμή είχε μετρηθεί με την ίνα εντός του φούρνου.



Σχήμα 2.18. Ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας για καθεμία SI-POF από το ζεύγος της LUCEAT των 50 μέτρων, 7460 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου και ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας της SI-POF πριν την εκκίνηση της θερμικής κατεργασίας.

Η εξέλιξη της αύξησης του εύρους ζώνης της ίνας σαν συνάρτηση του χρόνου για την θερμικά κατεργασμένη LUCEAT SI-POF φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο χρόνο μετρημένο σε ώρες που έχουν περάσει από το τέλος της

διαδικασίας θέρμανσης με το σβήσιμο του φούρνου. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στη βελτίωση του εύρους ζώνης της θερμικά κατεργασμένης ίνας σε σχέση με την αντίστοιχη ίνα αναφοράς. Η βελτίωση είναι εκφρασμένη σαν ποσοστιαία αύξηση του εύρους ζώνης σε σχέση με το εύρος ζώνης της ίνας αναφοράς υπό καθεστώς ίδιας βαθμονόμησης. Σαφέστερα, για την αποφυγή στατιστικών διακυμάνσεων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε λανθασμένα αποτελέσματα, καθεμία τιμή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.19 έχει προκύψει ως εξής: από μία ακολουθία δέκα τιμών εύρους ζώνης που προέκυψαν από 10 στιγμιότυπα αποκρίσεων συχνότητας για την θερμικά κατεργασμένη ίνα εκτιμήθηκε μία μέση τιμή. Όμοια, υπό την ίδια βαθμονόμηση, μία μέση τιμή εκτιμήθηκε από μία ακολουθία δέκα τιμών εύρους ζώνης για την ίνα αναφοράς του ίδιου κατασκευαστή. Η διαφορά των δύο μέσων τιμών διαιρεμένη με το μέσο εύρος ζώνης της ίνας αναφοράς έδωσε την ποσοστιαία μεταβολή ως προς το εύρος ζώνης της μη κατεργασμένης ίνας αναφοράς από την ίδια καλούμπα. Αυτό το ποσοστό αποτελεί ένα σημείο στο Σχήμα 2.19 που αντιστοιχεί σε κάποια χρονική στιγμή που αναγράφει ο οριζόντιος άξονας. Επισημαίνεται ότι τα δέκα στιγμιότυπα αποκρίσεων συχνότητας από τα οποία προήλθε η δεκάδα των τιμών εύρους ζώνης ανά ίνα μετρήθηκαν υπό τις ίδιες τιμές παραμέτρων του Analyzer που εφαρμόστηκαν κατά τη θερμική κατεργασία και αναφέρθηκαν πιο πάνω, με τη μόνη διαφορά ότι οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά τρία και όχι ανά ένα λεπτό. Τονίζεται ότι σε αυτό το σετ μετρήσεων η διακύμανση των τιμών του εύρους ζώνης που μετρήθηκαν για καθεμία ίνα ήταν πολύ μικρή. Επιπροσθέτως, η ίδια ακριβώς διαδικασία για τη συλλογή μέσων τιμών εύρους ζώνης και ποσοστιαίων μεταβολών αυτού λόγω της θέρμανσης ακολουθήθηκε και για το δεύτερο ζεύγος ινών, όπως αναφέρεται πιο κάτω.



Σχήμα 2.19. Βελτίωση του οπτικού εύρους ζώνης σα συνάρτηση του χρόνου μετά το σβήσιμο του φούρνου για την θερμικά κατεργασμένη LUCEAT SI-POF 50 μέτρων σε σύγκριση με την SI-POF αναφοράς του ίδιου κατασκευαστή με εφαρμογή άμεσης σύνδεσης της πηγής με την ίνα.

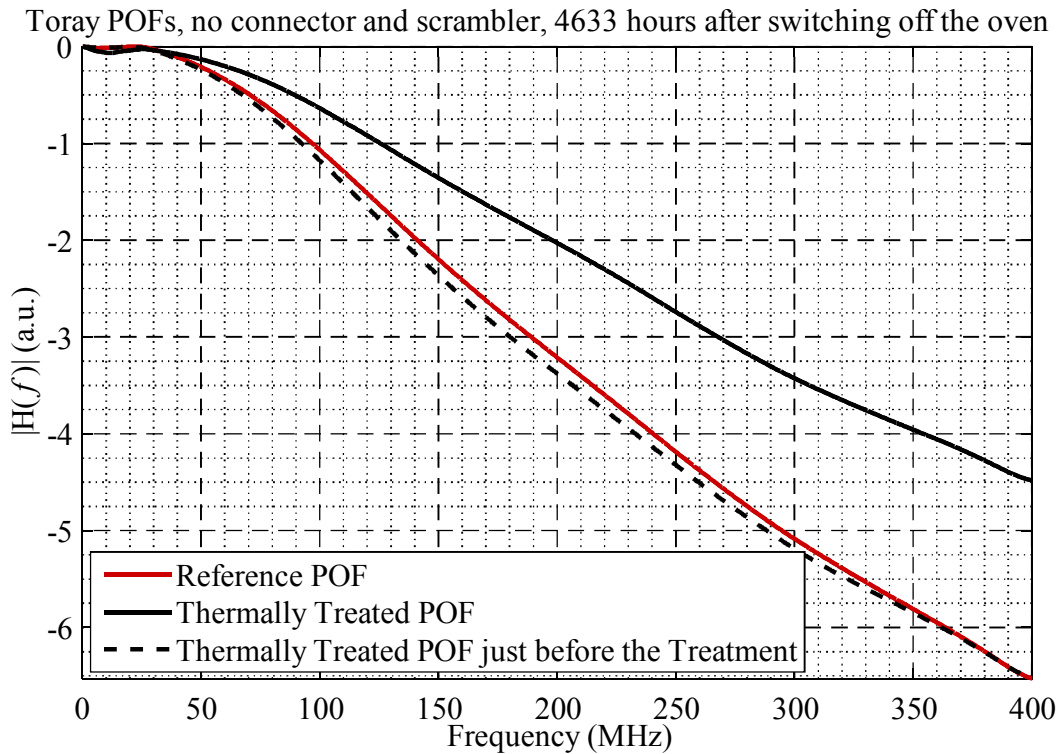
Μένοντας στο ζεύγος των LUCEAT SI-POFs, όπως μπορεί εύκολα να παρατηρήσει κανείς στο Σχήμα 2.19, η SI-POF που υπέστη τη θερμική κατεργασία ξεπερνά καθαρά την SI-POF αναφοράς σε όλες τις μετρήσεις ακόμα και 11900 ώρες μετά από το τέλος της θερμικής κατεργασίας. Ακόμα και στη «χειρότερη» μέτρηση, 5513 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου, η βελτίωση για την θερμικά κατεργασμένη SI-POF της LUCEAT

ήταν πάνω από 30%, καθώς το οπτικό εύρος ζώνης για την ίνα αναφοράς μετρήθηκε περίπου 324.42 MHz, ενώ για την θερμικά κατεργασμένη ίνα το αντίστοιχο εύρος ζώνης ήταν 424.79 MHz. Η εκτίμηση της μέσης ποσοστιαίας βελτίωσης από τις τιμές εύρους ζώνης των δύο POFs από όλες τις τιμές στο Σχήμα 2.19 ήταν λίγο πάνω στο 42.78%.

Εκτός από την επίδραση στο εύρος ζώνης, εξετάστηκε και η επίδραση της θερμικής κατεργασίας στις οπτικές απώλειες των δειγμάτων 50 μέτρων της LUCEAT. Για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε η ίδια πηγή (FP-LD [63]) χωρίς διαμόρφωση και μία φωτοδίοδος με μεγάλη ενεργό επιφάνεια (Melles-Griot). Αρχικά γινόταν μία βαθμονόμηση του συστήματος χρησιμοποιώντας το τμήμα ίνας των 30 cm που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση του αρχικού συστήματος, όπου απομονωνόταν η απόκριση συχνότητας αποκλειστικά της SI-POF κατά μήκος της οποίας μεταδιδόταν το σήμα σάρωσης του Analyzer. Με αυτό τον τρόπο, μετρούνταν η ισχύς που έφτανε στο δέκτη μετά από διάδοση του φωτός κατά 30 cm. Θεωρώντας το μήκος της ίνας αμελητέο για μήκος 30 cm, η οπτική ισχύς που μετρούνταν στη φωτοδίοδο ήταν πολύ κοντά στην ισχύ εκπομπής. Η σύνδεση του πομπού με την ίνα γινόταν απευθείας όπως στο Σχήμα 2.17. Η σύνδεση στο δέκτη γινόταν με κατάλληλο συνδετήρα που προσαρμοζόταν πάνω στο δέκτη. Μετά από αυτή τη μέτρηση, αφαιρούνταν το τμήμα των 30 cm και αντικαθίστατο από τη θερμικά κατεργασμένη ίνα των 50 μέτρων μετρώντας την ισχύ στη φωτοδίοδο. Από τις διαφορές των δύο τιμών σε dB προέκυπταν οι απώλειες για το κομμάτι της θερμικά κατεργασμένης ίνας. Η ίδια διαδικασία ακολουθούνταν και για την περίπτωση της ίνας αναφοράς από την καλούμπα του ίδιου κατασκευαστή. Αφαιρώντας τις απώλειες της θερμικά κατεργασμένης ίνας από αυτές της ίνας αναφοράς, προέκυπτε η διαφορά σε dB των απωλειών, η οποία αν ήταν θετική (σε dB) σήμαινε κέρδος, αλλιώς στις απώλειες υπερτερούσε η ίνα αναφοράς. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την περίπτωση των ινών της TORAY. Επιστρέφοντας στο ζεύγος SI-POFs της LUCEAT, για όσες μετρήσεις απωλειών πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα των 11900 ωρών, εκτιμήθηκε κέρδος σε όλες τις περιπτώσεις για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα που κυμαινόταν από 0.5 dB μέχρι 0.95 dB. Το κέρδος των 0.5 dB για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα των 50 μέτρων προέκυψε επειδή οι απώλειές της μετρήθηκαν περίπου ίσες με 6.00 dB, ενώ για την LUCEAT ίνα αναφοράς οι απώλειες ήταν περίπου 6.50 dB. Χρονικά, οι συγκεκριμένες μετρήσεις απωλειών πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά τις μετρήσεις από τις οποίες προέκυψαν οι καμπύλες στο Σχήμα 2.18.

Παρόμοια συμπεριφορά ήταν τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από το ζεύγος ινών της TORAY. Ένα τυπικό σείτ καμπυλών του μέτρου της απόκρισης συχνότητας της θερμικά κατεργασμένης και της ίνας αναφοράς φαίνονται στο Σχήμα 2.20 που ακολουθεί. Οι μετρήσεις που αντιστοιχούν στις συνεχείς γραμμές μετρήθηκαν 4633 ώρες μετά το τέλος της διαδικασίας θέρμανσης που ήδη περιγράφηκε. Αυτό που φαίνεται καθαρά είναι η αύξηση του εύρους ζώνης για την κατεργασμένη ίνα. Βάσει των αποτελεσμάτων, το εύρος ζώνης για την ίνα αναφοράς ήταν λίγο πάνω από 189 MHz, ενώ το εύρος ζώνης για την ίνα που υπέστη τη διαδικασία θέρμανσης ήταν ελάχιστα κάτω από 268 MHz. Αυτή η βελτίωση αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό πάνω από 41%. Η καμπύλη που αντιπροσωπεύεται από τη διακεκομμένη γραμμή είναι ένα βοηθητικό στιγμιότυπο του μέτρου της απόκρισης συχνότητας της θερμικά κατεργασμένης SI-POF προτού περάσει από τη διαδικασία θέρμανσης και ακριβώς πριν τοποθετηθεί μέσα στο φούρνο. Το εύρος ζώνης γι' αυτή την καμπύλη ήταν περίπου 180.24 MHz. Σε σύγκριση με το εύρος ζώνης των 189 MHz της ίνας αναφοράς στο ίδιο σχήμα, η ομοιότητα είναι προφανής, παρά το γεγονός ότι αυτές οι μετρήσεις αποκτήθηκαν ως αποτέλεσμα

διαφορετικής βαθμονόμησης* χρονικά, γεγονός που αναμενόταν. Υπενθυμίζεται και εδώ ότι η μέση τιμή του εύρους ζώνης στους 22.5°C ήταν 179.58 MHz.



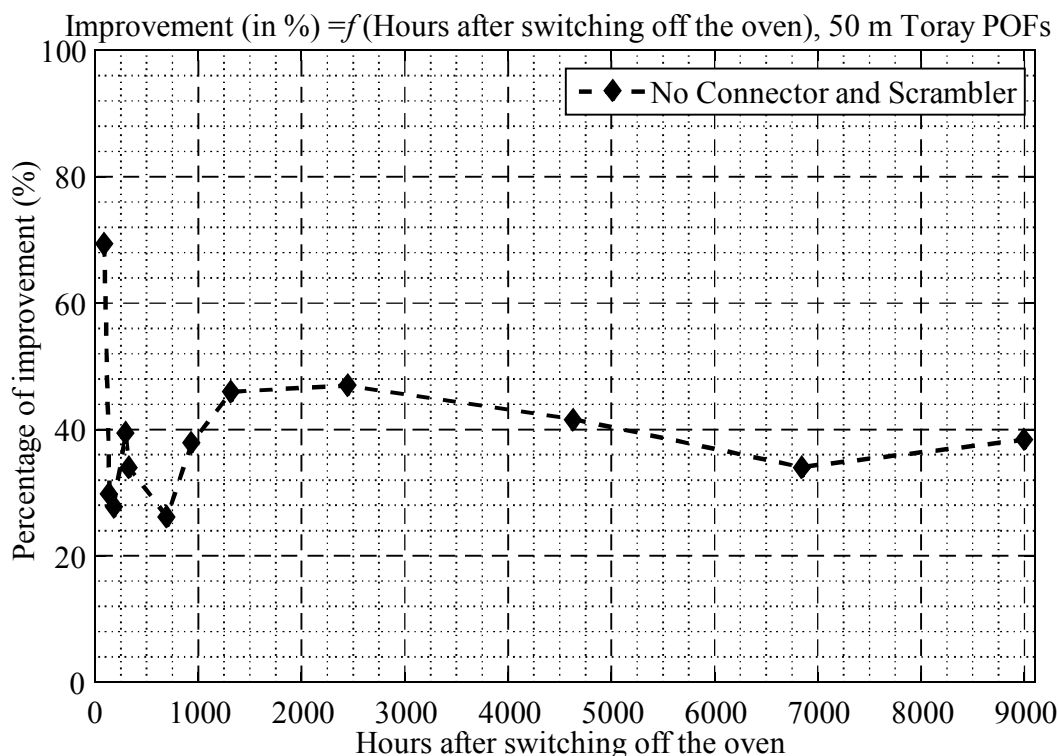
Σχήμα 2.20. Ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας για καθεμία SI-POF από το ζεύγος της TORAY των 50 μέτρων, 4633 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου και ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας της SI-POF πριν την εκκίνηση της θερμικής κατεργασίας.

Η χρονική εξέλιξη της βελτίωσης του εύρους ζώνης της κατεργασμένης ίνας από την TORAY απεικονίζεται στο Σχήμα 2.21. Μετά από κάποιες ταλαντώσεις των πρώτων εκατοντάδων ωρών, όπου και μετρήθηκε η χειρίστη ποσοστιαία βελτίωση που ήταν λίγο πάνω από 26%, το εύρος ζώνης της θερμικά κατεργασμένης ίνας κυμάνθηκε γύρω από μία τιμή μεγαλύτερη από 35% του εύρους ζώνης της ίνας αναφοράς. Σε ένα εύρος 9002 ωρών, η μέση ποσοστιαία βελτίωση ήταν περίπου 39.28%. Το εύρος ζώνης των 268 MHz από το Σχήμα 2.20 είναι αρκετά μικρότερο από τα 295.76 MHz που εκτιμήθηκαν στους 75°C για τη συγκεκριμένη POF. Η τελευταία τιμή αντιστοιχεί στη μέγιστη μετρημένη τιμή του εύρους ζώνης κατά τη διαδικασία θέρμανσης της TORAY SI-POF, όπως απεικονίστηκε και στο Σχήμα 2.13. Παρά τη διαφορά και τη σταθεροποίηση σε μία τιμή χαμηλότερη από αυτή που επιτεύχθηκε κατά τη θέρμανση, η σταθερή συμπεριφορά επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 2.21, ειδικά μετά τις πρώτες 750 ώρες από τη στιγμή που έσβησε ο φούρνος.

Όσον αφορά τις οπτικές απώλειες του ζεύγους των TORAY SI-POFs, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με την περίπτωση του ζεύγους των LUCEAT SI-POFs. Βάσει των μετρήσεων, οι απώλειες που μετρήθηκαν για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα ήταν πάντα μικρότερες από αυτές της ίνας αναφοράς. Το εύρος των τιμών μείωσης των απωλειών από όσες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα που ξεπέρασε τις 9000 ώρες κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 0.35 dB και 0.64 dB. Σχετικά με το χαμηλότερο κέρδος, οι απώλειες για την ίνα αναφοράς ήταν 7.20 dB, ενώ οι απώλειες για την κατεργασμένη ίνα ήταν 6.85 dB. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο χρονικό παράθυρο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν και οι μετρήσεις των αποκρίσεων

* Έχει ήδη αναφερθεί ότι η διαδικασία της βαθμονόμησης είναι ίδια, αλλά επαναλήφθηκε κατά διαστήματα, αφού οι μετρήσεις κάλυψαν χιλιάδες ώρες.

συχνότητας του οπτικού καναλιού που φαίνονται στο Σχήμα 2.20. Επομένως, επιβεβαιώθηκε η μείωση των απωλειών και για την περίπτωση των ινών της TORAY.

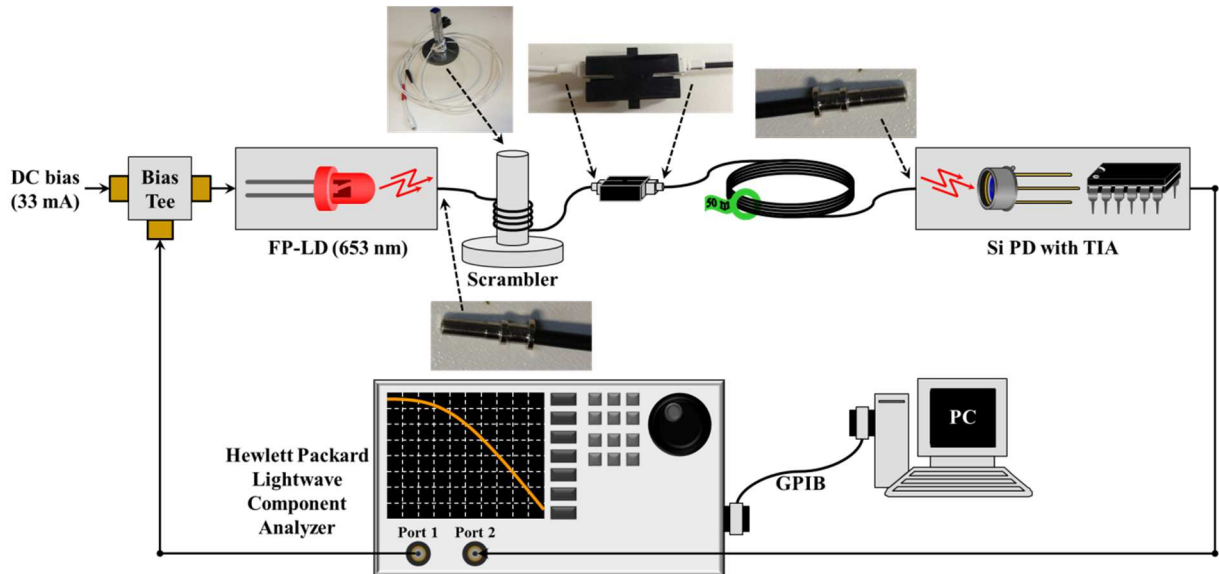


Σχήμα 2.21. Βελτίωση του οπτικού εύρους ζώνης σε συνάρτηση του χρόνου μετά το σβήσιμο του φούρνου για την θερμικά κατεργασμένη TORAY SI-POF 50 μέτρων σε σύγκριση με την SI-POF αναφοράς του ίδιου κατασκευαστή με εφαρμογή άμεσης σύνδεσης της πηγής με την ίνα.

Η ερμηνεία των πειραματικών ευρημάτων που περιγράφηκαν βασίζονται στην υπόθεση ότι με τη θερμική διαδικασία που περιγράφηκε και από την οποία πέρασαν ίνες διαφορετικών κατασκευαστών προκαλείται μείωση της σωρευμένης διασποράς των τρόπων στο μήκος των 50 μέτρων που ήταν τα δείγματα. Έχοντας ήδη δώσει κάποιες εξηγήσεις οι οποίες φαίνεται να επιβεβαιώνονται, η μείωση της διασποράς των τρόπων αποδίδεται στην αύξηση του μήκους σύζευξης πέρα από το οποίο επικρατεί η EMD. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μικρότερο πλήθος τρόπων ανώτερης τάξης και κατά συνέπεια μικρότερη διασπορά των τρόπων για τις ίνες των 50 μέτρων που υπέστησαν τη θερμική κατεργασία. Η προέλευση της ενεργοποίησης των τρόπων ανώτερης τάξης είναι οι ανομοιογένειες (διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης) και οι ακαθαρσίες/κατασκευαστικές αστοχίες (φυσαλίδες, μικρο-ρωγμές) μέσα στον πυρήνα από PMMA, που δρουν σαν κέντρα σκέδασης για την προσπίπτουσα οπτική δέσμη, όπως ήδη έχει δοθεί σχηματικά στο Σχήμα 2.6, οδηγώντας στη σύζευξη οπτικής ισχύος προς τρόπους υψηλότερης τάξης. Μεγαλύτερο πλήθος κέντρων σκέδασης έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο μήκος σύζευξης και επομένως, υψηλότερη διασπορά τρόπων. Με την θερμική κατεργασία των ινών μειώνονται τα κέντρα σκέδασης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ομοιογένειας του υλικού του πυρήνα. Αυτή η υπόθεση υποστηρίζεται και στην [115] όπου παρουσιάστηκαν πειραματικά αποτελέσματα σύμφωνα με τα οποία αυξάνοντας τη θερμοκρασία των SI-POFs, οι απώλειες ισχύος ελαττώνονται. Αυτό συνέβη εξαιτίας των μειωμένων διακυμάνσεων του δείκτη διάθλασης κατά μήκος του πυρήνα της ίνας και των λιγότερων γεωμετρικών παραμορφώσεων, που έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών λόγω σκέδασης στις POFs και την ελάττωση των απωλειών από ακτινοβολήση, αντίστοιχα. Ωστόσο, η μείωση των κέντρων σκέδασης έχει ως αποτέλεσμα τη διέγερση μικρότερου πλήθους τρόπων ανώτερης τάξης και κατά συνέπεια τη μικρότερη διασπορά των τρόπων. Όμοια, η αναπόφευκτη διέγερση των τρόπων ανώτερης τάξης μετατοπίζεται σε μεγαλύτερο

μήκος, δηλαδή προκύπτει αύξηση του μήκους σύζευξης. Παρά το γεγονός ότι τα πειραματικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα στην [115] προέκυψαν και από πρόσθετες επιμηκύνσεις που επιβλήθηκαν στις ίνες, η επίδραση της θερμοκρασίας είναι ίδια και σε ίνα που δεν υπόκειται σε επιμηκύνσεις, όπως αποδείχθηκε και από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν εδώ.

Προφανώς, οι προηγούμενες θεωρήσεις ισχύουν υπό την προϋπόθεση ότι μία στενή και καλά ευθυγραμμισμένη δέσμη εισέρχεται στο κεντρικό τμήμα του πυρήνα της ίνας διεγείροντας μόνο χαμηλής τάξης τρόπους στην είσοδο του οπτικού καναλιού. Στην περίπτωση που εφαρμοσθούν συνθήκες πλήρους κάλυψης της έδρας εισόδου της ίνας (overfilled launching conditions), όλοι οι οπτικοί τρόποι διεγείρονται από την αρχή της ίνας. Σε αυτή την περίπτωση, δε θα αναμενόταν κάποια βελτίωση στο εύρος ζώνης της θερμικά επεξεργασμένης SI-POF.



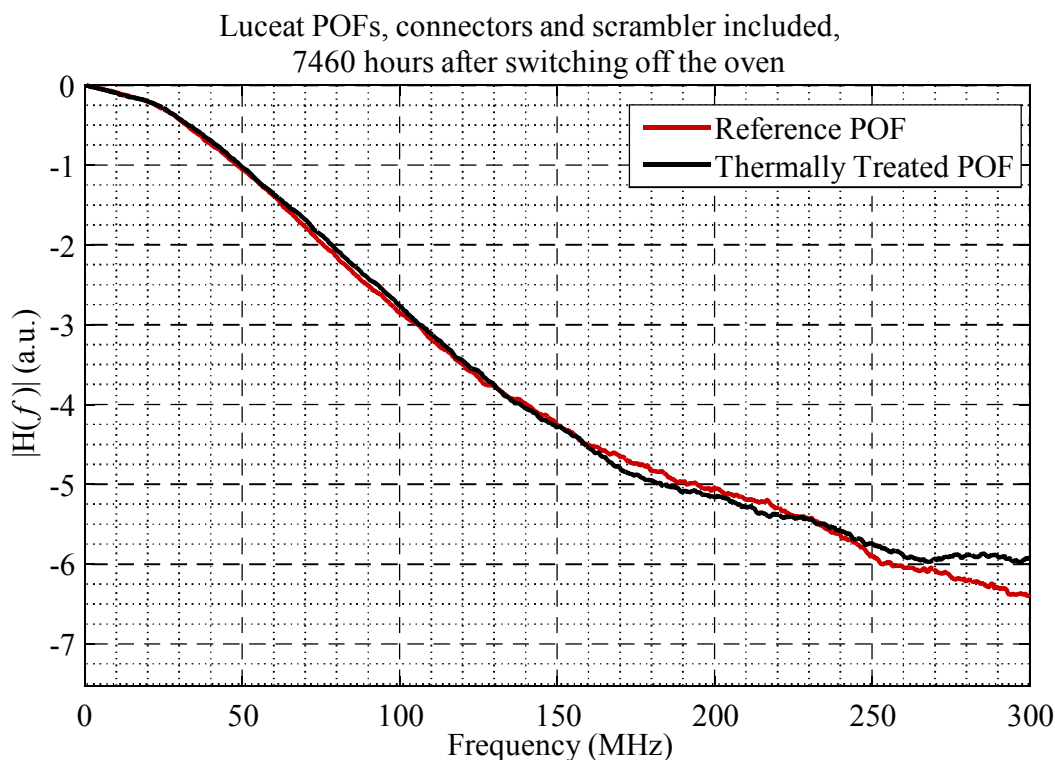
Σχήμα 2.22. Πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις του μέτρου της απόκρισης συχνότητας (optical-to-optical) τόσο της SI-POF που υπέστη τη θέρμανση όσο και της SI-POF αναφοράς. Η σύνδεση μεταξύ ίνας και δέκτη είναι άμεση, ενώ μεταξύ ίνας και πομπού χρησιμοποιήθηκε μία διάταξη τύπου scrambler για τη διέγερση όλων των τρόπων κατά την είσοδο της δέσμης στην ίνα καλύπτοντας την επιφάνεια του πυρήνα (overfilled launching) και ένας συνδετήρας για τη σύνδεση του scrambler με την ίνα.

Οι θεωρητικές ερμηνείες που μόλις αναφέρθηκαν επιβεβαιώθηκαν πειραματικά. Το Σχήμα 2.22 απεικονίζει τις αλλαγές που έγιναν στην πειραματική διάταξη για να είναι δυνατή η εξέταση της επίδρασης της συνθήκης εισόδου της οπτικής δέσμης με πλήρη κάλυψη της επιφάνειας εισόδου της ίνας. Αυτή η συνθήκη επιτεύχθηκε πειραματικά με την εισαγωγή ενός συμπλέκτη τρόπων (mode scrambler) στην αρχή της μετάδοσης. Εκδοχές scrambler για συστήματα με SI-POFs είχαν ήδη αναπτυχθεί και ενσωματωθεί σε πειραματικές διατάξεις [118], [119]. Ο scrambler εδώ υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα κομμάτι μίας τυπικής PMMA SI-POF ίνας μήκους 16.5 cm τυλιγμένη γύρω από ένα κύλινδρο ακτίνας 0.65 cm. Το τμήμα ίνας ήταν της R&M με διάμετρο πυρήνα 980 μm, διάμετρος μανδύα (μαζί με τον πυρήνα) 1000 μm, διάμετρος καλωδίου 2.20 mm, υλικό περιβλήματος polyethylene, αριθμητικό άνοιγμα 0.5 και συντελεστή απωλειών κάτω από 0.22 dB/m [120]. Ο scrambler τοποθετήθηκε μεταξύ της οπτικής πηγής και της υπό εξέταση ίνας. Με την πηγή η σύνδεση ήταν άμεση, ενώ το άλλο άκρο του scrambler κατέληγε σε κατάλληλο συνδετήρα που συνδεόταν σε προσαρμογέα για την σύνδεση με την εξεταζόμενη SI-POF. Στο άκρο της εξεταζόμενης ίνας υπήρχε ο αντίστοιχος (αποσπώμενος) συνδετήρας. Οι πρόσθετες απώλειες που εισήγαγε ο συνδυασμός scrambler και συνδετήρα ήταν λίγο πάνω από 24 dB. Με αυτή την προσθήκη, γινόταν μία νέα βαθμονόμηση του συστήματος ώστε να περιλαμβάνεται στο σύστημα πριν την

προσθήκη κάποια ίνας και ο scrambler των τρόπων. Επομένως, σε αυτό το σενάριο απομονωνόταν η απόκριση συχνότητας της εκάστοτε POF που συνδεόταν σε ένα σύστημα που διαφέρει από το προηγούμενο στο ότι μεταξύ οπτικής πηγής και ίνας μεσολαβεί ο scrambler.

Στο Σχήμα 2.23 απεικονίζονται τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας της ίνας αναφοράς και της ίνας που πέρασε από τη θερμική διαδικασία, και οι δύο SI-POFs της LUCEAT. Τα αποτελέσματα δείχνουν καθαρά ότι υπό το καθεστώς πλήρους κάλυψης της επιφάνειας του πυρήνα της ίνας κατά την είσοδο του φωτός δεν προκύπτει κάποιο κέρδος στο εύρος ζώνης για την ίνα που υπέστη τη θερμική κατεργασία και οι δύο SI-POF παρουσιάζουν την ίδια επίδοση. Τα δύο στιγμιότυπα ελήφθησαν 7460 από το τέλος της θερμικής κατεργασίας και ανήκουν στο ίδιο σετ μετρήσεων με τις αποκρίσεις που εικονίζονται στο Σχήμα 2.18. Μένοντας στο Σχήμα 2.23, οι τιμές εύρους ζώνης στα 3 dB για το στιγμιότυπο της απόκρισης συχνότητας της ίνας αναφοράς και για το στιγμιότυπο της θερμικά κατεργασμένης ίνας είναι 105.97 MHz και 106.47 MHz, αντίστοιχα.

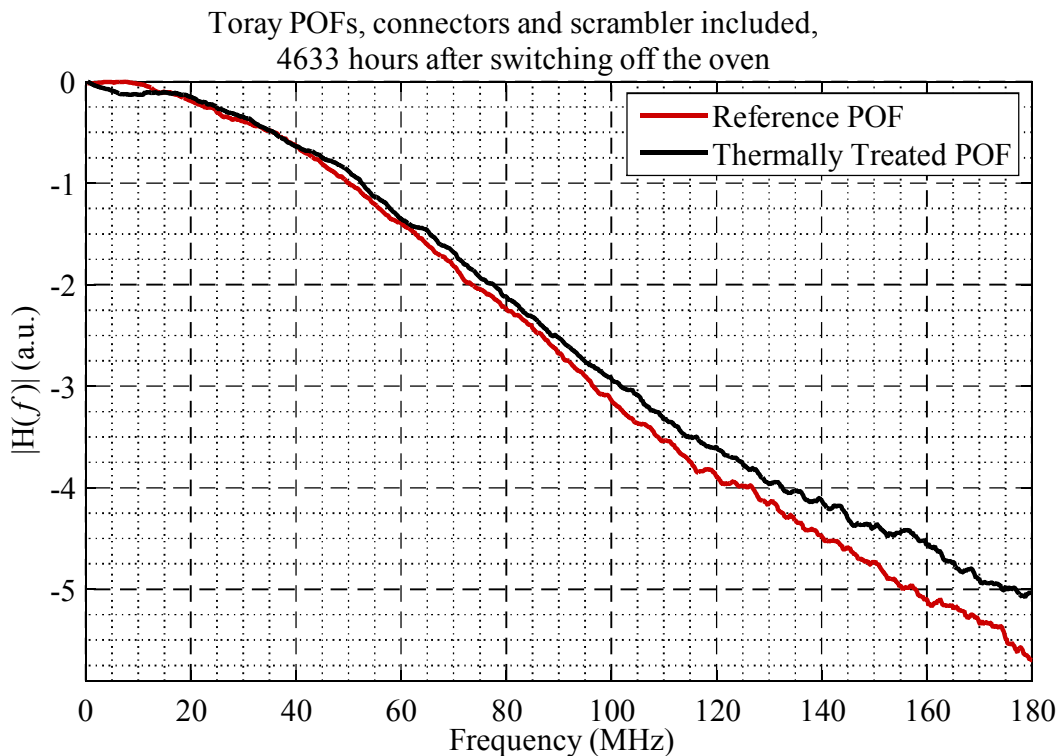
Σχετικά με τις οπτικές απώλειες υπό το νέο καθεστώς εισόδου του φωτός στις SI-POFs των 50 μέτρων της LUCEAT, όπως και πριν, η κατάλληλη βαθμονόμηση προηγήθηκε των μετρήσεων. Κατά τη βαθμονόμηση ενσωματώθηκε ο scrambler και για τη σύνδεση με τη φωτοδίοδο χρησιμοποιήθηκε το τμήμα των 30 cm που έχει αναφερθεί και σε όλες τις προηγούμενες διαδικασίες. Αυτή η σύνδεση θεωρήθηκε ως back-to-back και η μέτρηση της ισχύος αντιστοιχούσε στην εκπομπής του πομπού που περιλαμβάνει και το scrambler. Η υπόλοιπη διαδικασία είναι η ίδια με αυτή που αναφέρθηκε και στην περίπτωση της άμεσης σύνδεσης της πηγής με την SI-POF. Το κέρδος για την θερμικά κατεργασμένη ίνα κυμάνθηκε σε ένα εύρος μεταξύ 0.40 dB και 0.82 dB. Η χειρότερη περίπτωση προέκυψε και πάλι για το τρέχον σετ μετρήσεων που προέκυψε 7460 ώρες μετά το τέλος της θερμικής κατεργασίας και το σβήσιμο του φούρνου. Οι απώλειες για την ίνα αναφοράς ήταν περίπου ίσες με 7.00 dB, ενώ για την θερμικά κατεργασμένη ίνα οι απώλειες μετρήθηκαν κοντά στην τιμή των 6.60 dB.



Σχήμα 2.23. Ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας για καθεμία εκ των δύο LUCEAT SI-POFs 50 μέτρων, με το scrambler συνδεδεμένο στην πειραματική διάταξη, 7460 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου.

Εξετάζοντας το ζεύγος των SI-POFs της TORAY υπό καθεστώς πλήρους κάλυψης της έδρας εισόδου του φωτός στην ίνα, τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας για τις δύο ίνες που μετρήθηκαν 4633 ώρες από το τέλος της θερμικής επεξεργασίας της μίας εκ των δύο φαίνονται στο Σχήμα 2.24. Υπό το συγκεκριμένο καθεστώς εισόδου του φωτός στην ίνα, η SI-POF αναφοράς παρουσιάζει παρόμοια επίδοση όσον αφορά το εύρος ζώνης στα 3 dB με την ίνα που πέρασε από τη θερμική κατεργασία, αφού για την πρώτη μετρήθηκε μία τιμή εύρους ζώνης περίπου 96.65 MHz, ενώ για τη δεύτερη το εύρος ζώνης ήταν περίπου 101.89 MHz. Επομένως, προέκυψε ίδια συμπεριφορά των δύο ινών και για το δεύτερο κατασκευαστή.

Η «εκλέπτυνση» του πυρήνα και η ομαλοποίηση των ορίων πυρήνα-μανδύα δεν δίνει κάποιο όφελος υπό συνθήκες πλήρους κάλυψης της έδρας εισόδου της ίνας. Η μεταφορά ισχύος μεταξύ τρόπων για την θερμικά κατεργασμένη ίνα δεν γίνεται το ίδιο έντονα με την ίνα αναφοράς για το εξεταζόμενο μήκος, αλλά η μείωση των γεωμετρικών παραμορφώσεων στα όρια του πυρήνα με το μανδύα οδηγεί σε ελάττωση της ακτινοβολήσης τρόπων υψηλότερης τάξης, με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται το εύρος ζώνης για την ίνα που υπέστη την θερμική επεξεργασία, καθώς δεν σβήνουν οι τρόποι μέσα στον πυρήνα. Ποιοτικά, για την ίνα αναφοράς εκτελούνται οι ανάποδες διαδικασίες, έχοντας ως αποτέλεσμα παρόμοια τιμή για το εύρος ζώνης του ζεύγους των δύο ινών που προέρχονται από την ίδια καλούμπα του ίδιου κατασκευαστή.



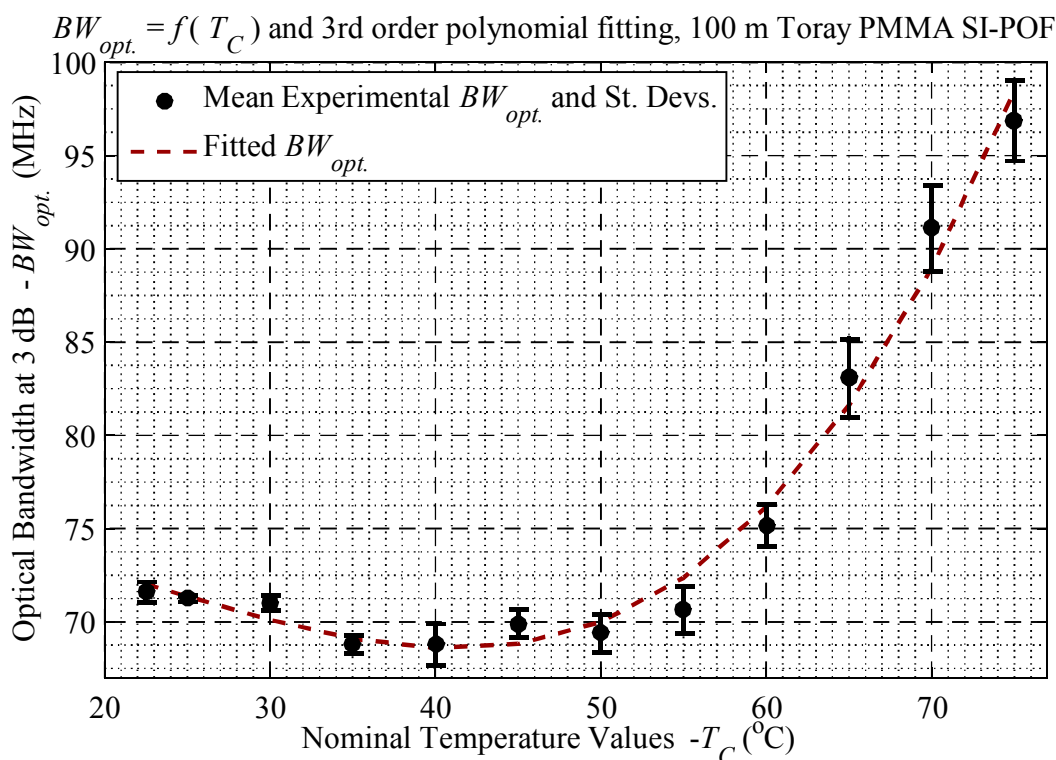
Σχήμα 2.24. Ένα στιγμιότυπο του πλάτους της απόκρισης συχνότητας για καθεμία εκ των δύο TORAY SI-POFs 50 μέτρων, με το scrambler συνδεδεμένο στην πειραματική διάταξη, 4633 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου.

Περνώντας στην επίδραση της διαδικασίας θέρμανσης στις απώλειες, 4633 ώρες μετά το τέλος της διαδικασίας, υπό καθεστώς πλήρους κάλυψης με τη φωτεινή δέσμη της έδρας εισόδου της ίνας, οι απώλειες για την ίνα αναφοράς εκτιμήθηκαν ύστερα από τη σχετική μέτρηση περίπου στα 8.35 dB. Από την αντίστοιχη μέτρηση για την SI-POF που θερμάνθηκε με τα βήματα που περιγράφηκαν οι απώλειες εκτιμήθηκαν στα 7.50 dB, δίνοντας ένα κέρδος περίπου 0.85 dB. Η μικρότερη τιμή κέρδους που μετρήθηκε για την περίπτωση της θερμικά κατεργασμένης SI-POF της TORAY, ήταν περίπου 0.5 dB. Επομένως, και στις δύο περιπτώσεις ινών διαφορετικών κατασκευαστών που θερμάνθηκαν ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, οι απώλειες μειώθηκαν ελαφρώς σε

συμφωνία με τη βιβλιογραφία [115]. Αυτή η συμπεριφορά υπέρ των θερμικά κατεργασμένων ινών της LUCEAT και της TORAY επιβεβαιώθηκε με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, όπως αναφέρθηκε.

Δεδομένου ότι η εκτίμηση ότι το μήκος σύζευξης έχει ολισθήσει προς μεγαλύτερη τιμή μετά την ολοκλήρωση της θερμικής κατεργασίας φαίνεται να ευσταθεί, γεννάται η ανάγκη διερεύνησης της επίδρασης της θέρμανσης σε μεγαλύτερα τμήματα πλαστικών ινών. Γι' αυτό το σκοπό, ένα τμήμα POF 100 μέτρων κόπηκε από την ίδια καλούμπα της TORAY από την οποία προήλθε και το ζεύγος ινών που ήδη εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν ως προς επιδόσεις εύρους ζώνης και απωλειών. Το δείγμα αυτό της ίνας τυλίχθηκε σε χαλαρό βρόχο διαμέτρου περίπου 30 cm. Εξαιτίας της απουσίας δεύτερου δείγματος 100 μέτρων του ίδιου κατασκευαστή, το συγκεκριμένο τμήμα POF μετρήθηκε πριν τη θερμική κατεργασία ώστε οι μετρήσεις να χρησιμοποιηθούν σαν αναφορά μετά τη θερμική κατεργασία. Μετά την προσεκτική βαθμονόμηση, πριν από τα βήματα της θερμικής κατεργασίας που περιγράφηκαν νωρίτερα και σε θερμοκρασία δωματίου, η μέση τιμή του εύρους ζώνης που μετρήθηκε ήταν 71.33 MHz. Γι' αυτή τη μέτρηση εφαρμόστηκε άμεση σύνδεση μεταξύ πηγής και POF. Η πειραματική διάταξη είναι ίδια με αυτή στο Σχήμα 2.10, με μόνη διαφορά την εξέταση ίνας μήκους 100 μέτρων.

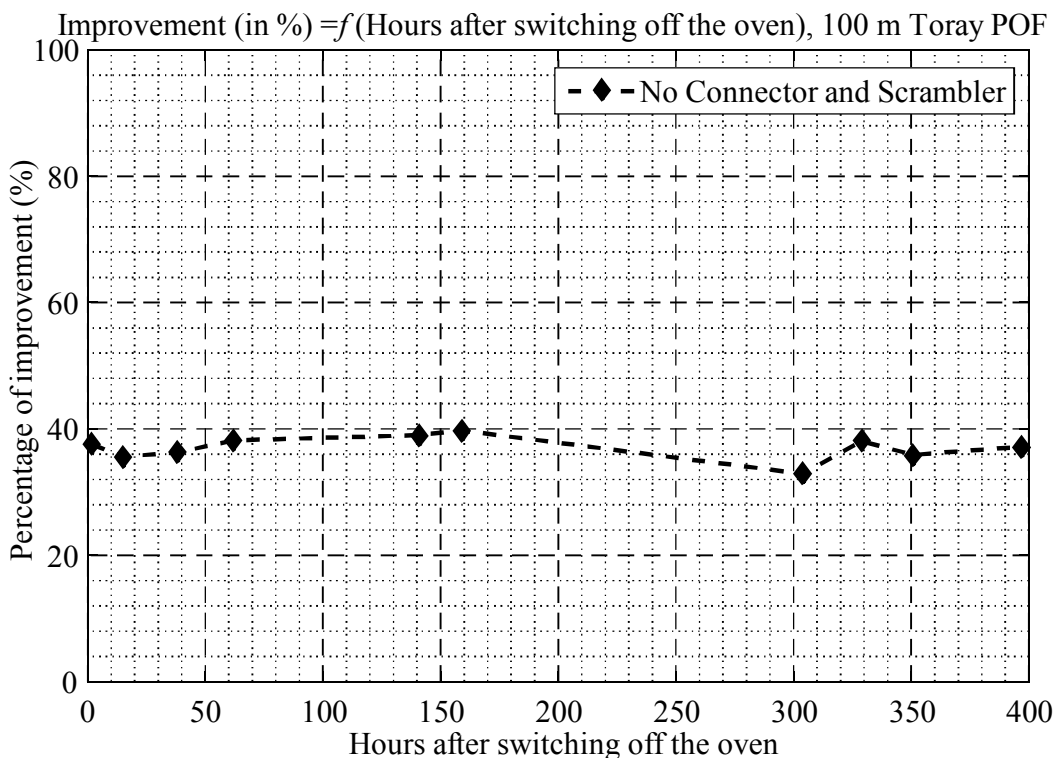
Οι μέσες τιμές εύρους ζώνης που εκτιμήθηκαν από τις μετρήσεις ανά ονομαστική τιμή θερμοκρασίας φαίνεται στο Σχήμα 2.25. Η τιμή εκκίνησης ήταν 71.61 MHz πολύ κοντά στην μέση τιμή εύρους ζώνης για την ίνα εκτός του φούρνου. Επισημαίνεται ότι οι δύο τιμές προέκυψαν υπό καθεστώς ίδιας βαθμονόμησης, όπως συνέβη και για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.25. Μεταβολή του οπτικού εύρους ζώνης με τη θερμοκρασία από 22.5°C μέχρι 75°C για την ίνα TORAY PMMA SI-POF 100 μέτρων. Δίνεται και η καμπύλη προσαρμογής.

Γι' αυτή την ίνα, μέχρι και τους 55°C, δεν εμφανίστηκε κάποιο κέρδος στο εύρος ζώνης. Αυτό είναι εύκολο να παρατηρηθεί από τις τιμές του κατακόρυφου άξονα που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.25 για το εύρος θερμοκρασιών που αναφέρθηκαν. Από τα 71.61 MHz που αναφέρθηκαν στους 22.5°C, το εύρος ζώνης έπεσε κάτω από 69 MHz στους 35°C και στους 40°C. Μετά από μία διακύμανση κάτω από τα 70 MHz στους 45°C και στους 50°C, το εύρος ζώνης ξεπέρασε τα 75 MHz (75.16 MHz) στους 60°C. Η

μεγάλη άνοδος παρατηρείται στο διάστημα από 65°C μέχρι και 75°C, όπου σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών το εύρος ζώνης αυξάνεται από περίπου 83.08 MHz σε 96.87 MHz. Απομονώνοντας το κρίσιμο κομμάτι όπου επήλθε η σημαντική αλλαγή, από 55°C μέχρι και 75°C, προέκυψε μία αύξηση μεγαλύτερη από 25 MHz, από 70.63 MHz σε 96.87 MHz. Η τελική αλλαγή στους 75°C αντιστοιχεί σε μία ποσοστιαία μεταβολή περίπου 35.81% σε σχέση με την αρχική τιμή των 71.33 MHz. Παρά το ότι οι μεταβολές γι' αυτό το τμήμα ίνας προέκυψαν αποκλειστικά μετά τους 55°C, με μικρή μείωση του εύρους ζώνης στις προηγούμενες θερμοκρασίες, η συμπεριφορά έχει ομοιότητα με τα άλλα δείγματα της TORAY στην τάση μεγάλης αλλαγής από τους 55°C και μετά. Στο Σχήμα 2.13 και στο Σχήμα 2.15 φαίνεται ότι η κλίση των καμπυλών προσαρμογής αυξάνεται στο τμήμα μετά τους 55°C παρά το ότι και οι δύο προηγούμενες καμπύλες έχουν πιο μονότονη συμπεριφορά σε όλη τη διάρκεια των αλλαγών θερμοκρασίας και μέχρι τους 75°C και τους 70°C στο Σχήμα 2.13, και στο Σχήμα 2.15, αντίστοιχα. Η συσσώρευση τάσεων που ήταν εντονότερες στο πιο εσωτερικό τμήμα των 100 μέτρων της TORAY της φαίνεται να δικαιολογεί αυτή τη συμπεριφορά για το συγκεκριμένο τμήμα ίνας. Η προσαρμοσμένη καμπύλη στις μετρήσεις στο Σχήμα 2.25 εκφράζεται από το πολυώνυμο τρίτου βαθμού που ακολουθεί: $BW_{opt.}(T_C) = 311.52 \times (T_C)^3 - 22854.62 \times (T_C)^2 + 296109.76 \times T_C - 73383150.79$. Το εύρος ζώνης είναι σε Hz. Κατά την επιστροφή στους 65°C για μία ώρα, η μέση τιμή του εύρους ζώνης που προέκυψε από τις μετρήσεις ήταν οριακά πάνω από 100 MHz.



Σχήμα 2.26. Βελτίωση του οπτικού εύρους ζώνης σα συνάρτηση του χρόνου μετά το σβήσιμο του φούρνου για την θερμικά κατεργασμένη TORAY SI-POF 100 μέτρων σε σύγκριση με τον εαυτό της προτού υποστεί τη θερμική κατεργασία με εφαρμογή άμεσης σύνδεσης της πηγής με την ίνα.

Η εξέλιξη της αυξημένης τιμής του εύρους ζώνης με το χρόνο για το τμήμα των 100 μέτρων δίνεται στο Σχήμα 2.26 μέχρι και 397 ώρες από την ολοκλήρωση της θερμικής κατεργασίας. Για τη λήψη των μετρήσεων μετά τη θερμική κατεργασία ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφηκε για τα ζεύγη ινών τόσο της LUCEAT όσο και της TORAY. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή που ήδη περιγράφηκε και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.17, με μόνη διαφορά το μήκος της εξεταζόμενης ίνας. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στη ποσοστιαία βελτίωση του εύρους ζώνης της ίνας μετά τη θερμική κατεργασία σε σχέση με τη μέση τιμή του εύρους ζώνης που εκτιμήθηκε

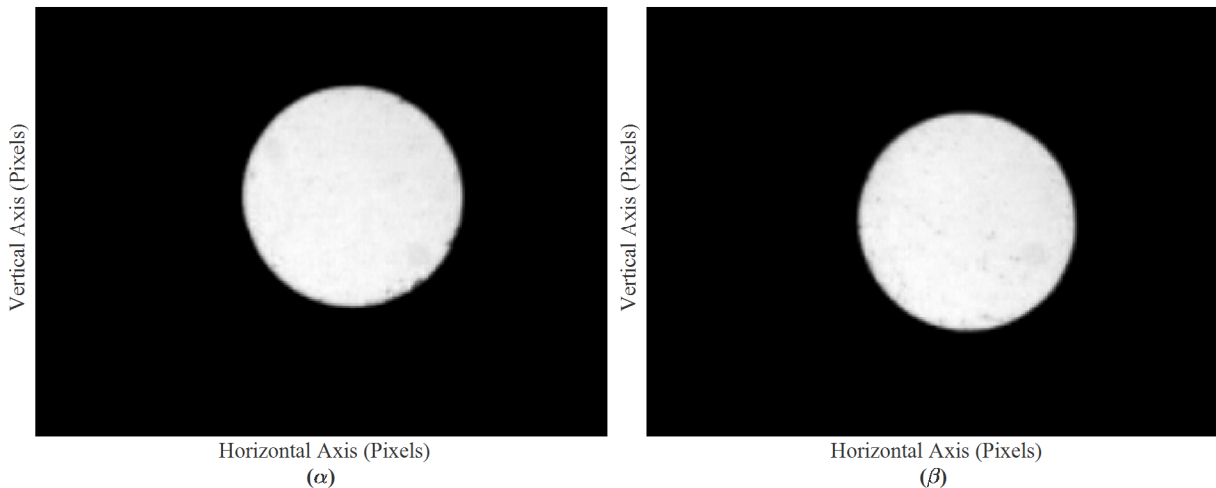
από τις μετρήσεις στιγμιότυπων της απόκρισης συχνότητας πριν από την θερμική κατεργασία (και ήδη αναφέρθηκε ότι ήταν περίπου 71.33 MHz). Η μέση βελτίωση από όλες τις τιμές ήταν ελάχιστα πάνω 37%. Αυτή η τιμή είναι ικανοποιητική διότι σε αυτό το μήκος θα έχει ήδη διεγερθεί μεγάλο πλήθος τρόπων ακόμα και με προσεκτική σύνδεση της πηγής με την ίνα ώστε να εισέρχεται η οπτική δέσμη στο κέντρο του πυρήνα της ίνας. Όπως είναι αναμενόμενο, όλα τα σημεία στο Σχήμα 2.26 προήλθαν μετά από νέα βαθμονόμηση το καθένα, αλλά η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιούνταν με προσοχή κάθε φορά, ώστε να εξασφαλιστεί μία όσο το δυνατό δικαιότερη σύγκριση. Από τη μορφή της κυματομορφής που σχηματίζεται, οι ποσοστιαίες μεταβολές από ομάδα μετρήσεων σε ομάδα μετρήσεων είναι μικρές, παρά τις διαφορετικές βαθμονομήσεις, και κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 32.92% μέχρι 39.76%. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η μέση ποσοστιαία βελτίωση και οι ποσοστιαίες τιμές στο Σχήμα 2.26 ήταν κοντά στην τιμή της μέγιστης βελτίωσης που προέκυψε για θερμοκρασία 75°C κατά τη διαδικασία της θερμικής κατεργασίας.

Όσον αφορά τις απώλειες σε ισχύ, μία σχετικά αυξημένη τιμή περίπου ίση με 17.72 dB μετρήθηκε αρχικά, προτού η ίνα τοποθετηθεί εντός του φούρνου και υποστεί τη θερμική εκλέπτυνση. Αυτή η τιμή είναι υψηλότερη από την μέγιστη ονομαστική τιμή που δίνεται στις προδιαγραφές της TORAY για το συγκεκριμένο τύπο POF (0.15 dB/m). Επιπλέον, για την περίπτωση άμεσης σύνδεσης της πηγής με την ίνα αναφοράς μήκους 50 μέτρων επίσης της TORAY, η τιμή των απωλειών εκτιμήθηκε στη χειρότερη περίπτωση περίπου 7.40 dB, ενώ όπως περιγράφηκε νωρίτερα, για την περίπτωση της χειρότερης μέτρησης όσον αφορά την βελτίωση των απωλειών της θερμικά κατεργασμένης ίνας σε σχέση με την ίνα αναφοράς, για την ίνα αναφοράς η τιμή των απωλειών ήταν περίπου 7.20 dB. Η τελευταία τιμή ήταν και η χαμηλότερη τιμή απωλειών που μετρήθηκε για την ίνα αναφοράς των 50 μέτρων όταν ήταν συνδεδεμένη άμεσα με την πηγή. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε συντελεστές εξασθένισης 0.148 dB/m και 0.144 dB/m, αντίστοιχα, που είναι μικρότεροι από τον συντελεστή εξασθένισης 0.1772 dB/m που αντιστοιχεί στην ίνα των 100 μέτρων πριν τη θέρμανσή της. Ακόμα και στις περιπτώσεις όπου μεσολαβούσε ο scrambler μεταξύ της πηγής και της ίνας αναφοράς των 50 μέτρων, οι απώλειες σε αναγωγή στα 100 μέτρα δεν ξεπέρασαν τα 17.72 dB. Σημειώνεται ότι το τμήμα των 100 μέτρων ήταν εσωτερικά της καλούμπας και ενδεχομένως να είχαν συσσωρευθεί τάσεις οι οποίες δεν υποχώρησαν μετά την κοπή του τμήματος και το δέσιμο σε χαλαρό βρόχο και παρά το ότι η ίνα δεν πέρασε από τη διαδικασία θέρμανσης αμέσως μετά την κοπή και τη προετοιμασία της (ξύσιμο και πέρασμα μεταλλικών κρίκων). Μετά τη διαδικασία θέρμανσης, οι μέσες απώλειες που προέκυψαν από όλες τις μετρήσεις απωλειών με την φωτοδίοδο μεγάλης επιφάνειας που πραγματοποιήθηκαν ήταν περίπου 15.74 dB. Η τελευταία τιμή απωλειών, 397 ώρες μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας θέρμανσης και το σβήσιμο του φούρνου ήταν περίπου 15.64 dB. Αναφέρεται ότι οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις μεταξύ των διαφορετικών τιμών των απωλειών που προέκυψαν και από διαφορετική διαδικασία βαθμονόμησης εμφανίστηκαν πριν τις πρώτες εκατό ώρες από το σβήσιμο του φούρνου. Σχετικά με τις υπόλοιπες τιμές των απωλειών που μετρήθηκαν υπάρχουν μεταβολές μέσα στη χρονική διάρκεια των μετρήσεων των απωλειών, αλλά είναι σχετικά μικρής διακύμανσης γύρω από τη μέση τιμή. Και πάλι, η θερμική κατεργασία φάνηκε να βελτιώνει και τις απώλειες σε μεγαλύτερα μήκη. Η περίπτωση πλήρους κάλυψης της έδρας εισόδου της δέσμης δεν εξετάστηκε για την POF των 100 μέτρων εξαιτίας του υψηλών απωλειών που εισάγονται από τον scrambler.

Ένα ζήτημα που πρέπει να διαλευκανθεί είναι ο αποκλεισμός της περίπτωσης να έχουν μεταβληθεί τα χαρακτηριστικά των ινών όσον αφορά το προφίλ του δείκτη διάθλασης. Αυτό, λοιπόν, που μελετήθηκε ήταν τα πρότυπα κοντινού πεδίου (Near Field Patterns – NFPs) για την ίνα αναφοράς, αλλά και για την θερμικά κατεργασμένη ίνα για τους δύο

κατασκευαστές των οποίων τα τμήματα ινών που εξετάστηκαν. Σημειώνεται ότι για τη μέτρηση του NFP, εφαρμόστηκε η μέθοδος που περιγράφεται στην [121] με τη μόνη διαφορά ότι μετά τον objective φακό χρησιμοποιήθηκε μία Charge-Coupled Device – (CCD) κάμερα, αντί για μία φωτοδιόδο. Με αυτό το σχηματισμό, αποφεύχθηκαν οι πρόσθετες μηχανικές μονάδες που θα έπρεπε να ενσωματωθούν για να επιτραπεί η κίνηση της φωτοδιόδου ώστε να σαρωθεί το είδωλο στην έξοδο του objective φακού. Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε ήταν μία απλή δίοδος laser με ονομαστική τιμή για το μήκος κύματος τα 650 nm [122] με εφαρμογή 28 mA ρεύματος πόλωσης. Έχοντας χρησιμοποιήσει το scrambler μαζί με το συνδετήρα για τη σύνδεσή του με την οπτική ίνα για να επιβληθεί ένα καθεστώς εισόδου της οπτικής δέσμης με πλήρη κάλυψη της διατομής του πυρήνα της ίνας, έγινε η διέγερση όλων των τρόπων εκ των προτέρων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μήκος των ινών θεωρείται επαρκές ώστε να μπορεί να υποθεθεί ότι έχει αποκατασταθεί η κατανομή των ενεργοποιημένων τρόπων μέσα στην εκάστοτε υπό εξέταση ίνα, η μέτρηση του NFP ισοδυναμεί με τη μέτρηση του προφίλ του δείκτη διάθλασης της ίνας. Η κάμερα με CCD αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Phillips ToUCam Pro (μοντέλο PCVC740K). Επιπλέον, οι ρυθμίσεις της κάμερας είχαν τεθεί με τέτοιο τρόπο ώστε σε οποιαδήποτε περίπτωση αυτή να μη μπαίνει σε καθεστώς κόρου κατά τη μέτρηση του NFP. Η αποφυγή του κόρου εξασφαλίστηκε με τη χρήση φίλτρου απορρόφησης στο ορατό μπροστά από τον CCD αισθητήρα.

NFPs of 50 m Toray POFs. (α) Reference POF, (β) thermally treated POF, 193 hours after switching off the oven. 640px× 480px images



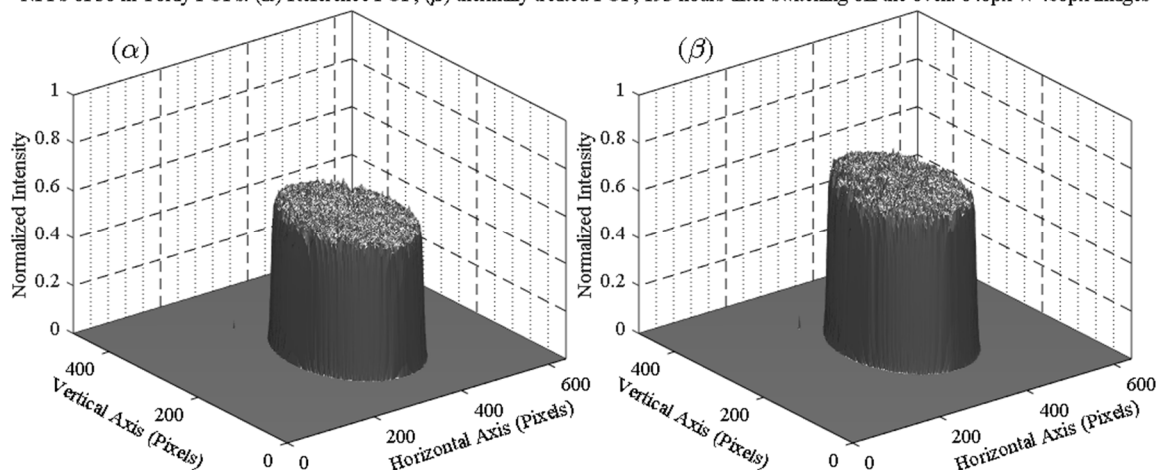
Σχήμα 2.27. Πρότυπα κοντινού πεδίου για τις SI-POFs της TORAY. (α) NFP για την ίνα αναφοράς και (β) NFP για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 193 ώρες από τη στιγμή που τέθηκε εκτός λειτουργίας ο φούρνος.

Για την ίνα αναφοράς 50 μέτρων της TORAY, η εικόνα από τη μέση τιμή 10 στιγμιότυπων μετρημένων NFPs δίνεται στο Σχήμα 2.27(α). Η απεικόνιση έγινε διατηρώντας τις τιμές όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις, δηλαδή η μέση τιμή υπολογίστηκε από 10 συνεχόμενα στιγμιότυπα εικόνων μεγέθους 640×480 σε pixel και για τους δύο άξονες. Αυτά που μετρούνταν ήταν οι εντάσεις των εικόνων απομονώνοντας το κόκκινο χρώμα, καθώς κόκκινο ήταν το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός από την πηγή. Τονίζεται ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 193 ώρες από την ολοκλήρωση της διαδικασίας θέρμανσης και το σβήσιμο του φούρνου για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα. Αυτό είναι ένα κοντινό διάστημα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας, καθώς οποιαδήποτε μεταβολή θα εξακριβωνόταν. Όμοια, στο Σχήμα 2.27(β), απεικονίζεται η μέση τιμή από 10 μετρήσεις του NFP από την έξοδο της θερμικά κατεργασμένης ίνας. Σημειώνεται ότι οι μέσες τιμές των εντάσεων που προέκυψαν για τις δύο ίνες, δεν υπέστησαν κάποια κανονικοποίηση ως προς τη μέγιστη τιμή τους. Επομένως, για καθεμία ίνα, αυτό που απεικονίζεται ανά pixel είναι η τιμή της μέσης έντασης από τις 10 μετρήσεις χωρίς πρόσθετη επεξεργασία, όπως προέκυψαν

από την κάμερα που μπορεί να αποδώσει κάποια τιμή μεταξύ 0 ως 1 (για το κόκκινο χρώμα). Από το Σχήμα 2.27 φαίνεται ότι οι δύο φωτεινοί δίσκοι έχουν ομοιόμορφα κατανομημένη ένταση στην επιφάνειά τους. Αυτό σημαίνει ότι το προφίλ του δείκτη διάθλασης παραμένει βηματικό και δεν επήλθε κάποια τροποποίηση λόγω της θερμικής κατεργασίας της μία εκ των δύο ίνων της TORAY.

Για να φανεί καλύτερα αυτή η διατήρηση του προφίλ του δείκτη διάθλασης τη ίνας, οι δύο εικόνες από το προηγούμενο σχήμα απεικονίστηκαν σε διαγράμματα τριών διαστάσεων με τους άξονες x και y να αποτελούν τους άξονες των pixels στο Σχήμα 2.27(α) και στο Σχήμα 2.27(β). Ο κατακόρυφος άξονας αφορά την ένταση που προέκυψε ως μέση τιμή από τα 10 διαδοχικά στιγμιότυπα. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το δυνατό εύρος τιμών για το συγκεκριμένο άξονα είναι μεταξύ 0 και 1 και αφορούν το απομονωμένο κόκκινο χρώμα. Για την ίνα αναφοράς, η αντίστοιχη απεικόνιση για το Σχήμα 2.27(α) δίνεται στο Σχήμα 3.28(α). Από την άλλη, η τρισδιάστατη απεικόνιση για την θερμικά κατεργασμένη ίνα από για το Σχήμα 2.27(α) δίνεται στο Σχήμα 3.28(β), αντίστοιχα. Αυτό που είναι πολύ εύκολο να παρατηρήσει ο αναγνώστης είναι ότι το βηματικό προφίλ του δείκτη διάθλασης για την θερμικά κατεργασμένη ίνα διατηρήθηκε τελικά, ενισχύοντας τη θέση ότι η θερμική διαδικασία που εφαρμόστηκε μειώνει τις διαταραχές εντός του πυρήνα, που όπως έχει αναφερθεί, τέτοιες διαταραχές είναι μικρορωγμές, φυσαλίδες, ακαθαρσίες κατά τη κατασκευή κ.α., και εξομαλύνει τα όρια πυρήνα-μανδύα. Η μείωση των διαταραχών οδηγεί σε μείωση των απωλειών λόγω σκεδάσεων και λόγω ακτινοβολήσης στα όρια πυρήνα μανδύα, και κάτι τέτοιο αντιστοιχεί σε μείωση των διακυμάνσεων του δείκτη διάθλασης και όχι κάποια αλλαγή του προφίλ του δείκτη διάθλασης. Επιπροσθέτως, η εικόνα των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνουν τη λειτουργία εκτός κόρου για την κάμερα, ενώ γίνεται φανερό από τις μετρήσεις ότι η ένταση του φωτός απεικονίζεται και για τις δύο ίνες χωρίς κάποια πρόσθετη κανονικοποίηση των τιμών. Ένα ακόμα σημείο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι κατά τη συγκεκριμένη ομάδα μετρήσεων δεν είχε εφαρμοστεί κάποια διαμόρφωση στο οπτικό σήμα.

NFPs of 50 m Toray POFs. (α) Reference POF, (β) thermally treated POF, 193 hours after switching off the oven. 640px × 480px images



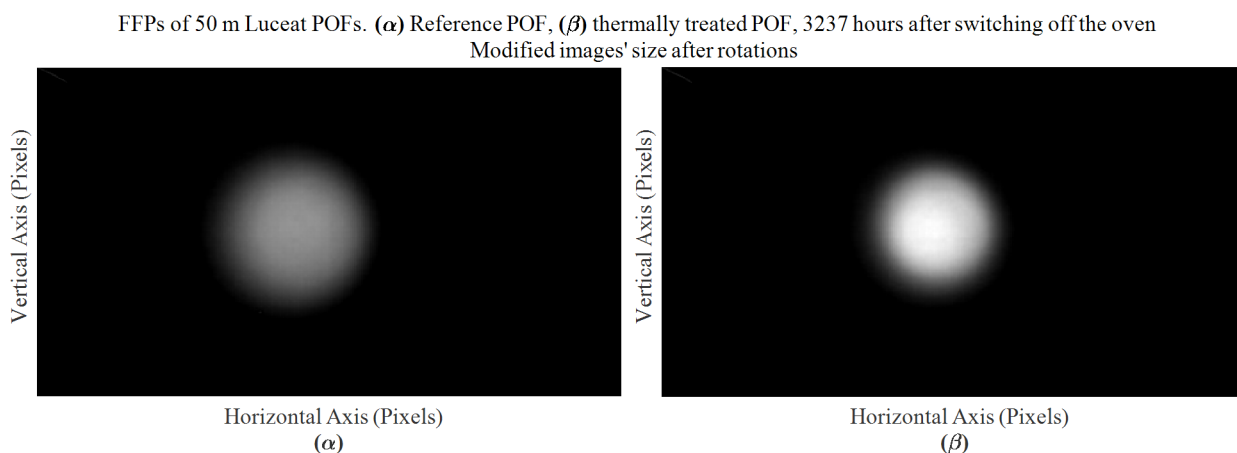
Σχήμα 2.28. Πρότυπα κοντινού πεδίου για τις SI-POFs της TORAY σε τρισδιάστατη απεικόνιση. (α) NFP για την ίνα αναφοράς από το Σχήμα 2.27(α), (β) NFP για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα Σχήμα 2.27(β). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 193 ώρες από τη στιγμή που τέθηκε εκτός λειτουργίας ο φούρνος.

Με πλήρη κάλυψη της διατομής εισόδου της ίνας, για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα, εκτός από τη διατήρηση του βηματικού προφίλ του δείκτη διάθλασης, στο Σχήμα 3.28(β) διακρίνεται με γυμνό μάτι και ένα μικρή αύξηση στην ένταση σε σχέση με την περίπτωση της ίνας αναφοράς στο Σχήμα 3.28(α). Αυτή είναι μία πρόσθετη επιβεβαίωση της εμφάνισης μικρής μείωσης των απωλειών που συνόδευσε την αύξηση του εύρους ζώνης λόγω της εφαρμογής της διαδικασίας θέρμανσης που περιγράφηκε.

Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να συνδυαστεί με τη θεωρητική ανάλυση όπου εκτιμήθηκε ότι αύξηση του παράγοντα ανακλάσεων R_{refl} για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα θα σημαίνει ότι οι δέν ακτινοβολούνται τρόποι τόσο έντονα όπως στην ίνα αναφοράς, κερδίζοντας ελαφρώς στη μείωση των απωλειών. Ωστόσο, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι αύξηση του παράγοντα ανακλάσεων οδήγησε θεωρητικά σε πτώση του εύρους ζώνης, αλλά αυτό που συνδυαστικά προέκυψε πειραματικά από τη θερμική διεργασία ήταν ένας ευνοϊκός συνδυασμός υπέρ του εύρους ζώνης λόγω της ταυτόχρονης μείωσης του συντελεστή σύζευξης. Κάτι που δεν αναφέρθηκε νωρίτερα κατά την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας για τη λήψη των NFPs για τις δύο ίνες, είναι ότι λόγω της χρήσης του laser θα αναμένονταν πολύ πιο ενθόρυβες μετρήσεις που θα οφείλονταν σε θόρυβο speckle. Η μείωση επήλθε με εφαρμογή μικρής δόνησης στο άκρο εισόδου της SI-POF που εξεταζόταν κάθε φορά [118]. Παρόμοια αποτελέσματα σχετικά με το NFP και το προφίλ του δείκτη διάθλασης της ίνας αναφοράς και αντίστοιχα της θερμικά κατεργασμένης ίνας προέκυψαν και για την περίπτωση του ζεύγους ινών 50 μέτρων της LUCEAT, όπου εκτός από τη διατήρηση της ομοιόμορφης κατανομής της έντασης στο φωτεινό δίσκο που αποτελεί το NFP παρά τη θερμική κατεργασία, επιβεβαιώθηκε και η πρόσθετη μικρή μείωση των απωλειών που ήταν το αποτέλεσμα της θερμικής κατεργασίας που ήταν δυνατό να παρατηρηθεί με αυτές τις μετρήσεις.

Αφού εξασφαλίστηκε η διατήρηση του προφίλ του δείκτη διάθλασης μέσω πειραματικής επιβεβαίωσης, ακολούθησε μία πρόσθετη επιβεβαίωση της μείωσης των διαταραχών μέσα στον πυρήνα της θερμικά κατεργασμένης ίνας σε σύγκριση με την ίνα αναφοράς. Η σύγκριση αυτή ήταν εύκολο να πραγματοποιηθεί για την περίπτωση των δειγμάτων 50 μέτρων. Αυτό που εξετάστηκε σε αυτό το σετ μετρήσεων ήταν το FFP, με είσοδο της στενής δέσμης της πηγής απευθείας στην ίνα όσο το δυνατό πιο κεντραρισμένα στον άξονά της. Επομένως, αυτό που εφαρμόστηκε ήταν η άμεση σύνδεση της εκάστοτε εξεταζόμενης ίνας με την FP-LD ([63]) που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις μετρήσεις των αποκρίσεων συχνότητας των ινών βάσει των πειραματικών διατάξεων στο Σχήμα 2.10, στο Σχήμα 2.17 και στο Σχήμα 2.22. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την ομάδα μετρήσεων ήταν παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στην [104]. Το ρεύμα πόλωσης της πηγής τέθηκε στα 32 mA. Η υπό εξέταση ίνα συνδεόταν άμεσα με την πηγή με όσο το δυνατό πιο κεντραρισμένη την οπτική δέσμη στο κέντρο της ίνας, όπως προαναφέρθηκε. Το άλλο άκρο της ίνας ήταν ελεύθερο και η εξερχόμενη δέσμη μετά τη διάδοση κατά μήκος της ίνας, διαδιδόταν κατά μία απόσταση 13 cm στον ελεύθερο χώρο προτού προσπέσει κάθετα σε ένα πέτασμα που δεν ήταν κάτι περισσότερο από ένα χοντρό λευκό χαρτόνι. Η ίδια κάμερα που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση μέτρησης των NFPs χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή τη σειρά πειραμάτων. Η κάμερα τέθηκε υπό γωνία 140° σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα στη βάση του χαρτονιού ή υπό γωνία 40° σε σχέση με τον ίδιο άξονα ξεκινώντας την αρίθμηση από την πλευρά που βρίσκεται η κάμερα ή υπό γωνία 50° σε σχέση με τον κάθετο άξονα στο χαρτόνι που ενώνει το κέντρο της ίνας με το κέντρο του χαρτονιού. Η ακτίνα που συνέδεε την κάμερα με το κέντρο του πετάματος είχε μήκος 44 cm. Η κάμερα ελάμβανε την ανακλώμενη «εικόνα» από το πέτασμα. Όπως και στην περίπτωση μέτρησης των NFPs, οι ρυθμίσεις στην κάμερα ήταν τέτοιες ώστε να είναι εξασφαλισμένη η λειτουργία της κάμερας εκτός κόρου για όλες τις μετρήσεις των προφίλ μακρινού πεδίου. Πρόσθετη προστασία εξασφαλίστηκε και πάλι με ένα φίλτρο απορρόφησης μπροστά από τον CCD αισθητήρα, όπως έγινε και στην περίπτωση μέτρησης των NFPs. Όσον αφορά την εμφάνιση θορύβου speckle λόγω χρήσης του laser, η επίδραση του θορύβου εξομαλύνθηκε εφαρμόζοντας μία μικρή δόνηση στην κοντά στο άκρο εισόδου της εκάστοτε SI-POF, όπως εκτελέστηκε και προηγουμένως. Από τους θεωρητικούς τύπους βάσει της ακτίνας του πυρήνα των POFs και του μήκους κύματος της πηγής, η απόσταση ίνας-πετάματος δεν ήταν αρκετή για να χαρακτηριστούν τα λαμβανόμενα προφίλ ως FFPs και ο όρος FFP σε αυτή τη σειρά των μετρήσεων χρησιμοποιείται

κάπως καταχρηστικά, αλλά η ίδια ορολογία χρησιμοποιήθηκε στην [104], ενώ η εικόνα από τα αποτελέσματα αρκεί για να βγουν ευδιάκριτα συμπεράσματα που αφορούν την επίδραση της διαδικασίας θέρμανσης στα χαρακτηριστικά της ίνας και στο προφίλ της δέσμης στην έξοδο [121].



Σχήμα 2.29. Πρότυπα μακρινού πεδίου για τις SI-POFs 50 μέτρων της LUCEAT σε απεικόνιση δύο διαστάσεων. (α) FFP για την ίνα αναφοράς, (β) FFP για τη θερμικά κατεργασμένη. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 3237 ώρες από τη στιγμή που τέθηκε εκτός λειτουργίας ο φούρνος.

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των προφίλ φαίνονται στο Σχήμα 2.29 για το ζεύγος ινών της LUCEAT με τις μετρήσεις να έχουν πραγματοποιηθεί 3237 ώρες από τη στιγμή που έσβησε ο φούρνος ολοκληρώνοντας με αυτό τον τρόπο τα βήματα θέρμανσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σαν εικόνες δύο διαστάσεων με οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα τα τροποποιημένα pixels και με τη φωτεινότητα να αποτελεί τη μέση ένταση από ένα πλήθος 10 συνεχόμενων στιγμιότυπων. Ο λόγος που οι εικόνες δεν αναφέρουν ως μέγεθος των εικόνων $640px \times 480px$ είναι επειδή οι εικόνες που ελάμβανε η κάμερα ήταν υπό γωνία. Αυτό σημαίνει ότι έπρεπε να εφαρμοστεί ένας μετασχηματισμός περιστροφής δύο φορές, μία ως προς τον άξονα x και μία ως προς τον άξονα y , που αφορούσαν τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα της επιφάνειας απεικόνισης, αντίστοιχα. Τη μεγαλύτερη επίδραση είχε η περιστροφή ως προς τον οριζόντιο άξονα της απεικόνισης λόγω της θέσης της κάμερας. Το αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και από τις απεικονίσεις στο Σχήμα 2.29, ήταν να αλλάξουν οι διαστάσεις των εικόνων για να προκύψει το κυκλικά συμμετρικό προφίλ των ινών. Η διάσταση των εικόνων τροποποιήθηκε σε περίπου 865×486 . Επιπρόσθετα, ακολούθησε η εξής κανονικοποίηση: τα προφίλ κανονικοποιήθηκαν ως προς τη μέγιστη τιμή και των δύο (μέσων) προφίλ. Επομένως, το προφίλ για το οποίο θα προέκυπτε μεγαλύτερη ένταση θα επέβαλε πιο σκούρο χρώμα στο άλλο προφίλ. Στο Σχήμα 2.29(α) και στο Σχήμα 2.29(β) απεικονίζονται τα μακρινά προφίλ για την περίπτωση της ίνας αναφοράς και της θερμικά κατεργασμένης ίνας 50 μέτρων της LUCEAT, αντίστοιχα. Αυτό που φαίνεται καθαρά είναι ότι το προφίλ της θερμικά κατεργασμένης ίνας είναι στενότερο αυτού της ίνας αναφοράς. Αυτό είναι σαφής ένδειξη ότι με τη θερμική κατεργασία που εφαρμόστηκε, με συγκεντρωμένη δέσμη στον άξονα της ίνας κατά την εκκίνηση της διάδοσης, μετά από 50 μέτρα έχουν διεγερθεί λιγότεροι τρόποι σε σχέση με την περίπτωση της ίνας αναφοράς, όπου οι διαταραχές στον πυρήνα της ίνας και οι ανωμαλίες στα όρια πυρήνα-μανδύα οδηγούν σε γρηγορότερη γέννηση τρόπων υψηλότερης τάξης και στη δημιουργία ενός προφίλ που είναι ευρύτερο του αντίστοιχου προφίλ της θερμικά κατεργασμένης ίνας. Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδοθεί άμεσα στον «πιο εκλεπτυσμένο» πυρήνα της θερμικά κατεργασμένης ίνας, δηλαδή στον μειωμένο συντελεστή σύζευξης D . Επιπλέον, το προφίλ της θερμικά κατεργασμένης

ίνας είναι πιο φωτεινό από το αντίστοιχο της ίνας αναφοράς. Αυτό είναι η ολοφάνερη απόδειξη ότι η θερμικά κατεργασμένη ίνα παρουσιάζει χαμηλότερες απώλειες καθώς η κανονικοποίηση έγινε εις βάρος της ίνας αναφοράς. Για το ζεύγος ινών της TORAY για την ίδια σειρά μετρήσεων του FFP, η συμπεριφορά ήταν παρόμοια, με το προφίλ για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα να βγαίνει φωτεινότερο και στενότερο σε σχέση με αυτό της ίνας αναφοράς. Άρα, με τη θερμική κατεργασία επιτυγχάνεται η μετατόπιση της κατάστασης EMD σε μεγαλύτερο μήκος.

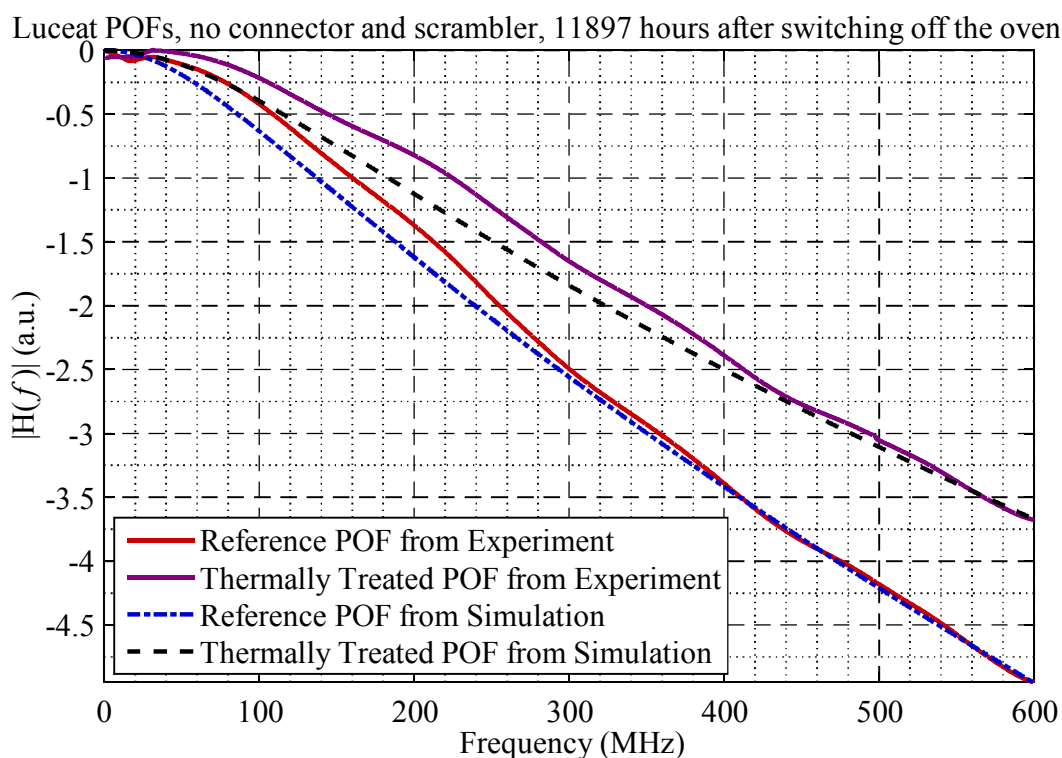
2.4.3 Θεωρητική επιβεβαίωση των πειραματικών μετρήσεων

Από τα συμπεράσματα της θεωρητικής μελέτης και από τις ενδείξεις των πειραματικών μετρήσεων, προέκυψε η ανάγκη επιβεβαίωσης της θεωρητικής προσέγγισης που αναπτύχθηκε μέσω πρόσθετων πειραματικών μετρήσεων αντίστοιχων αυτών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Σκοπός είναι η διερεύνηση της «συνεισφοράς» τόσο της μείωσης της διακύμανσης του δείκτη διάθλασης του πυρήνα όσο και της καλύτερης «ποιότητας» των ορίων μεταξύ πυρήνα και μανδύα που προκύπτουν από το μοτίβο θέρμανσης που περιγράφηκε στην επίδοση της θερμικά κατεργασμένης ίνας, συγκριτικά με την επίδοση της αντίστοιχης ίνας αναφοράς του ίδιου κατασκευαστή. Μεγαλύτερο βάρος θα δοθεί στις αποκρίσεις συχνότητας και στο εύρος ζώνης.

Ξεκινώντας από το ζεύγος των POFs 50 μέτρων της LUCEAT, επιβλήθηκε απευθείας σύνδεση μεταξύ πομπού και ίνας και χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.17. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία από την οποία προέκυψε το Σχήμα 2.18, απομονώθηκε ένα στιγμιότυπο του μέτρου της απόκρισης συχνότητας για καθεμία από τις δύο POFs. Αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 11897 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου. Οι δύο πειραματικές καμπύλες αντιπροσωπεύονται από τις συνεχείς γραμμές που φαίνονται στο Σχήμα 2.30 με κόκκινο και μαύρο χρώμα για την ίνα αναφοράς και για την ίνα που πέρασε από τη θερμική κατεργασία, αντίστοιχα. Το οπτικό εύρος ζώνης στα 3 dB για τη θερμικά κατεργασμένη POF ήταν περίπου 493.74 MHz. Το εύρος ζώνης που μετρήθηκε για την ίνα αναφοράς ήταν περίπου 358.06 MHz. Αυτές οι τιμές είναι ελαφρώς υψηλότερες από αυτές που προέκυψαν από τα στιγμιότυπα του ζεύγους ινών της LUCEAT στο Σχήμα 2.18. Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στην σύζευξη της πηγής με την εκάστοτε POF που δεν ήταν τέλεια και στη διαφορετική βαθμονόμηση που εκτελέστηκε σε διαφορετικές στιγμές για τα σετ μετρήσεων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη και σε αυτή την υποενότητα για το ζεύγος POFs της LUCEAT. Μερικές βασικές παρατηρήσεις είναι ότι το εύρος ζώνης της θερμικά κατεργασμένης POF παρέμεινε σταθερά υψηλότερο από το εύρος ζώνης της ίνας αναφοράς. Η διαφορά από τις συγκεκριμένες τιμές που δόθηκαν προέκυψε περίπου 37.89%. Από το Σχήμα 2.19, για την ομάδα μετρήσεων από την οποία προέκυψαν τα δύο στιγμιότυπα αυτής της υποενότητας, η ποσοστιαία βελτίωση του εύρους ζώνης από τις μέσες τιμές των μετρήσεων ήταν οριακά κάτω από 35.70%.

Περνώντας στις θεωρητικές προσεγγίσεις που αναπτύχθηκαν στην υποενότητα 2.4.1, και εστιάζοντας το ενδιαφέρον σε συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή σύζευξης D και του παράγοντα ανακλάσεων R_{ref} , γίνεται κρίσιμη η επιβεβαίωση της θεώρησης ότι με τη θερμική κατεργασία που περιγράφηκε μειώνεται ο συντελεστής σύζευξης, λόγω της βελτίωσης της ομοιογένειας του πυρήνα, και αυξάνεται ελαφρώς ο παράγοντας ανακλάσεων, λόγω της μεγαλύτερης ομαλότητας στα όρια του πυρήνα με το μανδύα. Επιπλέον, σημαντικός γίνεται και ο έλεγχος του κατά πόσο ταιριάζουν τα θεωρητικά αποτελέσματα με τα πειραματικά. Γι' αυτό το λόγο, η (2.11) λύθηκε για να προκύψει το μέτρο της απόκρισης συχνότητας ίνας που αντιπροσωπεύει την ίνα αναφοράς της LUCEAT, αλλά και ίνας που αντιπροσωπεύει την ίνα που θερμάνθηκε κατάλληλα από

τον ίδιο κατασκευαστή. Θεωρήθηκε ότι στην ίνα εισερχόταν κεντρικά στον πυρήνα μία οπτική δέσμη με Gaussian κατανομή ως προς τη γωνία που σχηματίζεται με τον άξονα διάδοσης. Η τυπική απόκλιση τέθηκε ίση με 3° μέσα στην ίνα στο σημείο $z = 0$. Αυτή η τιμή ήταν πολύ κοντά στην τιμή της τυπικής απόκλισης που μετρήθηκε για τη δέσμη (μέσα στην ίνα) της πηγής laser η οποία χρησιμοποιήθηκε για να προκύψουν οι μετρημένες αποκρίσεις συχνότητας στο Σχήμα 2.30, αλλά και όλες οι προηγούμενες μετρήσεις. Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της τυπικής απόκλισης της δέσμης της πηγής laser ήταν παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στην [104]. Όσον αφορά την πηγή, παρά το γεγονός ότι η τυπική απόκλιση που τέθηκε για τις θεωρητικές προσομοιώσεις ήταν πολύ κοντά σε αυτή που μετρήθηκε, η κατανομή της δέσμης δεν ήταν ακριβώς Gaussian. Οι συντελεστές εξασθένισης για την ίνα που αντιπροσωπεύει την ίνα αναφοράς τέθηκε σε τιμή 0.13 dB/m, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής για την ίνα που αντιπροσωπεύει την ίνα που πέρασε από τη θερμική κατεργασία τέθηκε ίσος με 0.12 dB/m. Αυτές οι τιμές επιλέχθηκαν ανάγοντας τις μετρήσεις απωλειών στα 50 μέτρα που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 2.4.2 σε τιμές απωλειών ανά μέτρο, όταν η σύνδεση μεταξύ πηγής και ίνας ήταν άμεση. Και για τις δύο θεωρούμενες ίνες που αντιπροσωπεύουν το ζεύγος ιών της LUCEAT, το αριθμητικό άνοιγμα τέθηκε $NA = 0.46$ και ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα $n_{co} = 1.492$, ενώ θεωρήθηκε μικρή η επίδραση του φαινομένου Goos-Haenchen και για τις δύο POFs. Το μήκος κύματος τέθηκε ίσο με 650 nm. Για την υποτιθέμενη ίνα αναφοράς, ο συντελεστής σύζευξης D θεωρήθηκε ίσος με $1.02 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$ και ο παράγοντας ανακλάσεων $R_{refl} = 0.9999$. Από την άλλη, για τη θεωρούμενη ως θερμικά κατεργασμένη ίνα τέθηκαν οι τιμές $D = 0.53 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$ και $R_{refl} = 0.99993$.



Σχήμα 2.30. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας καθεμίας από τις δύο ίνες 50 μέτρων της LUCEAT, 11897 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).

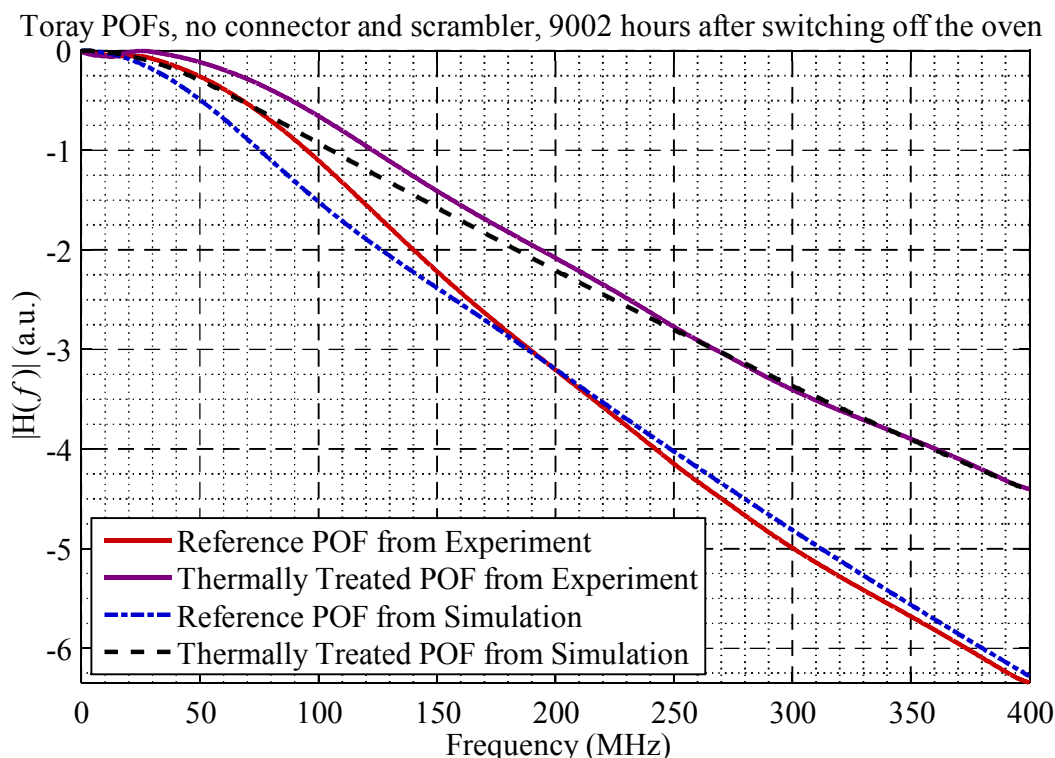
Στο Σχήμα 2.30, η θεωρητική διακεκομμένη-διάστικτη καμπύλη αναπαριστά το μέτρο της απόκρισης συχνότητας της POF αναφοράς όπως προέκυψε από την προσομοίωση. Γι' αυτή την καμπύλη, το εύρος ζώνης στα 3 dB εκτιμήθηκε περίπου ίσο με 350.46 MHz. Αυτή η τιμή είναι μικρότερη κατά λιγότερο από 8 MHz από την αντίστοιχη τιμή εύρους

ζώνης που προέκυψε από την πειραματική καμπύλη της ίνας αναφοράς, ενώ είναι έκδηλη η ομοιότητα των δύο καμπυλών στο σχήμα. Στο ίδιο σχήμα, η διακεκομμένη γραμμή που αντιπροσωπεύει το μέτρο της απόκρισης συχνότητας της θερμικά κατεργασμένης ίνας όπως προέκυψε από την λύση της εξίσωσης (2.11) φαίνεται ότι ακολουθεί την πειραματική καμπύλη. Πιο συγκεκριμένα, παρά το γεγονός ότι το εύρος ζώνης της προσομοιωμένης POF που εκτιμήθηκε περίπου 482.05 MHz είναι πάνω από 11 MHz μικρότερο από την εκτίμηση που προέκυψε από την απόκριση συχνότητας που μετρήθηκε πειραματικά, η θεωρητική καμπύλη ταιριάζει με την πειραματική καμπύλη καθώς η συχνότητα αυξάνεται.

Ο επόμενος βασικός στόχος ήταν η διερεύνηση της πιθανής συμφωνίας μεταξύ της πειραματικής καμπύλης του μέτρου της απόκρισης συχνότητας της ίνας αναφοράς από την TORAY και της καμπύλης που προέκυψε από την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11). Ο έλεγχος περιλάμβανε και την θερμικά κατεργασμένη ίνα της TORAY. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για το ζεύγος ινών της LUCEAT. Όπως και στο Σχήμα 2.30, έτσι και στο Σχήμα 2.31, απεικονίζονται δύο συνεχείς καμπύλες, οι οποίες αποτελούν από ένα στιγμιότυπο του μέτρου της απόκρισης των ινών 50 μέτρων του ζεύγους POFs της TORAY, όπως προέκυψαν 9002 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου κατά την ολοκλήρωση της θερμικής κατεργασίας. Για τη θερμικά κατεργασμένη POF, το εύρος ζώνης του στιγμιότυπου ήταν περίπου 267.47 MHz, ενώ το εύρος ζώνης της POF αναφοράς ήταν περίπου 189.03 MHz. Και οι δύο τιμές ήταν πολύ κοντά στις τιμές που προέκυψαν από τις καμπύλες στο Σχήμα 2.20, παρά το ότι οι τελευταίες καμπύλες εξάχθηκαν από διαφορετική βαθμονόμηση. Αυτό επιβεβαιώνει την ορθότητα της μεθόδου και επιπλέον, σε συνδυασμό με το Σχήμα 2.21 φαίνεται ότι 9002 ώρες από την ολοκλήρωση των βημάτων της διαδικασίας θέρμανσης, η κατεργασμένη ίνα εξακολουθεί να έχει καλύτερη επίδοση από την ίνα αναφοράς. Επιπλέον, η ποσοστιαία βελτίωση στο Σχήμα 2.21 στη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε 9002 από τον τερματισμό της θερμικής κατεργασίας και το σβήσιμο του φούρνου ήταν 38,40%, αλλά προέκυψε από μέσες τιμές εύρους ζώνης των δύο ινών του ζεύγους της TORAY, όπως ήδη εξηγήθηκε στην υποενότητα 2.4.2, γι' αυτό και η ποσοστιαία βελτίωση από τις τιμές εύρους ζώνης των δύο στιγμιότυπων είναι διαφορετική.

Για την αριθμητική επίλυση της (2.11), θεωρήθηκαν οι ίδιες συνθήκες εισόδου της δέσμης, ο ίδιος δείκτης διάθλασης του πυρήνα και το ίδιο μήκος κύματος με το ζεύγος ινών της TORAY. Ο συντελεστής εξασθένισης για την ίνα που αντιπροσωπεύει την ίνα αναφοράς τέθηκε ίσος με 0.144 dB/m, ενώ για την ίνα με χαρακτηριστικά όμοια με αυτά της κατεργασμένης POF στον συγκεκριμένο συντελεστή δόθηκε η τιμή 0.137 dB/m εφαρμόζοντας τις τιμές από τις μετρήσεις των απωλειών στην προηγούμενη υποενότητα, που ήταν 7.20 dB και 6.85 dB, για την ίνα αναφοράς και την ίνα που πέρασε από τη διαδικασία θέρμανσης, αντίστοιχα. Το φυλλάδιο των προδιαγραφών του κατασκευαστή δίνει $NA = 0.5$ και αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε και για τις δύο ίνες του ζεύγους της TORAY. Η επίδραση του φαινομένου Goos-Haenchen θεωρήθηκε πολύ μικρή όπως και πριν. Για την ίνα που αναπαριστά την ίνα αναφοράς, ο συντελεστής σύζευξης τέθηκε $D = 3.18 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$, ενώ για την περίπτωση ίνας που αντιστοιχεί στη θερμικά κατεργασμένη ίνα η τιμή του συντελεστή τέθηκε $D = 1.51 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$. Οι αντίστοιχοι παράγοντες ανακλάσεων ήταν 0.99982 και 0.99991 με τη μεγαλύτερη τιμή να αφορά την ίνα που υποτίθεται ότι πέρασε από την κατεργασία θέρμανσης. Στο Σχήμα 2.31, η διακεκομμένη-διάστικτη καμπύλη και η διακεκομμένη καμπύλη αναπαριστούν το μέτρο της θεωρητικής απόκρισης συχνότητας μίας ίνας με τα χαρακτηριστικά της ίνας αναφοράς και μίας ίνας με τα χαρακτηριστικά της δεύτερης ίνας του ζεύγους μετά τη θερμική εκλέπτυνσή της, αντίστοιχα. Οι θεωρητικές καμπύλες ακολουθούν αρκετά ικανοποιητικά τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες. Οι τιμές

εύρους ζώνης που εκτιμήθηκαν θεωρητικά ήταν 188.16 MHz και 267.52 MHz, για την ίνα που αναπαριστά την ίνα αναφοράς και για την ίνα που αναπαριστά την θερμικά κατεργασμένη POF, αντίστοιχα. Και οι δύο θεωρητικές τιμές είναι πολύ κοντά στις τιμές που εκτιμήθηκαν από τις αντίστοιχες πειραματικές αποκρίσεις συχνότητας και υπενθυμίζεται ότι οι πειραματικές τιμές ήταν 189.03 MHz και 267.47 MHz.

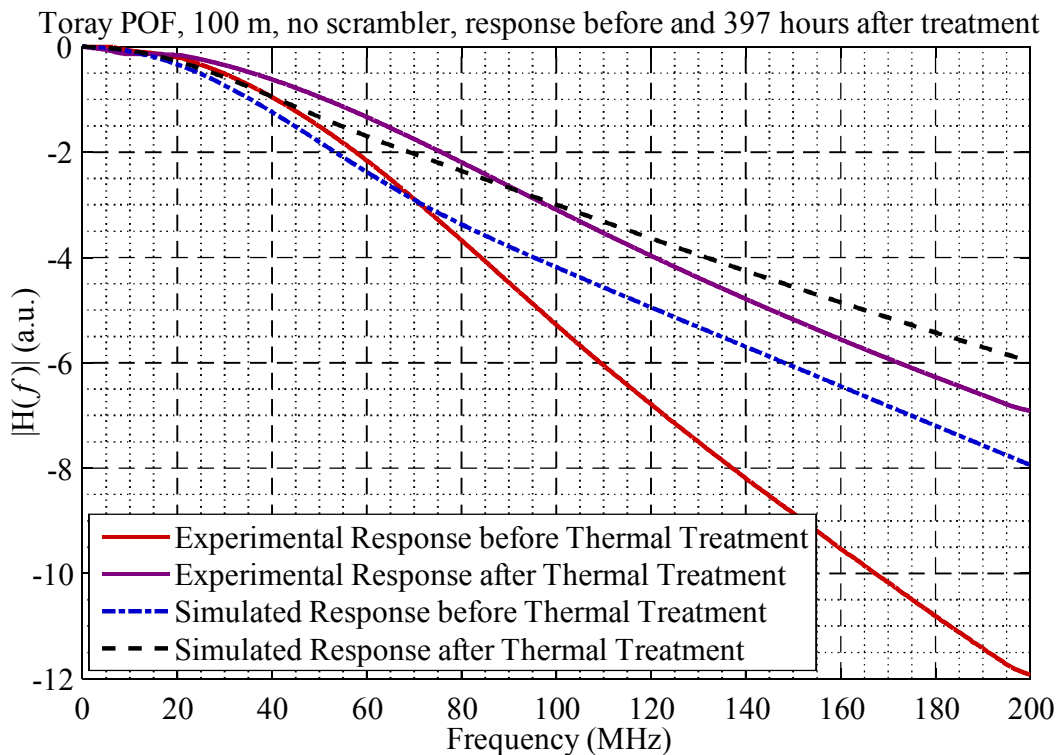


Σχήμα 2.31. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας καθεμίας από τις δύο ίνες 50 μέτρων της TORAY, 9002 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).

Συνεχίζοντας τον έλεγχο της βασιμότητας των θεωρήσεων, επιβλήθηκε η ανάγκη διερεύνησης της συμφωνίας μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποκρίσεων και σε μεγαλύτερα μήκη ινών. Με διαθέσιμο τμήμα 100 μέτρων από την καλούμπα της TORAY, έγιναν οι απεικονίσεις των πειραματικών αποκρίσεων συχνότητας που είχαν ληφθεί πριν την θερμική κατεργασία και 397 ώρες μετά την ολοκλήρωσή της και το σβήσιμο του φούρνου. Τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας φαίνονται στο Σχήμα 2.32. Ήδη από το Σχήμα 2.26, είχε φανεί η μέση ποσοστιαία αύξηση του εύρους ζώνης από όλες τις μετρήσεις που ανερχόταν σε μία τιμή λίγο πάνω από 37%. Το στιγμιότυπο του μέτρου της απόκρισης συχνότητας της ίνας προτού αυτή περάσει από τη διαδικασία θέρμανσης φαίνεται με συνεχή κόκκινη γραμμή και το εύρος ζώνης αυτής στα 3 dB είναι περίπου 71.38 MHz, μία τιμή πολύ κοντά στα 71.33 MHz που όπως έχει αναφερθεί ήταν η μέση τιμή από τις σχετικές μετρήσεις πριν την έναρξη της διαδικασίας. Το στιγμιότυπο που προέκυψε από το σετ μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν 397 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου φαίνεται στο ίδιο σχήμα ως η συνεχής καμπύλη με σκούρο μωβ χρώμα. Το εύρος ζώνης στα 3 dB ήταν περίπου 97.97 MHz. Αυτή η τιμή ήταν πολύ κοντά στη μέση τιμή από τις μετρήσεις που έγιναν στη συγκεκριμένη χρονική θυρίδα μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας θέρμανσης (97.87 MHz) και επίσης κοντά στη μέση τιμή από όλες τις μετρήσεις για τη συγκεκριμένη ίνα των 100 μέτρων μετά την ολοκλήρωση της θέρμανσης και το σβήσιμο του φούρνου (97.76 MHz).

Σχετικά με τις θεωρητικές αποκρίσεις που απεικονίζονται, όλες οι τιμές των παραμέτρων που αφορούν την ίνα προτού θερμανθεί, μεταξύ αυτών οι τιμές των παραμέτρων D και R_{ref} , ήταν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και για το αντίστοιχο τμήμα

αναφοράς 50 μέτρων από την TORAY. Η θεωρητική εκτίμηση του εύρους ζώνης όπως προέκυψε από την απόκριση συχνότητας που ήταν λύση της (2.11) και αφορούσε τα χαρακτηριστικά της ίνας προτού θερμανθεί ήταν περίπου 71.94 MHz. Αυτή η τιμή είναι αρκετά κοντά στην τιμή εύρους ζώνης της πειραματικής καμπύλης. Η σχετική θεωρητική καμπύλη φαίνεται με μπλε χρώμα στο Σχήμα 2.32. Το αντίστοιχο εύρος ζώνης από την προσομοίωση για την ίδια POF 397 ώρες μετά τη θερμική κατεργασία της ήταν ελάχιστα λίγο κάτω από 100.10 MHz. Γι' αυτό το τμήμα 100 μέτρων οι τιμές των παραμέτρων ήταν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την ίνα TORAY 50 μέτρων που πέρασε από τη διαδικασία θέρμανσης. Η σχετική καμπύλη είναι η διακεκομμένη μαύρη στο Σχήμα 2.32. Οι πειραματικές καμπύλες των αποκρίσεων συχνότητας πριν και μετά τη θερμική κατεργασία της ίνας των 100 μέτρων της TORAY έχουν πιο απότομες κλίσεις από τις αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές σύζευξης εξαρτώμενοι από τη γωνία (ή την ομάδα τρόπων). Επιπλέον, αναφέρθηκε και νωρίτερα ότι αυτό το τμήμα ίνας προήλθε από εσωτερικό κομμάτι της καλούμπας και ενδεχομένως να αντιστοιχούν ελαφρώς διαφορετικές τιμές που αφορούσαν το συντελεστή σύζευξης (D) και τον παράγοντα ανακλάσεων (R_{refl}). Ωστόσο, για να προκύψει σημαντική αλλαγή της κλίσης της καμπύλης τη απόκρισης συχνότητας πρέπει να αλλάξουν σημαντικά αυτές οι τιμές των παραμέτρων. Επομένως, πιθανότερη αιτία είναι η χρήση σταθερής τιμής D και όχι κάποιας συνάρτησης της γωνίας που σχηματίζεται ως προς τον άξονα διάδοσης [104].



Σχήμα 2.32. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας της POF 100 μέτρων της TORAY, πριν τη θερμική κατεργασία και 397 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).

Η επιβεβαίωση της υπόθεσης για τον τρόπο επίδρασης της θερμικής κατεργασίας στα χαρακτηριστικά των POF και πιο συγκεκριμένα, στο συντελεστή σύζευξης (D) και στον παράγοντα ανακλάσεων (R_{refl}), έγινε συγκρίνοντας θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα υπό το καθεστώς άμεσης σύνδεσης πηγής και ίνας και με είσοδο μία εστιασμένη οπτική δέσμη στο κέντρο της ίνας. Ανέκυψε, λοιπόν, το ζήτημα της επιβεβαίωσης των θεωρήσεων για τον τρόπο λειτουργίας του μηχανισμού που έδρασε κατά τη θέρμανση των ινών και υπό καθεστώς πλήρους κάλυψης της έδρας εισόδου της

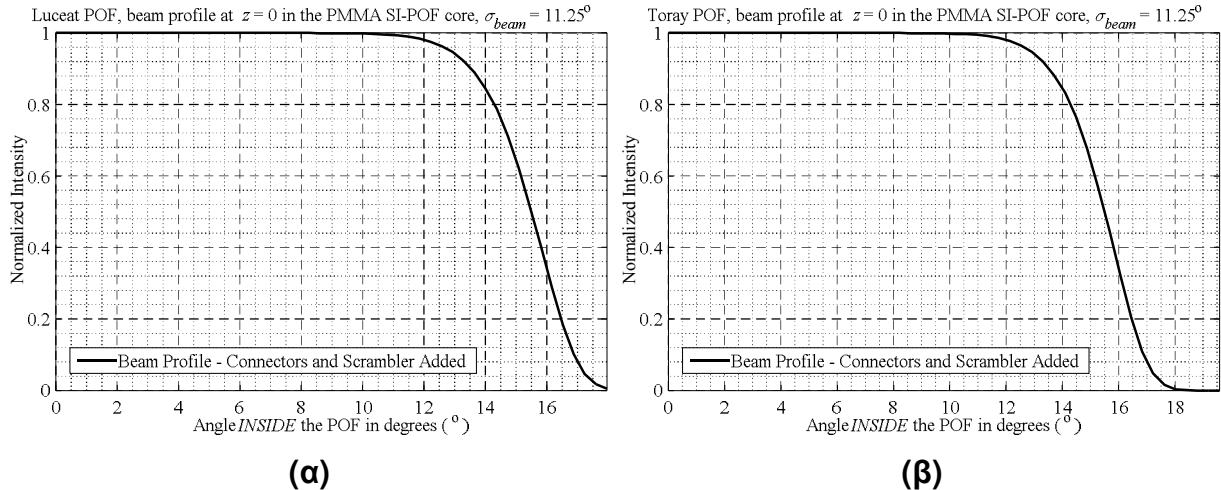
ίνας από την οπτική δέσμη (overfilled launching). Υπό ένα τέτοιο καθεστώς εισόδου του φωτός στην ίνα, οι ανωμαλίες στα όρια μεταξύ πυρήνα και μανδύα της ίνας αναφοράς «εξαναγκάζουν» τους τρόπους υψηλότερης τάξης να εμφανιστούν εξασθενημένοι στο τέλος της ίνας, λόγω ακτινοβόλησης στα όρια πυρήνα με μανδύα κατά μήκος της διάδοσης. Ταυτόχρονα, ομάδες τρόπων υψηλότερης τάξης θα «ενεργοποιηθούν» ξανά εξαιτίας των κέντρων σκέδασης που υπάρχουν στον πυρήνα. Για τις θερμικά κατεργασμένες ίνες, η βελτιωμένη επιφάνεια μεταξύ πυρήνα και μανδύα που μπορεί να επιτευχθεί θα έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο εξασθενημένους τρόπους υψηλότερης τάξης που έχουν ήδη διεγερθεί κατά την πλήρη κάλυψη της έδρας εισόδου με τη δέσμη. Η αυξημένη ομοιογένεια θα οδηγήσει σε λιγότερες διεγέρσεις και αναδιεγέρσεις ομάδων τρόπων υψηλότερης τάξης και έτσι, οι τρόποι δε θα εξασθενούν το ίδιο έντονα όπως συμβαίνει με την ίνα αναφοράς κατά τις ανακλάσεις στα όρια του πυρήνα με το μανδύα. Επομένως, υπάρχει ένας συμβιβασμός μεταξύ της μείωσης των κέντρων σκέδασης και της βελτίωσης των ορίων πυρήνα-μανδύα που μπορεί να περιορίσει το εύρος ζώνης των θερμικά κατεργασμένων ινών, όταν η εισερχόμενη δέσμη στην ίνα καλύψει πλήρως την επιφάνεια του πυρήνα της ίνας. Από την άλλη πλευρά, για το ίδιο καθεστώς εισόδου της οπτικής δέσμης σε μία ίνα που δεν έχει υποστεί κάποια θέρμανση, υπάρχει ένας συμβιβασμός μεταξύ των πολλών κέντρων σκέδασης που προκαλούν γεννήσεις τρόπων, και μπορούν να επιδράσουν περιοριστικά στο εύρος ζώνης, και των ακανόνιστων ορίων πυρήνα-μανδύα (Σχήμα 2.6) που εξασθενούν ομάδες τρόπων και μπορούν να δράσουν ευνοϊκά στο εύρος ζώνης. Μένει να φανεί αν οι συμβιβασμοί που περιγράφηκαν και για τα δύο τμήματα ίνας οδηγούν σε παρόμοιο εύρος ζώνης για το ζεύγος ινών του ίδιου κατασκευαστή υπό καθεστώς πλήρους κάλυψης της διατομής εισόδου της ίνας από την οπτική δέσμη και θεωρητικά, καθώς πειραματικά στο Σχήμα 2.23 και στο Σχήμα 2.24, έχει ήδη φανεί ότι η απόκριση συχνότητας ανά ζεύγος ινών είναι παρόμοια στη μορφή και ταυτόχρονα το εύρος ζώνης που επιτυγχάνεται είναι παρόμοιο όταν ο scrambler ενσωματωθεί στην πειραματική διάταξη σύμφωνα με το Σχήμα 2.22. Γι' αυτό το καθεστώς σύνδεσης της πηγής και της ίνας, ακολουθήθηκε η πειραματική διάταξη στο Σχήμα 2.22, όπου προστέθηκε ο scrambler με τους κατάλληλους συνδετήρες.

Παρά την ευστάθεια της μεθόδου Crank-Nicolson για την αριθμητική επίλυση διαφορικών εξισώσεων όπως αυτή στην (2.11), ήταν αναπόφευκτο ότι θα εμφανίζονταν κάποιες κυματώσεις στις θεωρητικές αποκρίσεις συχνότητας, που είναι και το βασικό μειονέκτημα του μεθόδου. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο όταν οι αρχικές συνθήκες αφορούν την πλήρη κάλυψη της διατομής του πυρήνα κατά την είσοδο της δέσμης παρά το γεγονός ότι τα μεγέθη των βημάτων για το μήκος (Δz) και για τη γωνία διάδοσης μέσα στην ίνα ($\Delta\theta$) ήταν τέτοια ώστε σε συνδυασμό με την τιμή του συντελεστή σύζευξης D καλύπτεται η ανισότητα $D \times \Delta z / (\Delta\theta^2) < 1/2$, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Παρά το γεγονός ότι έχουν προταθεί κάποιες μέθοδοι για τη μείωση των κυματώσεων [113], υιοθετήθηκε μία λίγο διαφορετική προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, για την προσομοίωση πλήρους κάλυψης της διατομής εισόδου της ίνας από τη δέσμη, χρησιμοποιήθηκε μία συνάρτηση Super-Gaussian για να περιγράψει το γωνιακό προφίλ της δέσμης μέσα στην ίνα με την ακόλουθη μορφή:

$$p(\theta, z = 0, \omega) = \exp\left(-\left[\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2 \times \sigma_{beam}^2}\right]^k\right), \quad 0 \leq \theta \leq \theta_c \quad (2.12)$$

όπου θ_0 είναι η μέση τιμή της προσπίπτουσας γωνιακής κατανομής, σ_{beam} είναι η τυπική απόκλιση της γωνιακής δέσμης και θ_c η κρίσιμη γωνία μέσα στην POF. Οι γωνίες πρέπει να είναι εκφρασμένες σε ακτίνια. Εδώ, η τιμή του k τέθηκε ίση με 7. Αυτό το καθεστώς δεν αναπαριστά ακριβώς την περίπτωση πλήρους κάλυψης της διατομής του

πυρήνα της ίνας, αλλά χρησιμοποιώντας αυτή την τιμή του k , ένα σημαντικό τμήμα του προφίλ της δέσμης σε συνάρτηση της γωνίας είναι επίπεδο. Με δέσμες αυτής της μορφής, εμφανίστηκαν μειωμένες ταλαντώσεις στις αποκρίσεις συχνότητας που εκτιμήθηκαν αριθμητικά. Η τιμή της τυπικής απόκλισης σε μοίρες που εφαρμόστηκε ήταν $\sigma_{beam} = 11.25^\circ$, σε όλες τις περιπτώσεις. Το προφίλ της δέσμης εντός της ίνας με αριθμητικό άνοιγμα $NA = 0.46$, ίδιο με αυτό της LUCEAT, πριν την εκκίνηση της διάδοσης έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.33(α). Για ίνα με αριθμητικό άνοιγμα $NA = 0.50$, ίδιο με αυτό των ινών της TORAY, το προφίλ της δέσμης για $z = 0$ έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.33(β).

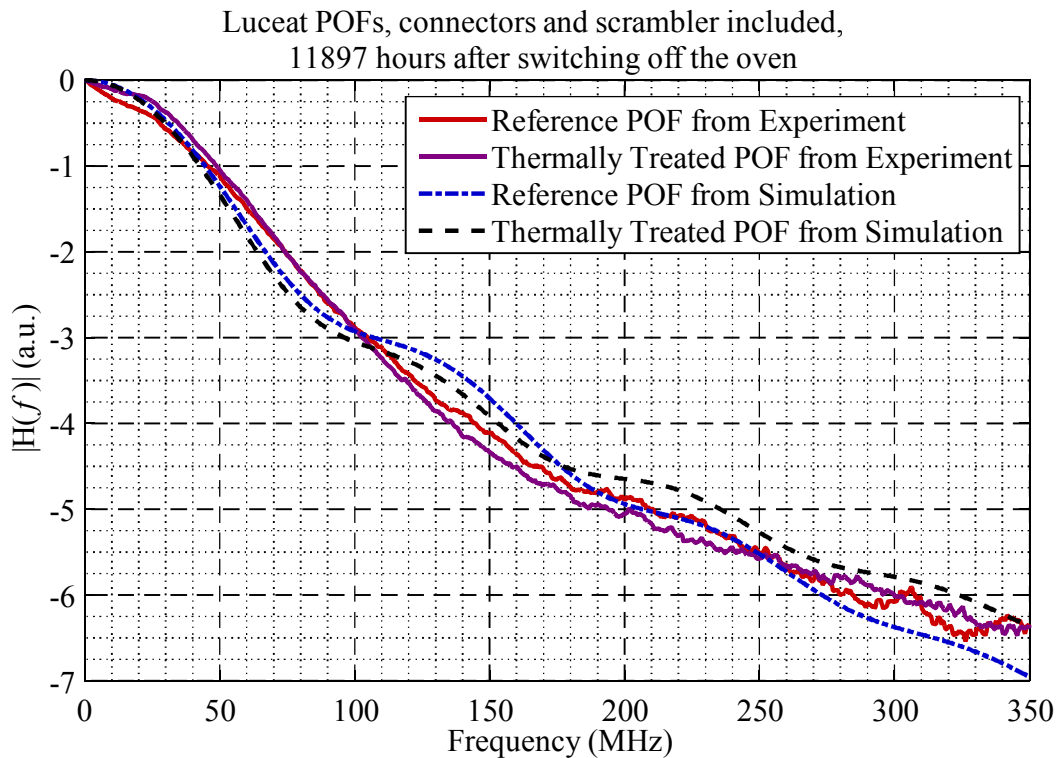


Σχήμα 2.33. Κανονικοποιημένη γωνιακή κατανομή της στενής δέσμης μέσα στην ίνα προτού ξεκινήσει η διάδοση με ενσωματωμένο το scrambler για (α) ίνα με $NA = 0.46$ όπως οι ίνες της LUCEAT και (β) ίνα με $NA = 0.50$ όπως οι ίνες της TORAY.

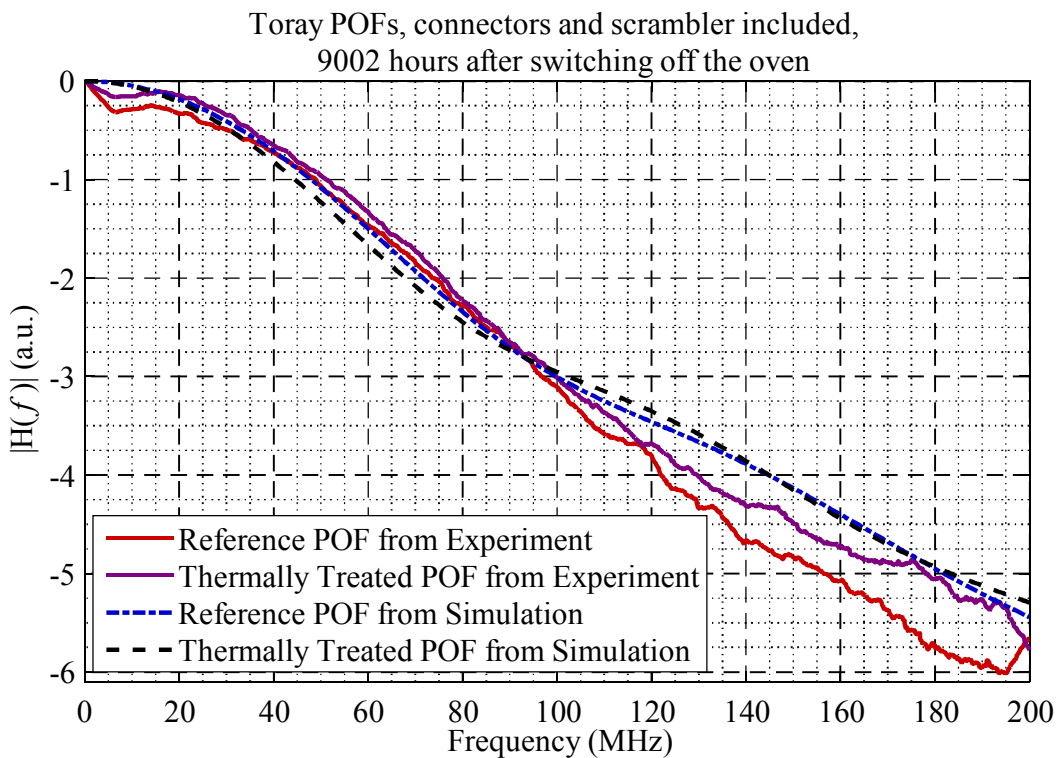
Οι συνεχείς καμπύλες που αφορούν τα μέτρα των πειραματικών αποκρίσεων συχνότητας για τις δύο πλαστικές ίνες του ζεύγους 50 μέτρων της LUCEAT φαίνονται στο Σχήμα 2.34, επιβεβαιώνουν αρχικά ότι δεν υπάρχει κέρδος στο εύρος ζώνης για την θερμικά κατεργασμένη ίνα όταν μεταξύ της πηγής και της ίνας ενσωματωθεί ο scrambler. Οι μετρήσεις των αποκρίσεων συχνότητας πραγματοποιήθηκαν 11897 ώρες από το τέλος της θερμικής κατεργασίας και το σβήσιμο του φούρνου. Για την ίνα αναφοράς, το εύρος ζώνης που μετρήθηκε ήταν περίπου 104.60 MHz. Αντίστοιχα, το εύρος ζώνης της θερμικά κατεργασμένης ίνας της LUCEAT εκτιμήθηκε λίγο πάνω από 102.85 MHz. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορετική βαθμονόμηση γι' αυτό το σετ μετρήσεων και τον αυξημένο θόρυβο λόγω των πρόσθετων απωλειών από το scrambler, αυτές οι τιμές βρίσκονται σε συνέπεια με τις αντίστοιχες τιμές εύρους ζώνης που προέκυψαν από τις αποκρίσεις συχνότητας 7460 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου και δόθηκαν στο Σχήμα 2.23. Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές εύρους ζώνης στα 3 dB για εκείνα τα στιγμιότυπα των αποκρίσεων συχνότητας ήταν 105.97 MHz για την ίνα αναφοράς και 106.47 MHz για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα.

Διατηρώντας τις ίδιες τιμές για τα θεωρητικά μοντέλα των ινών που αντιπροσωπεύουν την ίνα αναφοράς και την ίνα που θερμάνθηκε κατάλληλα και παρουσιάστηκαν νωρίτερα, μεταβάλλοντας μόνο τις αρχικές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν το νέο καθεστώς εισόδου του φωτός για την επίλυση της (2.11), θεωρώντας δηλαδή κάλυψη της διατομής εισόδου της ίνας με δέσμη με Super-Gaussian γωνιακό προφίλ, προέκυψαν η διακεκομμένη-διάστικτη καμπύλη και η διακεκομμένη καμπύλη στο Σχήμα 2.34 που αντιπροσωπεύουν τα θεωρητικά μοντέλα της ίνας αναφοράς και της θερμικά κατεργασμένης ίνας 50 μέτρων της LUCEAT. Οι θεωρητικές εκτιμήσεις του εύρους ζώνης για τις δύο ίνες ήταν 107.78 MHz και 96.51 MHz για την ίνα αναφοράς και για την θερμικά κατεργασμένη ίνα, αντίστοιχα. Και αυτές οι τιμές είναι σε συμφωνία με τις

αντίστοιχες πειραματικές τιμές, παρά το γεγονός ότι οι θεωρητικές αποκρίσεις είχαν μεγαλύτερες ταλαντώσεις.



Σχήμα 2.34. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας καθεμίας από τις δύο ίνες 50 μέτρων της LUCEAT υπό την παρουσία του scrambler, 11897 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).



Σχήμα 2.35. Πειραματικά στιγμιότυπα του μέτρου της απόκρισης συχνότητας καθεμίας από τις δύο ίνες 50 μέτρων της TORAY υπό την παρουσία του scrambler, 9002 ώρες μετά το σβήσιμο του φούρνου, και οι αντίστοιχες καμπύλες του μέτρου των αποκρίσεων συχνότητας μετά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11).

Παρόμοια συμπεράσματα αντλήθηκαν και για την περίπτωση του ζεύγους ινών 50 μέτρων της TORAY. Από το Σχήμα 2.35, το εύρος ζώνης για την ίνα αναφοράς εκτιμήθηκε κοντά στα 96.72 MHz από το στιγμιότυπο της απόκρισης συχνότητας, ενώ το αντίστοιχο εύρος ζώνης για την θερμικά κατεργασμένη ίνα ήταν περίπου 99.71 MHz. Αυτό το σετ μετρήσεων προέκυψαν 9002 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου και με τον scrambler ενσωματωμένο στην πειραματική διάταξη. Και αυτές οι τιμές συμφωνούν με τις αντίστοιχες τιμές που εκτιμήθηκαν από στιγμιότυπα των αποκρίσεων συχνότητας που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.24 και μετρήθηκαν 4633 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου. Είχε αναφερθεί και προηγουμένως ότι για το συγκεκριμένο ζεύγος ινών υπό την παρουσία του scrambler, προέκυψε ότι το εύρος ζώνης για την ίνα αναφοράς ήταν περίπου 96.65 MHz και η αντίστοιχη τιμή για την θερμικά κατεργασμένη ίνα ήταν 101.89 MHz. Στη ίδια λογική με πριν, οι θεωρητικές τιμές του εύρους ζώνης εκτιμήθηκαν περίπου 99.58 MHz και 102.14 MHz, για την ίνα που αντιπροσωπεύει θεωρητικά την ίνα αναφοράς και την ίνα που αντιστοιχεί στην θερμικά κατεργασμένη ίνα, αντίστοιχα. Οι ελαφρώς υψηλότερες τιμές του εύρους ζώνης, αλλά και η μορφή των θεωρητικών αποκρίσεων οφείλεται στη μορφή της Super-Gaussian δέσμης. Η μικρότερη κυμάτωση γι' αυτό το ζεύγος ινών, σε σχέση με αυτό των ινών της LUCEAT, σχετίζεται με τις ομαλότερες οριακές συνθήκες που επιβάλλονται από τη μορφή της Super-Gaussian δέσμης με $\sigma_{beam} = 11.25^\circ$ και από τη μεγαλύτερη κρίσιμη γωνία για την περίπτωση των ινών της TORAY με αριθμητικό άνοιγμα 0.5, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.33(β). Ωστόσο, η απόκλιση από τις πειραματικές καμπύλες δεν είναι σημαντική.

Συγκεντρωτικά, ο Πίνακας 2.4 περιλαμβάνει τις τιμές εύρους ζώνης που εκτιμήθηκαν μέσω των αποκρίσεων συχνότητας από την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (2.11) και από τις εκτιμήσεις που προέκυψαν από τις πειραματικές αποκρίσεις συχνότητας για τα ζεύγη των ινών τόσο της TORAY όσο και της LUCEAT από το Σχήμα 2.30, Σχήμα 2.31, Σχήμα 2.32, Σχήμα 2.34, Σχήμα 2.35.

Πίνακας 2.4. Συγκεντρωτικός πίνακας θεωρητικών και αντίστοιχων πειραματικών τιμών εύρους ζώνης όπως προέκυψαν για τις ίνες της LUCEAT και της TORAY για μήκη 50 και 100 μέτρα (αν υπήρχε διαθεσιμότητα).

Περίπτωση SI-POF	Εύρος ζώνης από πειραματικό στιγμιότυπο απόκρισης συχνότητας με άμεση σύνδεση πηγής-ίνας	Θεωρητικό εύρος ζώνης από απόκριση συχνότητας που προέκυψε από αριθμητική επίλυση της (2.11) θεωρώντας άμεση σύνδεση πηγής-ίνας	Εύρος ζώνης από πειραματικό στιγμιότυπο απόκρισης συχνότητας με ενσωμάτωση του scrambler	Θεωρητικό εύρος ζώνης από απόκριση συχνότητας που προέκυψε από αριθμητική επίλυση της (2.11) θεωρώντας συνθήκες overfilled launching
SI-POF αναφοράς 50 μέτρων της LUCEAT	358.06 MHz	350.46 MHz	104.60 MHz	107.78 MHz
Θερμικά κατεργασμένη SI-POF 50 μέτρων της LUCEAT	493.74 MHz	482.05 MHz	102.85 MHz	96.51 MHz
SI-POF αναφοράς 50 μέτρων της TORAY	189.03 MHz	188.16 MHz	96.72 MHz	99.58 MHz
Θερμικά κατεργασμένη SI-POF 50 μέτρων της TORAY	267.47 MHz	267.52 MHz	99.71 MHz	102.14 MHz
SI-POF 100 μέτρων της TORAY πριν τη θερμική κατεργασία	71.38 MHz	71.94 MHz	X	X
Θερμικά κατεργασμένη SI-POF 100 μέτρων της TORAY	97.97 MHz	100.10 MHz	X	X

Ένα βήμα ακόμα είναι η θεωρητική εξέταση της εξέλιξης του εύρους ζώνης και των δύο POFs κάθε ζεύγους με την αλλαγή του μήκους. Διατηρώντας τις τιμές όλων των παραμέτρων για τις υποτιθέμενες ίνες που αντιπροσωπεύουν τις ίνες αναφοράς και τις

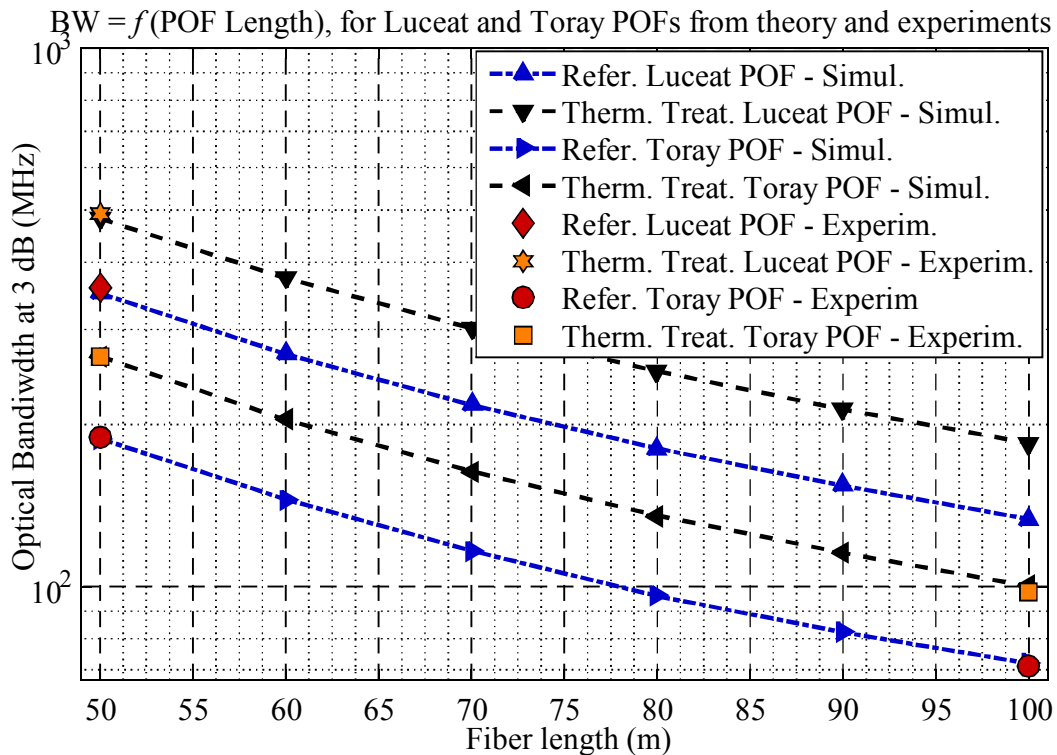
Θερμικά κατεργασμένες ίνες των 50 μέτρων, η (2.11) λύθηκε για διάφορα μήκη καλύπτοντας ένα εύρος μηκών από 50 ως 100 μέτρα και για τους δύο κατασκευαστές ινών που θεωρήθηκαν υποθέτοντας άμεση σύνδεση μεταξύ πηγής και ίνας. Εστιάζοντας στο ζεύγος των ινών της TORAY. Από την αριθμητική λύση της εξίσωσης για τις θεωρούμενες ίνες προέκυψε το Σχήμα 2.36. Τα σημεία των καμπυλών για τις θεωρούμενες ίνες και των δύο ζευγών στα 50 και στα 100 μέτρα είναι αυτά που εκτιμήθηκαν νωρίτερα και περιέχει ο Πίνακας 2.4. Βοηθητικά, στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι τιμές εύρους ζώνης που εκτιμήθηκαν από τις πειραματικές αποκρίσεις συχνότητας που αναφέρθηκαν σχολιάζοντας προηγούμενα σχήματα και τις οποίες επίσης περιέχει ο Πίνακας 2.4 και είναι τα διακριτά σημεία κόκκινου χρώματος που αφορούν τις ίνες της LUCEAT και της TORAY που δεν πέρασαν από τη θερμική κατεργασία. Τα πειραματικά διακριτά σημεία πορτοκαλί χρώματος αφορούν τις τιμές εύρους ζώνης των θερμικά κατεργασμένων ινών των δύο κατασκευαστών.

Για τις τιμές που τέθηκαν στις κρίσιμες παραμέτρους που εξετάστηκαν φαίνεται η αναμενόμενη πτώση του εύρους ζώνης με την αύξηση της απόστασης. Με τη λογαριθμική απεικόνιση στον κατακόρυφο άξονα, φαίνεται ότι για τις συγκεκριμένες θεωρούμενες ίνες της TORAY ότι η διαφορά υπέρ των θερμικά κατεργασμένων ινών διατηρείται μέχρι και τα 100 μέτρα, με τις πειραματικές τιμές από το ζεύγος ινών της TORAY των 50 μέτρων και από την ίνα των 100 μέτρων να επιβεβαιώνουν αυτή τη συμπεριφορά. Όπως είναι επίσης αναμενόμενο, η διαφορά μεταξύ των τιμών εύρους ζώνης της ίνας που αντιπροσωπεύει την ίνα αναφοράς και της ίνας που αντιπροσωπεύει την θερμικά κατεργασμένη ίνα του ίδιου κατασκευαστή θα μειώνεται με την αύξηση του μήκους. Ενδεικτικά, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν, στα 60 μέτρα για το ζεύγος ινών που προσομοιώνουν τις ίνες της TORAY, οι τιμές εύρους ζώνης που προέκυψαν ήταν περίπου 145.15 MHz και 204.03 MHz και το κέρδος ήταν 58.88 MHz. Για το ίδιο ζεύγος θεωρούμενων ινών, στα 80 μέτρα η διαφορά ήταν 39.42 MHz, καθώς στο συγκεκριμένο μήκος το εύρος ζώνης για την περίπτωση της ίνας που προσομοιώνει μία μη κατεργασμένη ίνα της TORAY ήταν 96.00 MHz, ενώ για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα ήταν περίπου 135.42 MHz. Η κατάληξη είναι στα 100 μέτρα η διαφορά σε εύρος ζώνης να είναι 28.16 MHz, όταν η διαφορά εύρους ζώνης στα 50 μέτρα ήταν περίπου 79.36 MHz. Ωστόσο, η ποσοστιαία αλλαγή είναι λίγο πάνω από 42% στα 50 μέτρα, περίπου 40.56% στα 60 μέτρα, λίγο πάνω από 41% στα 80 μέτρα και πάνω από 39% στα 100 μέτρα.

Αντίστοιχα, από τις εκτιμήσεις του εύρους ζώνης ινών που αντιπροσωπεύουν το ζεύγος της LUCEAT, αρχικά στα 50 μέτρα οι προσομοιώσεις έδωσαν διαφορά εύρους ζώνης 131.59 MHz υπέρ της θερμικά κατεργασμένης ίνας ή όμοια κέρδος πάνω από 37.55% (Πίνακας 2.4). Στα 60 μέτρα, το εύρος ζώνης της ίνας που αναπαριστά την ίνα αναφοράς έπεσε στα 270.08 MHz, ενώ το αντίστοιχο εύρος ζώνης της ίνας με χαρακτηριστικά που αντιστοιχήθηκαν σε αυτά της θερμικά κατεργασμένης εκτιμήθηκε περίπου 374.02 MHz, ρίχνοντας τη διαφορά σε περίπου 104 MHz, αλλά η ποσοστιαία αλλαγή ήταν λίγο κάτω από 38.50%. Στα 80 μέτρα, η ίνα με τα χαρακτηριστικά της ίνας αναφοράς παρουσίασε θεωρητικά εύρος ζώνης περίπου 180.48 MHz, ενώ το αποτέλεσμα της αριθμητικής επίλυσης της (2.11) για τη θεωρούμενη θερμικά κατεργασμένη ίνα ήταν περίπου 251.14 MHz, δηλαδή η διαφορά ήταν λίγο πάνω από 70 MHz και η ποσοστιαία μεταβολή υπέρ της θεωρούμενης κατεργασμένης ίνας ήταν 39.15%.

Η πιο γρήγορη πτώση του εύρους ζώνης για τις θεωρούμενες θερμικά κατεργασμένες ίνες είναι η έμμεση απόδειξη μετατόπισης του μήκους σύζευξης σε μεγαλύτερες τιμές. Η μεγαλύτερη ομοιομορφία του πυρήνα και οι μειωμένες απώλειες από την τραχύτητα των ορίων μεταξύ πυρήνα-μανδύα μετά τη θέρμανση δημιουργεί ένα καθεστώς όπου οι τρόποι ανώτεροι τάξης όταν διεγερθούν δε θα εξασθενήσουν κατά τη διάδοση

οδηγώντας σε γρήγορη μείωση του εύρους ζώνης με την απόσταση, αλλά η βελτίωση των ιδιοτήτων της ίνας είναι τέτοια ώστε να διατηρείται το μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με την ίνα αναφοράς.



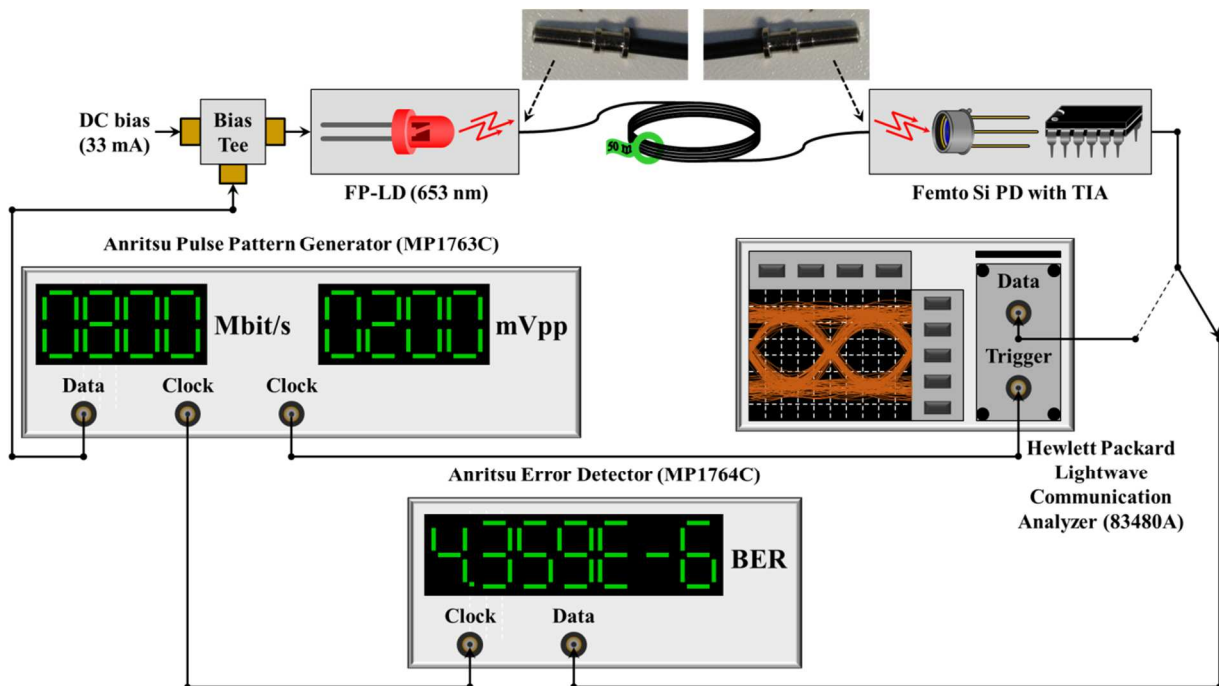
Σχήμα 2.36. Εκτίμηση του εύρους ζώνης από 50 ως 100 μέτρα για μία συμβατική και μία θερμικά κατεργασμένη POF τόσο της TORAY όσο και της LUCEAT. Τα διακριτά σημεία αφορούν τις πειραματικές τιμές εύρους ζώνης που προέκυψαν από τις σχετικές μετρήσεις των μέτρων των αποκρίσεων συχνότητας.

Προτού κλείσει και αυτή η υποενότητα, μερικά σχόλια που αξίζει να αναφερθούν είναι ότι οι θεωρητικές τιμές εύρους ζώνης στα 100 μέτρα που εκτιμήθηκε για τις αντίστοιχες ίνες της LUCEAT μπορεί να είναι υπερεκτιμημένες. Αυτό συνέβη λόγω έλλειψης πρόσθετων δειγμάτων 100 μέτρων. Επομένως, η ακρίβεια των τιμών των παραμέτρων που τέθηκαν για να προκύψουν οι συγκεκριμένες τιμές εύρους ζώνης δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί. Ωστόσο, από μετρήσεις προτύπων μακρινού πεδίου (FFP) για την πηγή και για μήκος 50 μέτρων των δύο ινών της LUCEAT με είσοδο της δέσμης στο κέντρο του πυρήνα των ινών, εφαρμόζοντας την τεχνική που έχει περιγραφεί στην [123] για την εκτίμηση των συντελεστών σύζευξης, προέκυψαν τιμές για τους συντελεστές λίγο μεγαλύτεροι, αλλά παραπλήσιοι αυτών που χρησιμοποιήθηκαν εδώ. Για τις εκτιμήσεις των συντελεστών από το σχετικό τύπο στην [123] έγιναν οι κατάλληλες μετατροπές των γωνιών που αφορούν τις τυπικές αποκλίσεις των γωνιών των δεσμών και των προφίλ, ώστε αυτές να αφορούν τιμές γωνιών μέσα στην ίνα. Υπενθυμίζεται ότι κατά την εκτίμηση του συντελεστή σύζευξης με εφαρμογή της τεχνικής στην [123], δε λαμβάνεται υπόψη καμία συνιστώσα που αφορά την επίδραση των απωλειών που δόθηκαν στην ενότητα 2.3.2. Επιπροσθέτως, η τιμή του συντελεστή σύζευξης για την ίνα αναφοράς 50 μέτρων του ζεύγους της TORAY ($3.18 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$) αποκλίνει μεν, αλλά μόνο ελαφρώς από την τιμή που εκτιμήθηκε στην [105] ($3.3 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$) και στην [106] ($3.5 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$). Με αυτή την τιμή που χρησιμοποιήθηκε εδώ προέκυψαν θεωρητικά αποτελέσματα που αποκλίνουν ελάχιστα από τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για την ίνα αναφοράς μήκους 50 μέτρων, αλλά και για την ίνα 100 μέτρων προτού θερμανθεί κατάλληλα, τμήματα τα οποία κόπηκαν από την ίδια καλούμπα της TORAY. Ταυτόχρονα, ο μειωμένος συντελεστής σύζευξης της θερμικά κατεργασμένης POF του ζεύγους της TORAY απέδωσα ικανοποιητικά. Δηλαδή, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν

εδώ για το συντελεστή σύζευξης και τον παράγοντα ανακλάσεων όλων των POFs είναι ενδεικτικές αλλά σε καμία περίπτωση ανυπόστατες ή τυχαίες.

2.4.4 Αποτελέσματα διάδοσης

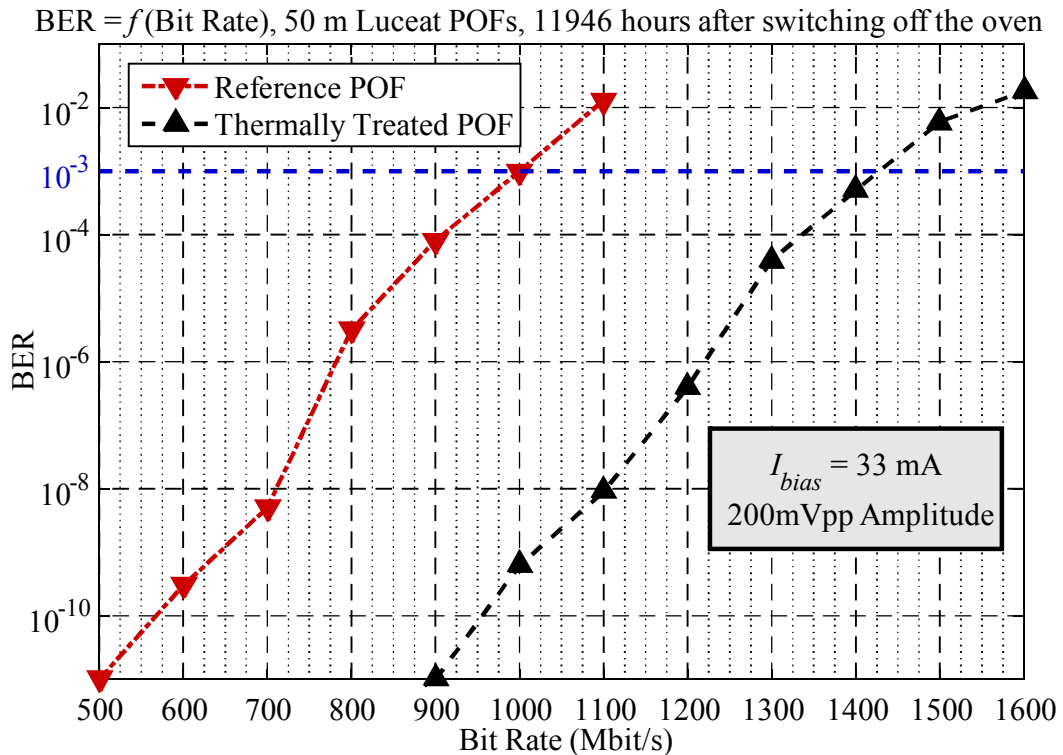
Η αύξηση του εύρους ζώνης για τις πλαστικές οπτικές ίνες που πέρασαν από τα συγκεκριμένα βήματα της διαδικασίας θέρμανσης που περιγράφηκε φάνηκε άμεσα μέσω των σχετικών καμπυλών αποκρίσεων συχνότητας. Υψηλότερο εύρος ζώνης σε σχέση με τις POF αναφοράς σημαίνει και δυνατότητα υποστήριξης υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων θεωρώντας τις πλαστικές οπτικές ίνες σαν τηλεπικοινωνιακά κανάλια. Επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον στο ρυθμό των bits που μπορεί να μεταδοθεί μέσω των καναλιών που είναι οι POFs, εξάχθηκαν πειραματικά οι καμπύλες του BER συναρτήσεως του ρυθμού των bits τόσο για το ζεύγος των ινών της TORAY όσο και το αντίστοιχο ζεύγος ινών της LUCEAT. Επαναλαμβάνεται ότι καθεμία SI-POF που εξετάστηκε σε αυτή τη σειρά μετρήσεων είχε μήκος 50 μέτρα έκαστη.



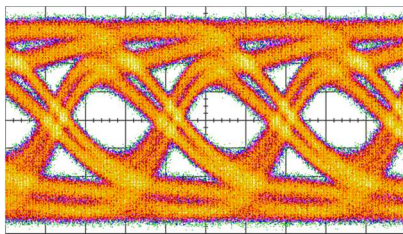
Σχήμα 2.37. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση BER και διαγραμμάτων οφθαλμού.

Η πλήρης πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.37. Η οπτική πηγή και η φωτοδίοδος με τον ενσωματωμένο TIA ήταν οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική υποδομή για τη μέτρηση των αποκρίσεων συχνότητας των ινών. Το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν OOK με εφαρμογή NRZ παλμών. Οι παλμοί NRZ παράχθηκαν από την γεννήτρια παλμών (Pulse Pattern Generator) MP1763C της Anritsu. Το πλάτος από κορυφή σε κορυφή της τάσης διαμόρφωσης προσαρμόστηκε σε μία τιμή ίση με 200 mVpp. Η οπτική δέσμη εισερχόταν στην εκάστοτε POF που εξετάζονταν συνδέοντας απευθείας πηγή και ίνα (underfilled launching conditions). Στη λήψη, η εξεταζόμενη SI-POF συνδεόταν απευθείας με την φωτοδίοδο, όπως γινόταν και στις προηγούμενες μετρήσεις των αποκρίσεων συχνότητας. Μετά τη λήψη του οπτικού σήματος και τη μετατροπή στο ηλεκτρικό επίπεδο, το ηλεκτρικό σήμα οδηγούνταν είτε στη μονάδα απεικόνισης ώστε να παρουσιαστούν τα διαγράμματα οφθαλμού είτε στον φωρατή σφαλμάτων ώστε να εκτιμηθεί η επίδοση βάσει της μέτρησης του BER. Η μονάδα απεικόνισης των διαγραμμάτων οφθαλμού ήταν ο Digital Communication Analyzer 83480A της Hewlett Packard και ο φωρατής σφαλμάτων ήταν ο Error Detector MP1764C της Anritsu. Τονίζεται ότι δεν εφαρμόστηκε κάποιου είδους εξίσωση καναλιού στο δέκτη, καθώς ο

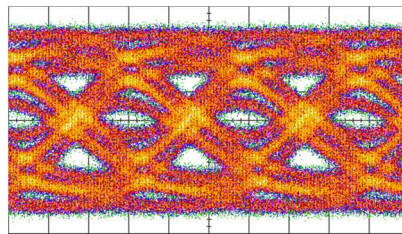
στόχος ήταν αποκλειστικά η εξέταση της επίδοσης των POFs αναφοράς και θερμικά κατεργασμένης σαν τηλεπικοινωνιακά κανάλια. Μεταδόσεις υπό καθεστώς πλήρους κάλυψης της έδρας εισόδου του φωτός στην ίνα δεν εξετάστηκαν εξαιτίας των ιδιαίτερα υψηλών απωλειών που εισήγαγε η διάταξη που λειτουργούσε ως scrambler, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 2.4.2 και αποδόθηκε σχηματικά στο Σχήμα 2.22.



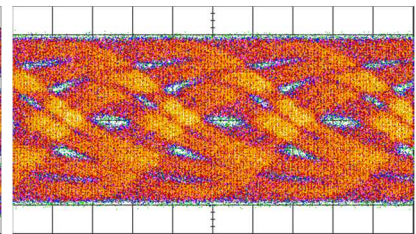
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 2.38. (α) Καμπύλες BER συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης bits για την POF αναφοράς και για την θερμικά κατεργασμένη POF της LUCEAT, 11946 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου. Διαγράμματα οφθαλμού για ρυθμούς μετάδοσης ίσους με (β) 1000 Mbit/s και (γ) 1400 Mbit/s για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα. Οι αντίστοιχες χρονικές κλίμακες ήταν 350 ps/div και 250 ps/div. (δ) Διάγραμμα οφθαλμού για ρυθμό μετάδοσης ίσο με 1000 Mbit/s χρησιμοποιώντας ως μέσο την ίνα αναφοράς. Η χρονική κλίμακα ήταν 350 ps/div. Η κλίμακα πλάτους ήταν 40 mV/div και στα τρία διαγράμματα οφθαλμού.

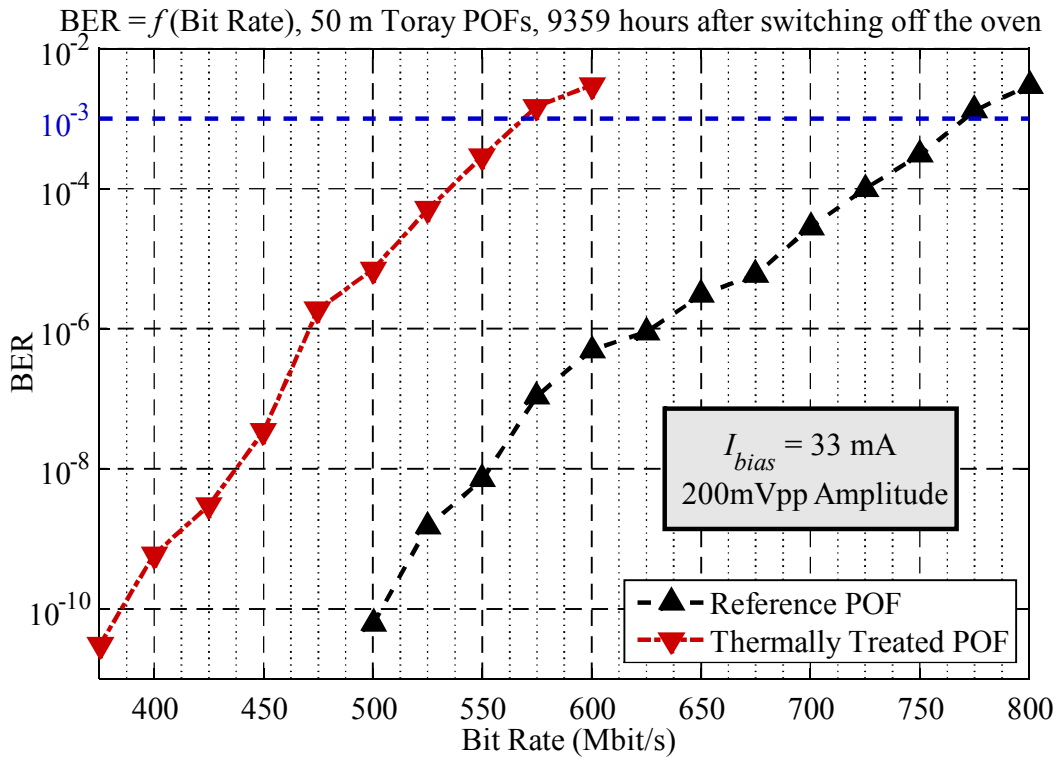
Οι καμπύλες του BER για το ζεύγος ινών της LUCEAT απεικονίζονται στο Σχήμα 2.38(α). Οι τιμές μετρήθηκαν 11946 ώρες μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας θέρμανσης και τη διακοπή της λειτουργίας του φούρνου. Φαίνεται ότι μετά από μία περίοδο μεγαλύτερη από ένα χρόνο, η θερμικά κατεργασμένη SI-POF παραμένει καθαρά ανώτερη της SI-POF αναφοράς. Η οριζόντια παχιά διακεκομμένη μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει το όριο 10^{-3} για το BER, κάτω από το οποίο μπορεί να επιτευχθεί λειτουργία χωρίς σφάλματα ($\text{BER} < 10^{-9}$) αν εφαρμοσθεί κατάλληλη κωδικοποίηση για τη διόρθωση σφαλμάτων (Forward Error Correction – FEC) [36], αν και έχουν ήδη αναπτυχθεί ισχυρότεροι κώδικες με υψηλότερο όριο BER [124]. Το όριο 10^{-3} για το BER επιτεύχθηκε οριακά για ρυθμό 1000 Mbit/s για την ίνα αναφοράς, ενώ η τιμή του BER

που επιτεύχθηκε για τη θερμικά κατεργασμένη POF για ρυθμό 1400 Mbit/s ήταν 5×10^{-4} . Αυτό σημαίνει ότι προκύπτει ένα κέρδος που ξεπερνά το 40%, μία τιμή που ταιριάζει ικανοποιητικά με τη μέση ποσοστιαία βελτίωση του εύρους ζώνης της θερμικά κατεργασμένη POF σε σύγκριση με την αντίστοιχη ίνα αναφοράς. Έχει ήδη αναφερθεί ότι η εκτίμηση για τη μέση ποσοστιαία βελτίωση από τις τιμές στο Σχήμα 2.19 ήταν λίγο πάνω στο 42.78%. Η διαφορά γίνεται ακόμα πιο εμφανής παρατηρώντας τα διαγράμματα οφθαλμού για τιμές BER κοντά στην τιμή 10^{-3} . Στο Σχήμα 2.38(γ) και στο Σχήμα 2.38(δ) απεικονίζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα οφθαλμού της θερμικά κατεργασμένης ίνας για ρυθμό 1400 Mbit/s και της ίνας αναφοράς για ρυθμό 1000 Mbit/s. Τα διαγράμματα έχουν ομοιότητες με το διάγραμμα για την περίπτωση της θερμικά κατεργασμένης POF να είναι ελαφρώς πιο ανοιχτό λόγω του χαμηλότερου BER. Το διάγραμμα οφθαλμού για τη θερμικά κατεργασμένη POF και για ρυθμό μετάδοσης 1000 Mbit/s δίνεται επίσης στο Σχήμα 2.38(β). Το διάγραμμα είναι ανοιχτό και καθαρό σε σύγκριση με το διάγραμμα στο Σχήμα 2.38(δ) για την ίνα αναφοράς στον ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Για το συγκεκριμένο ρυθμό, η τιμή BER που μετρήθηκε για τη θερμικά κατεργασμένη POF ήταν περίπου από 6.20×10^{-10} .

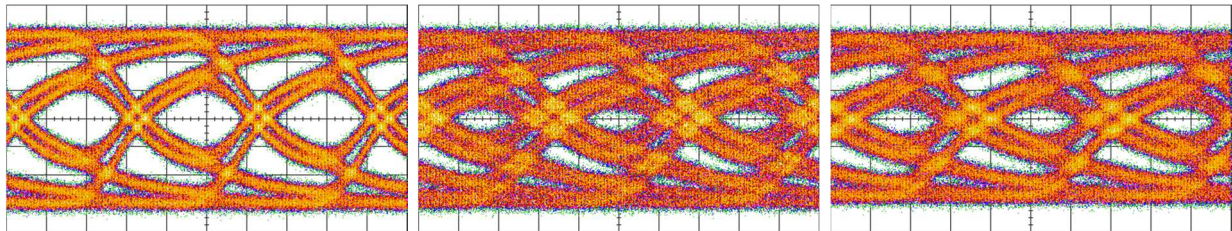
Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν και την περίπτωση του ζεύγους ινών της TORAY παρατηρώντας τις καμπύλες του BER συναρτήσεως του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.39(α). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 9359 ώρες από τη στιγμή που ολοκληρώθηκε η θερμική κατεργασία και έσβησε ο φούρνος. Κατά τη μετάδοση δεδομένων διαμορφωμένων κατά OOK σε ρυθμό 550 Mbit/s για την περίπτωση της SI-POF αναφοράς, η τιμή BER που μετρήθηκε ήταν 2.9×10^{-4} . Από την άλλη, η ίδια τιμή BER (3×10^{-4}) μετρήθηκε για ρυθμό 750 Mbit/s με εφαρμογή του ίδιου σχήματος διαμόρφωσης όταν για τη μετάδοση χρησιμοποιήθηκε η θερμικά κατεργασμένη POF. Η βελτίωση είναι μεγαλύτερη από 36% και αποτελεί μία ικανοποιητική τιμή η οποία είναι συμβατή με την αντίστοιχη μέση ποσοστιαία βελτίωση που εκτιμήθηκε από τις μετρήσεις που δόθηκαν στο Σχήμα 2.21 για το συγκεκριμένο ζεύγος ινών. Υπενθυμίζεται ότι στο χρονικό εύρος των 9002 ωρών, η μέση ποσοστιαία βελτίωση ήταν περίπου 39.28%, ενώ μετά τις 750 ώρες η ποσοστιαία βελτίωση είναι πιο σταθερή και κατά μέσο όρο εκτιμήθηκε περίπου 40.80%. Παραμένοντας στην τιμή $BER = 3 \times 10^{-4}$, το διάγραμμα οφθαλμού για την θερμικά κατεργασμένη POF φαίνεται στο Σχήμα 2.39(γ), ενώ το αντίστοιχο διάγραμμα οφθαλμού για την POF αναφοράς δίνεται στο Σχήμα 2.39(δ). Δεδομένου ότι και τα δύο διαγράμματα προέκυψαν από μετρήσεις που έδωσαν κοντινή τιμή BER, ήταν αναμενόμενο να έχουν παρόμοιο άνοιγμα τόσο στον οριζόντιο όσο και στον κατακόρυφο άξονα. Συγκρίνοντας τις δύο ίνες της TORAY υπό καθεστώς ίδιου ρυθμού μετάδοσης, η τιμή BER που επιτεύχθηκε για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα για ρυθμό μετάδοσης δυαδικών δεδομένων ίσο με 550 Mbit/s ήταν 7×10^{-9} . Αυτό σημαίνει ότι με την ίνα που υπέστη τη θερμική κατεργασία που περιγράφηκε προέκυψε βελτίωση που αντιστοιχεί σε σχεδόν πέντε τάξεις μεγέθους χαμηλότερη τιμή BER. Το αντίστοιχο διάγραμμα οφθαλμού απεικονίζεται στο Σχήμα 2.39(β). Η καλύτερη επίδοση που επιτεύχθηκε στο ρυθμό των 550 Mbit/s για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα φαίνεται καθαρά στη μορφή του οφθαλμού που είναι αρκετά καθαρότερος και πιο ανοιχτός.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι κατά την επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας από την οποία προέκυψαν οι καμπύλες του BER συναρτήσεως του ρυθμού μετάδοσης αρκετές φορές στη διάρκεια όλων των μετρήσεων που κάλυψαν χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του έτους, μόνο μικρές αποκλίσεις προέκυψαν στην επίδοση των POFs που θερμάνθηκαν κατάλληλα, με τη συμπεριφορά σε γενικές γραμμές να είναι αυτή που παρουσιάστηκε εδώ για τις ίνες της LUCEAT και της TORAY. Με την άμεση σύνδεση της πηγής με την εκάστοτε υπό εξέταση POF, η ανωτερότητα των επιδόσεων

των θερμικά κατεργασμένων ινών φάνηκε να είναι σταθερή μέχρι και τις τελευταίες χρονικά μετρήσεις που παρουσιάστηκαν.



(α)



(β)

(γ)

(δ)

Σχήμα 2.39. (α) Καμπύλες BER συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης bits για την POF αναφοράς και για την θερμικά κατεργασμένη POF της TORAY, 9359 ώρες από το σβήσιμο του φούρνου.

Διαγράμματα οφθαλμού για ρυθμούς μετάδοσης ίσους με (β) 550 Mbit/s και (γ) 750 Mbit/s για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα. Οι αντίστοιχες χρονικές κλίμακες ήταν 600 ps/div και 400 ps/div. (δ) Διάγραμμα οφθαλμού για ρυθμό μετάδοσης ίσο με 550 Mbit/s χρησιμοποιώντας ως μέσο την ίνα αναφοράς. Η χρονική κλίμακα ήταν 525 ps/div. Η κλίμακα πλάτους ήταν 30 mV/div και στα τρία διαγράμματα οφθαλμού.

2.5 Συμπεράσματα που προέκυψαν

Το αντικείμενο της παρούσας ενότητας ήταν η επίδραση μίας συγκεκριμένης διαδικασίας θέρμανσης στις ιδιότητες των SI-POFs διαφορετικών κατασκευαστών. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν ίνες από καλούμπες της TORAY και της LUCEAT. Για άμεση σύνδεση μεταξύ πηγής και POF, η επίδραση της βελτιωμένης ομοιογένειας του πυρήνα, που επιτεύχθηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θέρμανσης, υπερνικά την επίδραση της βελτίωσης των ακανόνιστων επιφανειών στα όρια πυρήνα και μανδύα και της αύξησης του παράγοντα R_{refl} που εξέφρασε θεωρητικά αυτή την αλλαγή στα όρια του πυρήνα με το μανδύα. Αυτό το γεγονός είχε ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση λιγότερων τρόπων υψηλότερης τάξης στο τέλος της ίνας για τα μήκη ινών που εξετάστηκαν, το οποίο σημαίνει ότι η διασπορά των τρόπων θα είναι μειωμένη, οπότε τα τμήματα ίνας που υπέστησαν την θερμική κατεργασία θα παρουσιάζουν υψηλότερο εύρος ζώνης. Αυτό επιβεβαιώθηκε πειραματικά τόσο για ίνες 50 μέτρων όσο και για ένα

τμήμα ίνας 100 μέτρων. Ωστόσο, τα προηγούμενα ίσχυαν υπό την προϋπόθεση η εισερχόμενη οπτική δέσμη να είναι σχετικά καλά συγκεντρωμένη στο κέντρο του πυρήνα της ίνας. Όταν η εισερχόμενη δέσμη καλύπτει όλη τη διατομή του πυρήνα της ίνας, τότε δεν προκύπτει κάποιο κέρδος για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα όσον αφορά το εύρος ζώνης του καναλιού που αποτελεί η ίνα. Αυτό συμβαίνει διότι ο συμβιβασμός μεταξύ των πιο ομοιόμορφων επιφανειών στα όρια του πυρήνα με το μανδύα από τη θερμική κατεργασία που δεν οδηγούν σε έντονη ακτινοβολή τρώπων ανώτερης τάξης κατά τις ανακλάσεις και του πιο ομοιόμορφου πυρήνα λόγω μειωμένων κέντρων σκέδασης δεν είναι υπέρ του πιο ομοιόμορφου πυρήνα που θα οδηγούσε σε αύξηση του εύρους ζώνης, εξαιτίας της λιγότερο συχνής διέγερσης και αναδιέγερσης τρώπων και την αύξηση του μήκους σύζευξης της θερμικά κατεργασμένης πλαστικής ίνας. Αντίθετα, υπό το καθεστώς εισόδου της δέσμης με πλήρη κάλυψη του πυρήνα της ίνας, δεν προκύπτει κάποιο κέρδος για την θερμικά κατεργασμένη ίνα σε σχέση με την ίνα αναφοράς του ίδιου κατασκευαστή όσον αφορά το εύρος ζώνης. Σε κάθε περίπτωση, εξακολουθούσε να υπάρχει μία μικρή μείωση των απωλειών για την θερμικά εκλεπτυσμένη ίνα το οποίο έχει ήδη επιβεβαιωθεί πειραματικά και στη διεθνή βιβλιογραφία.

Υπό καθεστώς σχετικά στενής εισερχόμενης οπτικής δέσμης στην είσοδο της ίνας, η βελτίωση των ιδιοτήτων, δηλαδή η μείωση των απωλειών και η αύξηση του εύρους ζώνης παρέμεινε σε γενικές γραμμές σταθερή για όλο το διάστημα κατά το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και για τις δύο ίνες διαφορετικών κατασκευαστών που θερμάνθηκαν κατάλληλα και εξετάστηκαν συγκριτικά με τις αντίστοιχες ίνες αναφοράς. Αυτά τα διαστήματα κατά τα οποία λαμβάνονταν μετρήσεις είχαν διάρκεια μεγαλύτερη του ενός έτους. Η βελτίωση παρουσιάστηκε μέσω διαφορετικών πειραματικών αποτελεσμάτων. Όσον αφορά το υποστηριζόμενο εύρος ζώνης, από τη μέτρηση και την απεικόνιση των μέτρων της απόκρισης συχνότητας των θερμικά επεξεργασμένων SI-POFs και των αντίστοιχων ινών αναφοράς, οι τιμές εύρους ζώνης στα 3 dB ήταν εμφανέστερα υψηλότερες για την περίπτωση των ινών που υπέστησαν τη διαδικασία θέρμανσης. Από τα αποτελέσματα του ζεύγους ινών της LUCEAT που είχαν μικρότερο αριθμητικό άνοιγμα (0.46), η ποσοστιαία βελτίωση του εύρους ζώνης για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα ξεπέρασε κατά μέσο όρο το 42%, ενώ το αντίστοιχο μέσο κέρδος από τις μετρήσεις για το ζεύγος ινών 50 μέτρων της TORAY ήταν μεγαλύτερο από 39% υπέρ της θερμικά κατεργασμένης ίνας. Μένοντας στη κατασκευάστρια TORAY, για την ίνα 100 μέτρων η βελτίωση στο εύρος ζώνης ήταν κυμαινόταν γύρω από μία μέση τιμή της τάξης του 37% για το πλήθος των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, δόθηκαν καμπύλες του BER συναρτήσει του ρυθμού των bits, όπου ήταν προφανής μία οριζόντια ολίσθηση των καμπυλών των θερμικά κατεργασμένων SI-POFs προς υψηλότερους ρυθμούς για τις ίδιες τιμές BER, σε σχέση με τις αντίστοιχες ίνες αναφοράς. Θέτοντας ως όριο την περίπτωση BER κοντά στην τιμή 10^{-3} , για την περίπτωση της κατεργασμένης ίνας της LUCEAT των 50 μέτρων, ο ρυθμός για τον οποίο επιτεύχθηκε BER αυτής της τάξης ήταν της τάξης του 40% μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο ρυθμό που επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας ως τηλεπικοινωνιακό κανάλι την ίνα αναφοράς από τον ίδιο κατασκευαστή. Παρόμοια, για τις SI-POFs 50 μέτρων από την TORAY, για κοινή τιμή BER μεταξύ 10^{-4} και 10^{-3} για τις δύο ίνες, ο ρυθμός για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα που επιτεύχθηκε ήταν πάνω από 36% μεγαλύτερος, σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό για την ίνα αναφοράς, και πιο συγκεκριμένα οι ρυθμοί ήταν 750 Mbit/s και 550 Mbit/s, για τη θερμικά κατεργασμένη και την ίνα αναφοράς, αντίστοιχα. Σχετικά με τις απώλειες, για τις ίνες των 50 μέτρων, από το ζεύγος των LUCEAT POFs, εκτιμήσεις από μετρήσεις κατά περιόδους έδωσαν μείωση των απωλειών σε ένα εύρος μεταξύ 0.5 dB μέχρι 0.95 dB, με άμεση σύνδεση πομπού και ίνας. Η αντίστοιχη μείωση υπό πλήρη κάλυψη της διατομής εισόδου της ίνας με τη εισερχόμενη δέσμη ήταν μεταξύ 0.40 dB και 0.82 dB. Αντίστοιχα, από το ζεύγος των

TORAY POFs, με την ίδια διαδικασία μετρήσεων και με άμεση σύνδεση πομπού και ίνας, η μείωση των απωλειών για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα κυμάνθηκε σε ένα εύρος μεταξύ 0.35 dB μέχρι 0.64 dB. Υπό πλήρη κάλυψη της διατομής εισόδου της ίνας με την εισερχόμενη δέσμη, προέκυψε μείωση των απωλειών μεταξύ 0.5 dB και 0.85 dB.

Πρόσθετα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ενίσχυσαν τη δικαιολόγηση των παραμέτρων της ίνας που μεταβάλλονται από τη θερμική κατεργασία. Με μέτρηση του προφίλ κοντινού πεδίου αρχικά επιβεβαιώθηκε ότι οι θερμικά κατεργασμένη POF διατήρησε το βηματικό προφίλ του δείκτη διάθλασης. Με πλήρη κάλυψη της διατομής εισόδου της ίνας από την οπτική δέσμη, απαραίτητη συνθήκης για την μέτρησης του NFP, προέκυψε υψηλότερο λαμβανόμενο σήμα για τη θερμικά κατεργασμένη POF. Η μέτρηση του FFP για το ζεύγος ινών 50 μέτρων της LUCEAT, έδωσε ευρύτερο και ταυτόχρονα ασθενέστερο προφίλ για την ίνα αναφοράς σε σχέση με τη θερμικά κατεργασμένη ίνα.

Οι περιγραφές των φαινομένων και θεωρητικές ερμηνείες που έγιναν εδώ φαίνονται ότι συμβαδίζουν με τα πειραματικά δεδομένα που εκτέθηκαν. Το επόμενο βήμα ήταν η αρχική εκτίμηση ότι με τη διαδικασία θέρμανσης που περιγράφηκε μειώνονται οι διαταραχές του δείκτη διάθλασης μέσα στον πυρήνα της ίνας, ενώ βελτιώνονται και οι ανωμαλίες στα όρια πυρήνα-μανδύα, να ενισχυθεί και με τη σχετική θεωρητική μοντελοποίηση των ινών που οδήγησε σε επιβεβαίωση των εκτιμήσεων μέσω συγκρίσεων με πειραματικές καμπύλες. Επομένως, από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, η υπόθεση ότι μετά την εφαρμογή των βημάτων θέρμανσης που περιγράφηκαν στην υποενότητα 2.4.2 τα κέντρα σκέδασης στην POF μειώνονται, γεγονός το οποίο αντιπροσωπεύεται από τη μείωση του συντελεστή σύζευξης, και οι μη ομαλές επιφάνειες στα όρια μεταξύ πυρήνα και μανδύα εξομαλύνονται ελαφρώς, γεγονός που υποδεικνύεται από την αύξηση του παράγοντα ανακλάσεων, φαίνεται ότι είναι ρεαλιστική.

Η διαδικασία θέρμανσης με τα συγκεκριμένα βήματα και η επαναφορά στους 65°C που εφαρμόστηκε είχε ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση των μεταβολών, όπως φάνηκε από τη χρονική εξέλιξη της ποσοστιαίας μεταβολής στο εύρος ζώνης και από τις μετρήσεις των απωλειών των χρονικά κατεργασμένων ινών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ίνες αναφοράς. Αυτά τα βήματα ήταν κρίσιμης σημασίας στις αλλαγές, καθώς στη διεθνή βιβλιογραφία, αντίστοιχα πειράματα με SI-POF μεγάλης διατομής, δηλαδή με διάμετρο πυρήνα ίση με 1 mm, δεν έχουν αποδώσει τα σημαντικά κέρδη, που φάνηκαν στην παρούσα εργασία. Για παράδειγμα, στην [48], μία εκ των ινών από PMMA που χρησιμοποιήθηκε είχε ίδια χαρακτηριστικά (προτού υποστεί οποιαδήποτε επεξεργασία) με αυτά των ινών που κόπηκαν από την καλούμπα της TORAY. Ακολουθώντας διαφορετικό μοτίβο θέρμανσης, διαφορετική τιμή μέγιστης θερμοκρασίας που τέθηκε και διαφορετική διαδικασία κατά την οποία η ίνα ψυχραινόταν, τα αποτελέσματα ήταν τελικά μετά την επαναφορά της ίνας στην αρχική θερμοκρασία, να έχουν αυξηθεί οι απώλειες και ταυτόχρονα να έχει μειωθεί ο υποστηριζόμενος ρυθμός για συγκεκριμένο BER σε σχέση με τις δυνατότητες της ίνας πριν τη θέρμανση. Οποιοδήποτε κέρδος στο ρυθμό ή στις απώλειες προέκυψε κατά τη διάρκεια των βημάτων θέρμανσης της ίνας στην [48], τελικά χάθηκε και οποιαδήποτε αποκατάσταση του ρυθμού ήταν πιο κάτω σε σχέση με το ρυθμό πριν τη θέρμανση. Ωστόσο, οι υπόλοιπες ίνες που εξετάστηκαν είχαν πυρίμαχο περίβλημα και παρουσίασαν πιο σταθερή συμπεριφορά.

Σε άλλη εργασία ίνα με πυρήνα από PMMA όπου υπέστη θέρμανση [125], και πάλι τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν στην ίδια κατεύθυνση με αυτά που παρουσιάστηκαν εδώ. Πέρα από τα διαφορετικά βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη διαδικασία θέρμανσης, η πλαστική ίνα που χρησιμοποιήθηκε είχε μικρότερο αριθμητικό άνοιγμα, ενώ ήταν διπλού μανδύα και όχι τυπική SI-POF. Το αποτέλεσμα ήταν η

αύξηση των διαταραχών μέσα στον πυρήνα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Συνδέοντας τα αποτελέσματα με το θεωρητικό μοντέλο της χρονικά ανεξάρτητης ροής ισχύος μέσα στην ίνα [125], ο συντελεστής σύζευξης (D) μέσα στην ίνα αυξανόταν με την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι ερευνητές δικαιολόγησαν μία δυνατή αύξηση του εύρους ζώνης με την αύξηση του συντελεστή σύζευξης, λαμβάνοντας υπόψη ότι αύξηση του συντελεστή σύζευξης σημαίνει ισχυρότερη σύζευξη των τρόπων και μείωση του μήκους που αντιστοιχεί κατάσταση (EMD). Αυτό σημαίνει ότι μειώνεται το μήκος πέρα από το οποίο το εύρος ζώνης μειώνεται με πιο αργό ρυθμό ($1/z^2$ και όχι $1/z$ που ισχύει πριν της επίτευξη της EMD). Όσον αφορά, τις απώλειες, αυτές αυξήθηκαν ελάχιστα κατά τη διαδικασία θέρμανσης. Αντίθετα, με τις ίνες που χρησιμοποιήθηκαν εδώ, συνέβη η ανάποδη διαδικασία, δηλαδή με τη μείωση των συντελεστών σύζευξης που υποστηρίχθηκε θεωρητικά και επιβεβαιώθηκε με τη συμφωνία θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, συνέβη πρακτικά η επέκταση της κατάστασης EMD, αλλά η μείωση του συντελεστή σύζευξης και η αύξηση του παράγοντα των ανακλάσεων έδωσε καθαρή βελτίωση του εύρους ζώνης για το ίδιο μήκος ίνας από τον ίδιο κατασκευαστή χωρίς να έχει υποστεί κάποια θερμική κατεργασία. Επιπλέον, αντίστροφη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και σχετικά με τις απώλειες όπου τόσο εδώ όσο και στην [115], για τις ίνες με τα συμβατικά χαρακτηριστικά (μεγάλου πυρήνα με αριθμητικό άνοιγμα 0.5) οι απώλειες εμφάνισαν μείωση.

Σύμφωνα με άλλη εργασία [126], για πλαστικές οπτικές ίνες που έχουν υποστεί στρέψεις γύρω από κύλινδρο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις που αφορούσαν τις απώλειες. Η εξέταση της επίδρασης της θερμοκρασίας στις απώλειες των δειγμάτων POFs που χρησιμοποιήθηκαν έγινε για διαφορετικό πλήθος στρωφών (0.25, 0.5, 1 και 2 στρόφες) και για διαφορετικές τιμές ακτίνας στρέψης. Παρατηρήθηκε αύξηση των απωλειών που εξαρτώνται από την θερμοκρασία με την ταυτόχρονη αύξηση των στρέψεων. Επιπλέον, αυτό που αναφέρεται είναι ότι με την αλλαγή της θερμοκρασίας αλλάζει το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας και πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται. Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τυπικές SI-POF, με χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτών της TORAY (αριθμητικό άνοιγμα 0.5). Το εύρος των θερμοκρασιών που εφαρμόστηκαν ήταν μεταξύ 20°C και 70°C με τις μετρήσεις να γίνονται ανά 10°C, αλλά δε δόθηκαν περισσότερα στοιχεία σχετικά με τις χρονικές διάρκειες των πειραμάτων θέρμανσης.

Εδώ έγιναν σχετικές αλλά πρόχειρες μετρήσεις που αφορούσαν τον υπολογισμό του αριθμητικού ανοίγματος ίνας και πραγματοποιήθηκαν σε τμήματα ινών 3.2 μέτρων της R&M ([120]). Το ένα τμήμα αποτέλεσε την ίνα αναφοράς, ενώ το δεύτερο τμήμα θερμάνθηκε κατάλληλα με το μοτίβο που εφαρμόστηκε επιτυχώς και στα προηγούμενα τμήματα ινών των άλλων κατασκευαστών. Η εκτίμηση του αριθμητικού ανοίγματος πραγματοποιήθηκε αφού η θερμικά κατεργασμένη οπτική ίνα κρύωσε. Για την εκτίμηση, έγινε μέτρηση του FFP των δύο ινών με την εισερχόμενη δέσμη να καλύπτει πλήρως τη διατομή του πυρήνα στην είσοδο της εξεταζόμενης ίνας, δηλαδή χρησιμοποιήθηκε ο scrambler. Αρχικά, για κάθε ίνα, για τα pixels για τα οποία η ένταση ήταν στο 5% της μέγιστης τιμής, η οποία αντιστοιχούσε στην κορυφή του FFP, υπολογίστηκαν οι αποστάσεις από το pixel για το οποίο μετρήθηκε η μέγιστη τιμή. Έπειτα, εκτιμήθηκε η γωνία της οποίας η εφαπτομένη είναι ο λόγος της μέσης απόστασης που προέκυψε και της απόστασης της ίνας από το πέτασμα. Η τιμή του αριθμητικού ανοίγματος εκτιμήθηκε από το ημίτονο της γωνίας που αναφέρθηκε και ήταν πολύ κοντά στην ονομαστική τιμή του κατασκευαστή τόσο για την ίνα που πέρασε από τη θερμική κατεργασία όσο και για το τμήμα ίνας που χρησιμοποιήθηκε ως τμήμα αναφοράς.

Επομένως, δεν αρκούσε μόνο η θέρμανση της ίνας σε κάποια υψηλή θερμοκρασία, αλλά το μοτίβο θέρμανσης με τα συγκεκριμένα βήματα που ακολουθήθηκαν έδωσαν τη σταθεροποίηση της βελτίωσης τόσο για το εύρος ζώνης όσο και για τις απώλειες. Επιπλέον, οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν εδώ ήταν συμβατικές ίνες SI-POF χωρίς

κάποιο πυρίμαχο περίβλημα ή κάποια περίτεχνη κατασκευαστική δομή για τον μανδύα. Η μόνη διαφορά των ινών των δύο κατασκευαστών ήταν στο αριθμητικό άνοιγμα (0.5 για τις ίνες της TORAY και 0.46 για τις ίνες της LUCEAT), με την συμπεριφορά των δειγμάτων να είναι παρόμοια από της επίδραση της διαδικασίας θέρμανσης.

Αυτό που προκύπτει είναι ότι αν η διαδικασία κατασκευής των SI-POFs γίνει λίγο πιο εκλεπτυσμένη, είναι δυνατό να παραχθεί μία SI-POF με πιο ικανοποιητικά χαρακτηριστικά όσον αφορά τις απώλειες και τους ρυθμούς που μπορούν να υποστηριχτούν, χρησιμοποιώντας πηγές που εκπέμπουν χωρικά σχετικά στενές δέσμες, οι οποίες είναι εμπορικά διαθέσιμες, χωρίς να είναι αναγκαία η αύξηση του κόστους.

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΔΙΑΧΥΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

3.1 Γενική εικόνα συστημάτων επικοινωνιών διάχυτων μεταδόσεων

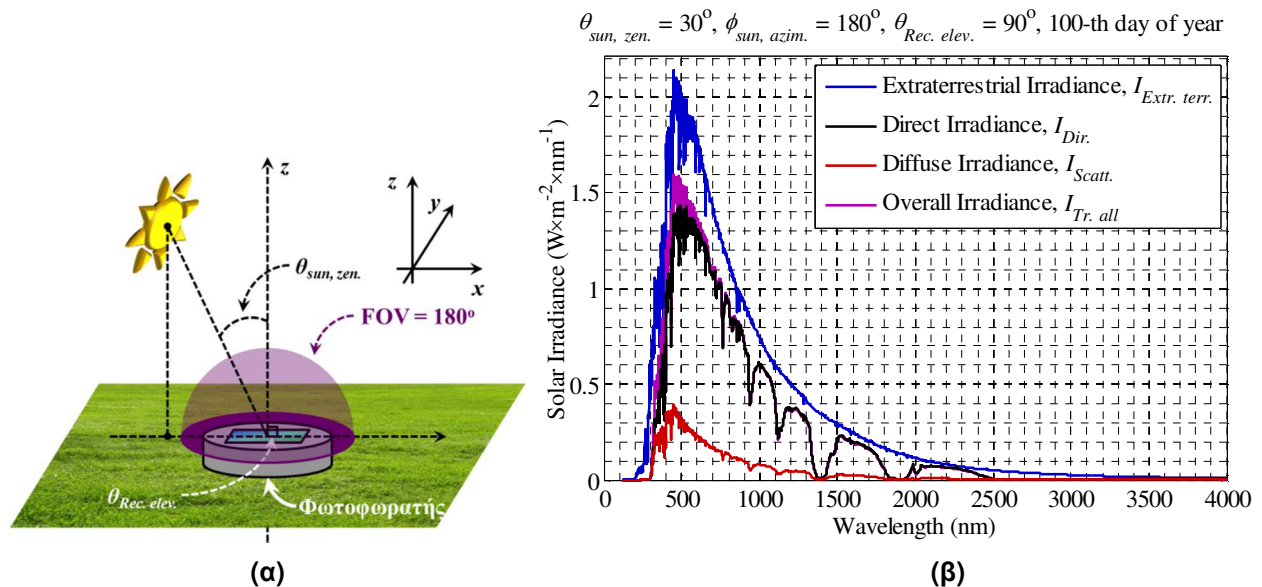
Στο προηγούμενο κεφάλαιο φάνηκε ότι επίτευξη ζεύξεων σε μικρές αποστάσεις με ικανοποιητικές επιδόσεις και χαμηλό κόστος είναι δυνατή με πλαστικές οπτικές ίνες μεγάλου πυρήνα. Με επέμβαση στο ίδιο το μέσο με κατάλληλη θέρμανση, υποστηρίχθηκαν υψηλότερες επιδόσεις. Ωστόσο, στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η επίτευξη ενσύρματων οπτικών συνδέσεων για την κάλυψη μικρών αποστάσεων, τότε η προσέγγιση των ασύρματων μεταδόσεων μπορεί να αποτελέσει μία ρεαλιστική και αποδοτική λύση. Εναλλακτικές ασύρματων τεχνολογιών αποτελούν συστήματα όπου μπορεί να γίνει εφαρμογή μικροκυματικών ή οπτικών μεταδόσεων. Μένοντας στην κάλυψη μικρών αποστάσεων, πχ λίγων δεκάδων μέτρων, οι μικροκυματικές μεταδόσεις έχουν βρει ευρεία εφαρμογή σε καθημερινές δραστηριότητες, όπως σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας με κάλυψη φεμτο-κυψελών (femto-cells) σε ενδο-οικιακά δίκτυα, σε τοπικά δίκτυα, σε «προσωπικά» δίκτυα (personal area networks) ή ακόμα και σε δίκτυα γύρω και πάνω στο ανθρώπινο σώμα (body area networks), αλλά και τη διασύνδεση των προηγούμενων [127]. Οι οπτικές ασύρματες μεταδόσεις, από την άλλη, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για μεταδόσεις σε κοντινές αποστάσεις [12]. Οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί όταν απαιτείται οπτική επαφή (Line-of-Sight – LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη μπορούν να ξεπεράσουν το 1 Gbit/s ανά σύνδεση [13]. Οι τυπικές περιοχές μηκών κύματος για τέτοιες μεταδόσεις βρίσκονται στο εγγύς υπέρυθρο και είναι τα 850 nm (780 nm – 950 nm), τα 1310 nm και τα 1550 nm. Σημαντικό έδαφος αποκτά τα τελευταία χρόνια και ο τομέας των επικοινωνιών με χρήση ορατού φωτός (Visible Light Communication – VLC) [11].

Φαίνεται ότι υπάρχει πληθώρα επιλογών για την κάλυψη μικρών αποστάσεων. Ωστόσο, πρέπει να καθοριστούν το περιβάλλον και οι συνθήκες υπό τις οποίες θα εφαρμοσθούν οι ασύρματες μεταδόσεις. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του κόστους επιβάλλει τη χρήση φάσματος για το οποίο δεν απαιτείται αδειοδότηση. Σε μία τέτοια περίπτωση, αποκλείονται πολλές εκδοχές μικροκυματικών συστημάτων. Επιπλέον, φάσμα ελεύθερο για μικροκυματικές μεταδόσεις εμφανίζει χαμηλά επίπεδα ρυθμαπόδοσης λόγω τη αναμενόμενης επιβάρυνσης από την ταυτόχρονη χρήση από πολλούς χρήστες σε περιβάλλοντα μεγάλης πυκνότητας χρηστών. Σε μία γενικότερη κατεύθυνση για μείωση των εκπομπών αερίων των θερμοκηπίου, πρέπει να αναφερθεί ότι τα μικροκυματικά συστήματα βρίσκονται σε μία ενδιάμεση κατάσταση, ενώ τα οπτικά συστήματα έχουν μία ελαφρά υπεροχή έχοντας μικρότερη κατανάλωση [12] ειδικά για περιπτώσεις μικρών αποστάσεων, όπως πχ σε εσωτερικούς χώρους. Ένα άλλο πρόβλημα των μικροκυματικών συστημάτων είναι οι διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών. Συνήθως η αντιμετώπισή τους γίνεται με την χρήση τεχνικών διαφορικής εκπομπής ή/και λήψης αυξάνοντας ελαφρώς την πολυπλοκότητα του συστήματος. Σε ασύρματα συστήματα οπτικών επικοινωνιών, διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών δεν υπάρχουν. Βέβαια, αρνητική επίδραση λόγω πολυδιόδευσης υπάρχει, καθώς το αποτέλεσμα είναι η χρονική διεύρυνση των μεταδιδόμενων παλμών. Όμως, όταν εφαρμόζεται άμεση διαμόρφωση φωτεινής έντασης στον πομπό και άμεση φώραση στον εκάστοτε δέκτη (Intensity Modulation – Direct Detection – IMDD), τότε λόγω του ότι η μεταδιδόμενη οπτική ακτινοβολία βρίσκεται στην περιοχή των νανομέτρων, ενώ οι διαστάσεις της επιφάνειας του φωτοφωρατή, ο οποίος είναι νόμου τετραγώνου, είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες, υπάρχει προστασία από διαλείψεις λόγω πολυδιόδευσης [128] και οι διαλείψεις δε θα προκαλέσουν διακυμάνσεις του πλάτους και της φάσης του σήματος. Το ισοδύναμο των μικροκυματικών διαλείψεων υπάρχει και στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες. Πρόκειται για την αυξομείωση της φωτεινής έντασης στο δέκτη που συνήθως αναφέρεται ως scintillation, αλλά οφείλεται σε οπτικές διαταραχές (turbulence)

που συμβαίνουν στο ασύρματο οπτικό μέσο. Οι οπτικές διαταραχές είναι το αποτέλεσμα των τυχαίων μεταβολών του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας. Τέτοιες μεταβολές είναι δυνατό να εμφανιστούν με την τυχαία αυξομείωση της θερμοκρασίας [129]. Αναφέρεται ότι η επίδραση τέτοιων οπτικών διαταραχών γίνεται σημαντική με την αύξηση των αποστάσεων και δε θα μας απασχολήσουν. Επανερχόμενοι στις τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών για μικρές αποστάσεις, οι απαιτήσεις κινητικότητας ικανοποιούνται αξιόπιστα σε μικροκυματικά συστήματα, ενώ μπορούν να αντιμετωπιστούν σχετικά ικανοποιητικά και σε οπτικά δίκτυα και ειδικότερα σε VLC συστήματα [12], [130]. Εκεί όπου υπερτερούν τα μικροκυματικά συστήματα είναι στις απώλειες. Ωστόσο, οι μικρότερες απώλειες έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παρεμβολή σε ένα γειτονικό σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται η ίδια φέρουσα για τις εκπομπές. Συνήθως, η αρνητική επίδραση αυτού του προβλήματος μπορεί να αντιμετωπιστεί με κατάλληλο έλεγχο της εκπεμπόμενης ισχύος από την εκάστοτε μονάδα. Και πάλι, όμως, η ταυτόχρονη η χρήση του φάσματος θα έχει ως αποτέλεσμα την ελαφρά πτώση των επιδόσεων λόγω των παρεμβολών. Μένοντας στο κομμάτι των παρεμβολών, στα μικροκυματικά συστήματα παρεμβολές μπορεί να εμφανιστούν από γειτονικά κανάλια λόγω μη ικανοποιητικού ελέγχου ισχύος ή ακόμα και από άλλα συστήματα που εδράζονται στον ίδιο χώρο, όπως πχ επιθυμητές μεταδόσεις σε ασύρματο δίκτυο 802.11b/g/n στα 2.4 GHz θα υποστούν παρεμβολές όταν το δίκτυο συνυπάρχει με ένα σύστημα Bluetooth. Γενικότερα, τα μικροκυματικά συστήματα είναι ευάλωτα στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference – EMI). Κάνοντας μία σύντομη αναφορά, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μπορεί να προκύψουν από ανθρώπινες κατασκευές, πχ σαν αυτές που μόλις περιγράφηκαν, δηλαδή από μεταδόσεις συστημάτων στην ίδια ή σε κοντινή συχνότητα, παρεμβολές από ηλεκτρικά κυκλώματα μέσω επαγωγής κτλ. Επιπλέον, υπάρχουν και φυσικές πηγές παρεμβολών όπως οι ηλιακές καταιγίδες και οι αστραπές. Η τεράστια ανοχή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που δεν οφείλονται σε ηθελημένη απόπειρα υποβάθμισης της επικοινωνίας, αλλά σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, είναι το βασικότερο πλεονέκτημα των ασύρματων οπτικών συστημάτων. Αν ταυτόχρονα, στις απαιτήσεις των συστημάτων εισέλθουν και θέματα ασφάλειας, τα οπτικά συστήματα επικρατούν [12]. Αυτό συμβαίνει επειδή είναι δυσκολότερη η υποκλοπή των οπτικών δεσμών, καθώς αυτές περιορίζονται χωρικά ειδικά αν πρόκειται για μεταδόσεις lasers. Επομένως, θέτοντας ως προϋποθέσεις την κάλυψη μικρών αποστάσεων, τη χαμηλή κινητικότητα, την ελαχιστοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και την ασφάλεια των μεταδόσεων, τότε τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών έχουν προβάδισμα.

Αν στις προηγούμενες απαιτήσεις προστεθεί και η διάχυτη μετάδοση σε εξωτερικό περιβάλλον τότε εμφανίζονται σοβαροί περιορισμοί στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών για τις συμβατικές μπάντες που ήδη αναφέρθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, η διάχυτη μετάδοση μειώνει μεν τις απαιτήσεις αυστηρής ευθυγράμμισης μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη, αλλά επιβάλλει την μείωση των ρυθμών μετάδοσης λόγω της αύξησης των απωλειών. Αυτό δεν είναι σοβαρό πρόβλημα σε αυτόνομα δίκτυα αισθητήρων όπου η υποστήριξη ρυθμών της τάξης των kilobits/sec είναι αρκετή. Ο σοβαρότερος περιορισμός για τα οπτικά συστήματα επικοινωνιών τα οποία λειτουργούν υπό καθεστώς διάχυτων μεταδόσεων εισέρχεται και πάλι από το ίδιο το περιβάλλον ως μία συνιστώσα θορύβου. Πρόκειται για το θόρυβο που προέρχεται από τον ήλιο. Ο οπτικός αυτός θόρυβος, μετατρέπεται σε ρεύμα από το φωτοφωρατή και επιβαρύνει το λόγο του σήματος-προς-το θόρυβο (SNR). Πρόκειται για ένα DC φωτόρρευμα το οποίο συνοδεύεται και από το αντίστοιχο θόρυβο βολής [131]. Επομένως, ακόμα και με κατάλληλο σχεδιασμό του οπτικού δέκτη ο προσθετικός θόρυβος βολής παραμένει υποβαθμίζοντας τις επιδόσεις του συστήματος. Υπό συνθήκες, η αρνητική επίδραση από το θόρυβο περιβάλλοντος μπορεί να είναι τόσο μεγάλη ώστε να φέρει στον κόρο το

δέκτη και να πάψει να λειτουργεί. Όταν γίνονται διάχυτες μεταδόσεις, ο δέκτης πρέπει να έχει μία αρκετά ευρεία γωνία θέασης (Field-of-View – FOV) και μία αρκετά μεγάλη ενεργό επιφάνεια ώστε να μπορεί να λάβει το ήδη υποβαθμισμένο από τις απώλειες σήμα. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών του, ο δέκτης θα λάβει μεγάλη οπτική ισχύ στην επιφάνειά του που θα προέρχεται και από τον ήλιο, παρά το ότι μπορεί να έχει και κατάλληλο οπτικό φίλτρο πριν από το φωτοφωρατή, ώστε να διατηρείται μόνο το απαραίτητο τμήμα του φάσματος που περιλαμβάνει το σήμα.

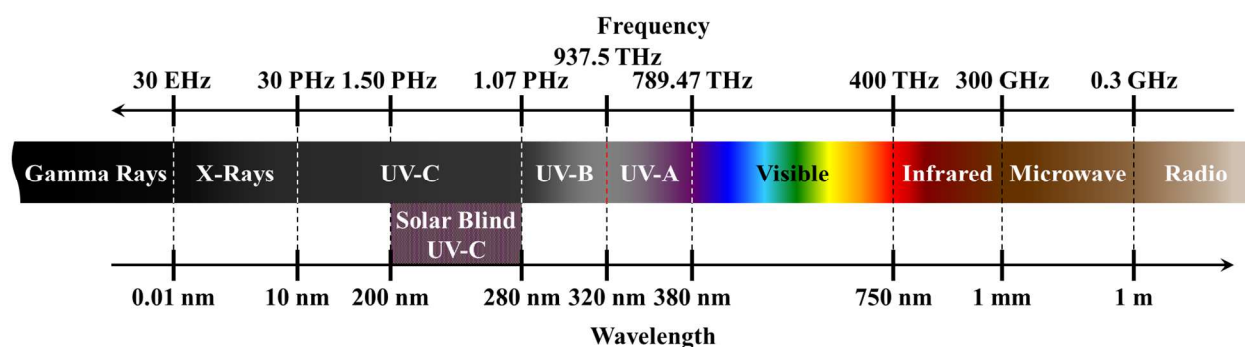


Σχήμα 3.1. (α) Οπτικός δέκτης υπό γωνία ανύψωσης 90° και λήψη οπτικού θορύβου λόγω του ηλίου. (β) Συνιστώσες λαμβανόμενης ακτινοβολίας.

Για να φανεί ποσοτικά η επίδραση του θορύβου του περιβάλλοντος, έστω ο δέκτης που φαίνεται στο Σχήμα 3.1(α). Η γωνία ανύψωσής του είναι $\theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$ (η γωνία ζενίθ είναι 0° , αντίστοιχα) και η γωνία θέασης είναι 180° . Επιπλέον, ο ήλιος βρίσκεται σε γωνία ζενίθ $\theta_{sun, zen.} = 30^\circ$ και γωνία αζιμούθιου $\phi_{sun, azim.} = 180^\circ$ την 100η μέρα του έτους. Η ατμόσφαιρα θεωρείται καθαρή. Στο δέκτη θα φθάσει μία συνιστώσα από τον ήλιο που είναι η άμεση ακτινοβολία και μία ακόμα συνιστώσα που είναι το αποτέλεσμα των σκεδάσεων στην ατμόσφαιρα και των ανακλάσεων στο έδαφος και στον αέρα. Η άμεση συνιστώσα είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ακτινοβολία που αφικνείται από τον ήλιο και είναι αυτή που αναφέρεται ως $I_{Extr. terr.}$ στο Σχήμα 3.1(β) σε μονάδες $W/(m^2 \times nm)$ σε συνάρτηση του μήκους κύματος. Η επίδραση της ατμόσφαιρας προκύπτει από τις συναρτήσεις εκπομπής (transmittance functions) των σκεδάσεων Rayleigh, της εξασθένησης λόγω των μικροσωματιδίων, της απορρόφησης λόγω υδρατμών, της απορρόφησης του όζοντος και της απορρόφησης των υπόλοιπων αερίων [132]. Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού όλων των συναρτήσεων με την $I_{Extr. terr.}$ δίνει την συνιστώσα $I_{Dir.}$ στο Σχήμα 3.1(β). Ωστόσο, στο δέκτη θα φθάσει άμεση ακτινοβολία ίση με $I_{Dir.} \times \cos(\theta_{sun, zen.})$. Η διάχυτη ακτινοβολία, $I_{Scatt.}$ στο Σχήμα 3.1(β), ως άθροισμα χωρίζεται σε τρεις όρους: στη συνιστώσα της σκέδασης Rayleigh, στη συνιστώσα σκέδασης λόγω των μικροσωματιδίων της ατμόσφαιρας και στη συνιστώσα που περιλαμβάνει τις πολλαπλές ανακλάσεις της ακτινοβολίας ανάμεσα στο έδαφος και στον ουρανό. Με βάση τη συγκεκριμένη διευσθέτηση του δέκτη, η ολική ακτινοβολία πάνω στο επίπεδο στο οποίο βρίσκεται ο δέκτης αποδεικνύεται ότι είναι $I_{Tr. all} = I_{Dir.} \times \cos(\theta_{sun, zen.}) + I_{Scatt.}$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1(β). Αν για παράδειγμα, θεωρηθεί ότι ο δέκτης λαμβάνει στο εγγύς υπέρυθρο γύρω από τα 850 nm, έχει μία επιφάνεια 100 mm^2 και μπροστά από τον οπτικό δέκτη υπάρχει ένα οπτικό φίλτρο με οπτικό εύρος ζώνης 10 nm, τότε η ισχύς θορύβου που λαμβάνεται από το δέκτη είναι περίπου 0.872 mW. Φαίνεται καθαρά ότι για να μειωθεί ο θόρυβος πρέπει να μειωθεί το FOV με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση της

επιθυμητής ισχύος και να μειωθεί η άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας θέτοντας υπό οπτική επαφή τη ζεύξη με επιλογή μηδενικών γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη παραβιάζοντας την απαίτηση του καθεστώτος διάχυτων μεταδόσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα, αρχικά, μία λύση για τη μείωση του θορύβου από το περιβάλλον θα μπορούσε να είναι η εφαρμογή μικροκυματικών συστημάτων, αλλά όπως ήδη περιγράφηκε, δεν ικανοποιείται η ελαχιστοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, ενώ η ασφάλεια των μεταδόσεων μπορεί να είναι ανεπαρκής. Επομένως, αυτό που επιβάλλεται είναι ένα ασύρματο σύστημα στο οποίο να γίνονται διάχυτες μεταδόσεις καλύπτοντας μικρές αποστάσεις, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές να είναι ελαχιστοποιημένες, η κινητικότητα να είναι ελάχιστη, να είναι εγγυημένη η ασφάλεια των μεταδόσεων και να είναι μειωμένος ο θόρυβος περιβάλλοντος. Μία μπάντα που μπορεί να ικανοποιήσει ταυτόχρονα όλους τους στόχους που τέθηκαν βρίσκεται μεταξύ 200 και 280 nm. Πρόκειται για ένα τμήμα της C μπάντας υπεριώδους ακτινοβολίας. Το τμήμα αυτό της UV-C μπάντας συνήθως αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως «ηλιακά τυφλή» UV-C μπάντα (Solar Blind UV-C band). Προφανώς, το όνομα οφείλεται στην ελάχιστη ως μηδαμινή ακτινοβολία εντός της συγκεκριμένης μπάντας που φθάνει από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης. Η θέση της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα φαίνεται στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί [11], [14]. Στη διεθνή βιβλιογραφία [14], το τμήμα μεταξύ 190 nm και 350 nm αναφέρεται ως βαθύ UV (deep UV) και είναι ευρύτερο της μπάντας που έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3.2. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα.

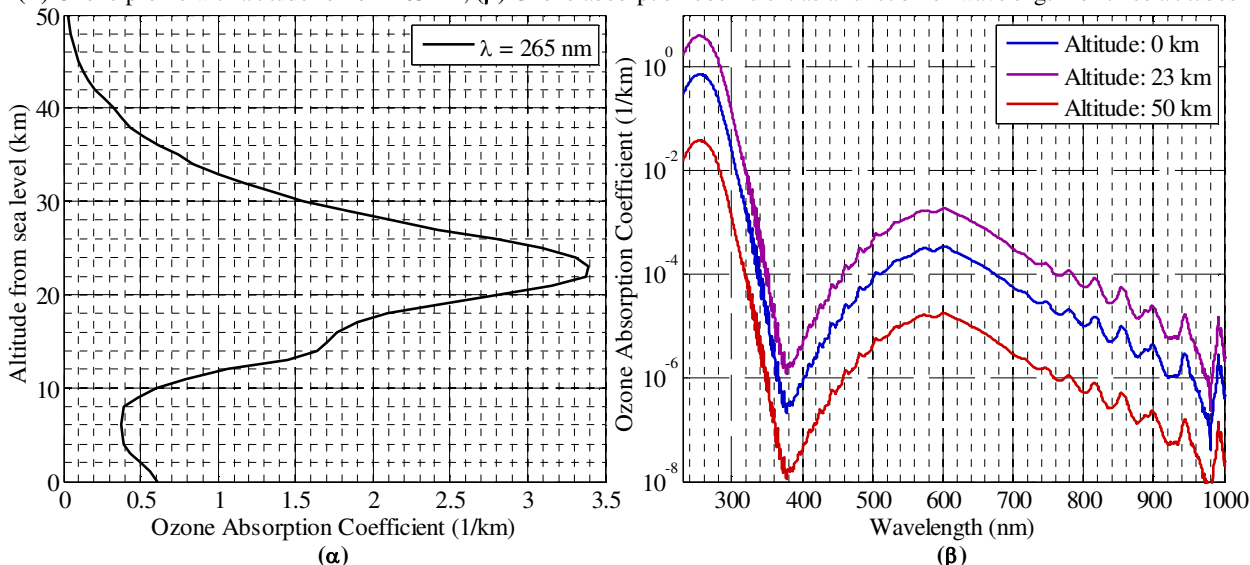
Το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μπάντα καλύπτει τις απαιτήσεις που τέθηκαν δεν είναι τυχαίο. Κάτω από τα 200 nm, η απορρόφηση στην ατμόσφαιρα είναι ιδιαίτερα ισχυρή κάνοντας την ανάπτυξη ζεύξεων ανέφικτη [14]. Δεδομένου ότι τα μήκη κύματος έχουν μικρές τιμές, φωτόνια στη μπάντα μεταξύ 200 και 280 nm είναι πιο «επιρρεπή» στη σκέδαση. Η σκέδαση Rayleigh η οποία περιγράφει τη σκέδαση των φωτονίων από τα μόρια της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται από τον αντίστοιχο συντελεστή με γνωστή τη συγκέντρωση σε μόρια κάποιου όγκου ατμόσφαιρας. Ο συντελεστής σκέδασης είναι αντίστροφα ανάλογος της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος [133]. Ταυτόχρονα, αιωρούμενα μικροσωματίδια στην ατμόσφαιρα με μέγεθος της τάξης των μηκών κύματος ή λίγο μεγαλύτερα αποτελούν την αιτία ενεργοποίησης των σκέδασης Mie που αποτελεί δεύτερη συνιστώσα σκέδασης. Η επίδραση της σκέδασης Mie μπορεί να αξιολογηθεί και αυτή μέσω του αντίστοιχου συντελεστή σκέδασης. Γενικά και ανάλογα με το περιβάλλον και τις συνθήκες που επικρατούν, οι συντελεστές σκέδασης Mie για την περιοχή μεταξύ 200 και 280 nm είναι υψηλότεροι ή παρόμοιοι σε σχέση με άλλες περιοχές μηκών κύματος. Ωστόσο, στην εν λόγω μπάντα, η επίδραση της σκέδασης ισχυροποιείται από το συνδυασμό των σκεδάσεων Rayleigh και Mie. Επομένως, γίνεται σαφές ότι φωτόνια που εκπέμπονται από κάποια πηγή στην εν λόγω περιοχή μηκών κύματος είναι πιθανότερο να υποστούν περισσότερες από μία σκεδάσεις κατά τη διάδοσή τους. Η ισχυρότερη σκέδαση επιτρέπει την ανάπτυξη των ζεύξεων και δικτύων

χωρίς την ανάγκη ένας πομπός να βρίσκεται σε οπτική επαφή με το δέκτη με τον οποίο επιθυμεί να επικοινωνήσει, αρκεί να εκπέμψει προς την περιοχή που βρίσκεται ο δέκτης και μέσω των σκεδάσεων τα φωτόνια θα φθάσουν στο δέκτη. Δηλαδή, ενώ στις συνδέσεις με οπτική επαφή οι σκεδάσεις προκαλούν αύξηση των απωλειών υποβαθμίζοντας τις επιδόσεις, στις διάχυτες μεταδόσεις λειτουργούν ως το «μέσο» για να ανακατευθυνθούν τα φωτόνια στο δέκτη και να γίνει εφικτή η σύνδεση. Ταυτόχρονα, οι απώλειες διάδοσης θα είναι αυξημένες λόγω της μη οπτικής επαφής σε σύγκριση με συμβατικά συστήματα ασύρματης οπτικής μετάδοσης με οπτική επαφή. Επιπλέον, ειδικά για την περιοχή μεταξύ 200 και 280 nm, οι συντελεστές απορρόφησης λόγω των μικροσωματιδίων είναι αυξημένοι σε σχέση με άλλες μπάντες. Λαμβάνοντας, όμως, υπόψη την εντονότερη σκέδαση, με τις μεταδόσεις στη μπάντα μεταξύ 200 και 280 nm είναι δυνατή μία μικρή μείωση των απωλειών σε σχέση με το να γίνονταν μεταδόσεις με συμβατικά μήκη κύματος (πχ εγγύς υπέρυθρο) για κάλυψη ζεύξεων της τάξης των δεκάδων μέτρων εφαρμόζοντας διάχυτη μετάδοση. Ωστόσο, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, οι απώλειες παραμένουν υψηλές, με αποτέλεσμα τα μήκη των ζεύξεων που μπορούν να καλυφθούν είναι της τάξης των δεκάδων μέτρων. Το κύριο κέρδος όμως, είναι η ελαχιστοποίηση του οπτικού θορύβου που προέρχεται από το περιβάλλον και συγκεκριμένα από τον ήλιο, όπως φαίνεται και στο αριστερό τμήμα στο Σχήμα 3.1(β). Επισημαίνεται ότι στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, σε υψόμετρο της τάξης των 20 km, απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία οδηγώντας σε ελάχιστο ή μηδενικό θόρυβο υποβάθρου. Στο τμήμα από 250 nm ως 280 nm, αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην απορρόφηση από το όζον (O_3) και δευτερευόντως στο O_2 [134]. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη απορρόφηση για το όζον παρουσιάζεται στα 255.3 nm. Όσον αφορά το οξυγόνο, από τα 260 nm και πάνω, η επίδραση στην απορρόφηση είναι αμελητέα [134]. Στο τμήμα μεταξύ 200 nm ως 250 nm, το οξυγόνο έχει μεγαλύτερη επίδραση σε σχέση με το όζον [134]. Μένοντας στην επίδραση του όζοντος και απομονώνοντας τα 265 nm, περίπου στα 23 km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας προκύπτει η μεγαλύτερη απορρόφηση για την εισερχόμενη στη γη ηλιακή ακτινοβολία [135], όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3(α). Για μηδενικό υψόμετρο, η ατμοσφαιρική πίεση θεωρήθηκε ίση με 1013.25 mb και η θερμοκρασία 15°C. Ταυτόχρονα, για το ίδιο υψόμετρο, ο συντελεστής απορρόφησης του όζοντος είναι κατά τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα σε σχέση με τους αντίστοιχους συντελεστές σε άλλες περιοχές μηκών κύματος, πχ ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα, όπως είναι ευδιάκριτο στο Σχήμα 3.3(β) [135], [136]. Η ίδια σχέση μεταξύ των μηκών κύματος διατηρείται είτε στην επιφάνεια της θάλασσας είτε σε υψόμετρο 50 km, αλλά μεταβάλλονται οι απόλυτες τιμές των συντελεστών απορρόφησης, καθώς οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται για όλα τα μήκη κύματος σε υψόμετρο 23 km περίπου. Επομένως, αν απεικονιζόταν ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει του ύψους στο Σχήμα 3.3(α) και για κάποιο άλλο μήκος κύματος πχ στο εγγύς υπέρυθρο, θα εμφανιζόταν καμπύλη παρόμοιας μορφής, αλλά με πολύ μικρότερες απόλυτες τιμές συντελεστών.

Το ερώτημα που γεννάται είναι γιατί ενώ απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία μεταξύ 200 και 280 nm καθώς εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, δε θα απορροφηθεί έντονα και η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από κάποια πηγή στο έδαφος κάνοντας ανέφικτη την επικοινωνία. Η απάντηση έχει να κάνει με το γεγονός ότι στην κατώτερη ατμόσφαιρα, τη μεγαλύτερη επίδραση έχουν τα μόρια της ατμόσφαιρας και τα μικροσωματίδια δρώντας ως πηγές σκέδασης (και όχι μόνο ως πηγές απορρόφησης) ώστε η σκέδαση να οδηγήσει σε αξιοποιήσιμα σήματα σε κάποιο δέκτη, παρά το γεγονός ότι πράγματι οι απώλειες λόγω απορρόφησης είναι αρκετά υψηλές. Επιπροσθέτως, η συγκέντρωση του όζοντος κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από ότι στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας [137], οδηγώντας σε μικρότερη απορρόφηση σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας του ηλίου στην ατμόσφαιρα της γης χιλιόμετρα ψηλά από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό φαίνεται

και πάλι στο Σχήμα 3.3(α), όπου για τα 265 nm και σε υψόμετρο 23 km, ο συντελεστής απορρόφησης του όζοντος είναι πάνω από πέντε φορές μεγαλύτερος από ότι σε μηδενικό ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας.

(α) Ozone profile with altitude for $\lambda = 265$ nm, (β) Ozone absorption coefficient as a function of wavelength for three altitudes



Σχήμα 3.3. Συντελεστής απορρόφησης του όζοντος συναρτήσει (α) του ύψους από την επιφάνεια της θάλασσας για μήκος κύματος ίσο με 265 nm και (β) του μήκους κύματος για τρία υψόμετρα.

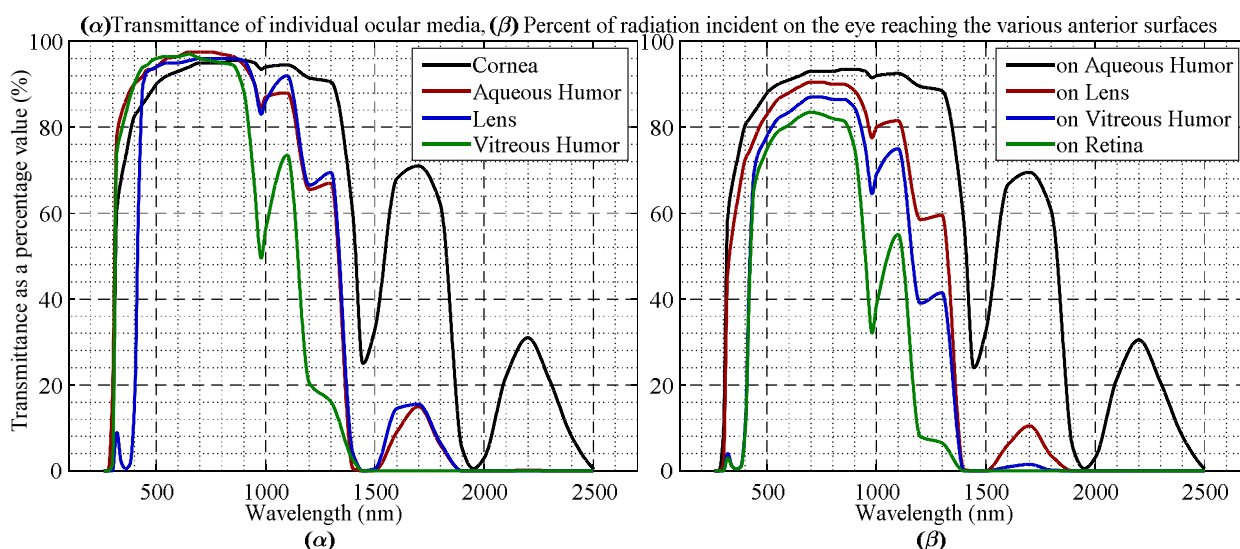
Παρά το γεγονός της ελάχιστης ή μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας, άλλες φυσικές πηγές παρεμβολών είναι οι αστραπές και η ύπαρξη φωτιάς σε κοντινή απόσταση, όπως συμβαίνει και με τα ασύρματα συστήματα οπτικών επικοινωνιών γενικότερα. Οι αστραπές μπορεί να προκαλέσουν ριπές σφαλμάτων, ενώ η φωτιά αυξάνει το κατώτατο όριο του θορύβου κάνοντας δυσκολότερη τη φώραση των σημάτων. Τα σφάλματα υπό μορφή ριπών είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη κωδικοποίηση ή αναμετάδοση της πληροφορίας. Τεχνητές πηγές παρεμβολής αποτελούν οι εκρήξεις, οι λάμπες υδραργύρου και το αποτέλεσμα του φαινομένου εκκένωσης corona (corona discharge) από ελαττωματικές γραμμές μεταφοράς και σε ηλεκτρικές διατάξεις υψηλής τάσης [138]. Τέτοιου τύπου παρεμβολές πρέπει να βρίσκονται σχετικά κοντά σε μία ζεύξη για να προκαλέσουν αρνητικές επιδράσεις στις επιδόσεις αυτής. Θεωρώντας ότι είναι δυνατή η αντιμετώπιση αυτών των παρεμβολών ή πηγών θορύβου, παραμένει η ύπαρξη της ηλιακής ακτινοβολίας ως παράγοντας που θα προκαλούσε σημαντικούς περιορισμούς στις ζεύξεις ως πηγή θορύβου, αλλά στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα, αυτή η πηγή θορύβου είναι ελάχιστη, όπως ήδη τονίστηκε. Με το ευνοϊκό καθεστώς θορύβου, δίνεται η δυνατότητα χρήσης δεκτών με ευρύτερο FOV, κάτι που εννοεί την αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος. Επιπλέον, ο συνδυασμός της σκέδασης με τις σχετικά αυξημένες απώλειες επιτρέπουν την κάλυψη-απόκρυψη (covertness) της πληροφορίας. Με τις μεγάλες απώλειες, γίνεται δύσκολη η υποκλοπή, αλλά και η παρεμβολή από απόσταση. Επομένως, η εμφάνιση κάποιου κακόβουλου χρήστη που θα μπορούσε να υποκλέψει ή να προκαλέσει παρεμβολές θα γινόταν άμεσα αντιληπτή λόγω των μικρών αποστάσεων.

Θέτοντας ως πρόσθετο περιορισμό την ανάγκη λειτουργίας υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες, τότε σίγουρα δεν ενδείκνυται η ανάπτυξη συστημάτων ασύρματων οπτικών συστημάτων στα μήκη κύματος που δόθηκαν αρχικά (ορατό και κοντινό υπέρυθρο φάσμα) υπό καθεστώς άμεσης οπτικής επαφής, διότι φαινόμενα όπως η ομίχλη προκαλούν μεγάλη αύξηση των απωλειών και σημαντική μείωση των αποστάσεων που μπορούν να καλυφθούν ή μείωση των επιδόσεων για ένα ήδη εγκατεστημένο σύστημα [139]. Άρα, ακόμα κι αν ο θόρυβος περιβάλλοντος ήταν μειωμένος σε αυτές τις μπάντες, θα ήταν πολύ πιθανό μία ζεύξη να μη λειτουργούσε λόγω της αλλαγής των

ατμοσφαιρικών συνθηκών. Ωστόσο, για ζεύξεις στην περιοχή μεταξύ 200 nm και 280 nm χωρίς οπτική επαφή και για μικρές αποστάσεις, η επιδείνωση των καιρικών συνθηκών, πχ εμφάνιση ομίχλης, σκόνης κ.α., που σημαίνει περισσότεροι σκεδαστές στο ασύρματο μέσο θα οδηγήσει σε αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος. Επομένως, αναμένεται η επίδοση ενός συστήματος να είναι αξιόπιστη και υπό κακές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Ένα κρίσιμο σημείο που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή είναι η πιθανή επιβλαβής επίδραση στην όραση από τη μετάδοση ασύρματης οπτικής ακτινοβολίας. Οι σημαντικότεροι περιορισμοί σε επίπεδα ισχύος εκπομπής προκύπτουν από τη χρήση laser. Γενικά, τα επίπεδα ισχύος που εφαρμόζονται σε ασύρματα συστήματα οπτικών επικοινωνιών δεν είναι αρκετά υψηλά για να προκαλέσουν εγκαύματα στο δέρμα. Ωστόσο, για τα μήκη κύματος στο εγγύς υπέρυθρο κάτω από τα 1400 nm, μερικά mW ακτινοβολίας από πηγή laser κατευθυνόμενη απευθείας στο μάτι είναι αρκετή για να προκαλέσει σημαντική βλάβη στην όραση, καθώς αυτά τα μήκη κύματος περνούν από τον κερατοειδή χιτώνα και μπορούν να εστιαστούν στον αμφιβληστροειδή χιτώνα καταστρέφοντάς τον [13]. Το εύρος των μηκών κύματος που εστιάζονται στο αμφιβληστροειδή βρίσκονται σε ένα εύρος μεταξύ 400 nm και 1400 nm [9] που φυσικά περιλαμβάνει και το ορατό φάσμα. Το μάτι δε μπορεί να αντιληφθεί ένα μη ορατό μήκος κύματος ώστε να κλείσει ενστικτωδώς όταν έντονα εστιασμένη ακτινοβολία εισέλθει σε αυτό. Παρά το γεγονός ότι η πιθανότητα να εισέλθει φως μέσα στο μάτι με ακρίβεια και εστιασμένα από ευθυγραμμισμένη δέσμη είναι μικρή, ο κίνδυνος εξακολουθεί ελλοχεύει σε εφαρμογές όπου τα lasers λειτουργούν κάτω από τα 1400 nm, καθώς περιπτώσεις ανακλάσεων μπορεί να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα. Το ζήτημα είναι να απορροφηθεί το φως από τον κερατοειδή ή τουλάχιστον από τμήμα του ματιού προτού φθάσει στον αμφιβληστροειδή. Τα μήκη κύματος από πηγές laser γύρω από τα 1550 nm είναι ασφαλέστερα, καθώς περνώντας από τον κερατοειδή, το υδάτινο διάλυμα (aqueous humor) και το φακό θα έχουν σχεδόν απορροφηθεί και δε θα φθάσουν στον αμφιβληστροειδή [140]. Αυτό σε γενικές γραμμές ισχύει για τα μήκη κύματος στην περιοχή μεταξύ 1400 nm και 3000 nm, ενώ ακτινοβολία σε κάποια από τα μήκη κύματος σ' αυτή την περιοχή θα απορροφηθεί από το υαλοειδές διάλυμα που έχει μορφή ζελέ (vitreous humor) και καλύπτει μεγάλο τμήμα του εσωτερικού του οφθαλμού καταλαμβάνοντας το χώρο μετά το φακό και πριν τον αμφιβληστροειδή [9], [140]. Για τα μήκη κύματος μεταξύ περίπου 300 nm και 400 nm, η ακτινοβολία που θα προσπέσει στο μάτι θα απορροφηθεί κυρίως από τον φακό του ματιού και δε θα φθάσει στον αμφιβληστροειδή [9], [140]. Στην περιοχή του υπεριώδους φάσματος μεταξύ 200 και 280 nm, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται κυρίως πηγές ασύμφωνης ακτινοβολίας αντί για εστιασμένες δέσμες laser, δηλαδή φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (LEDs), για την επίτευξη διάχυτων μεταδόσεων. Κάτω από τα 300 nm περίπου, ο ανθρώπινος κερατοειδής χιτώνας απορροφά ισχυρά την υπεριώδη ακτινοβολία εμποδίζοντάς τη να προσπέσει στον αμφιβληστροειδή. Αν αυτό συσχετιστεί με το γεγονός ότι το όζον απορροφά την εισερχόμενη στην ατμόσφαιρα ακτινοβολία από τον ήλιο κάτω από τα 280 nm, υπάρχει ένας ακόμα παράγοντας που ενισχύει τη χρήση των μηκών κύματος στο ηλιακά τυφλό τμήμα της UV-C μπάντας για την επίτευξη ζεύξεων χωρίς οπτική επαφή [13]. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μειώνουν τους κινδύνους, παρά το γεγονός ότι αυτά τα μήκη κύματος δεν θεωρούνται ιδιαίτερα ασφαλή. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3.4(α) απεικονίζεται η ποσοστιαία διέλευση φωτός (transmittance) από μεμονωμένα τμήματα του ματιού ενός παιδιού. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι αποκρίσεις του κερατοειδούς χιτώνα, του υδάτινου διαλύματος, του φακού και του υαλοειδούς διαλύματος κατά τη διέλευση φωτός μέσα σε εύρος μηκών κύματος που καλύπτει την περιοχή μεταξύ 260 nm και 2500 nm [140] (οι άξονες εκτείνονται μεταξύ 100 nm και 2700 nm). Αυτό που φαίνεται από τη διέλευση του φωτός μεμονωμένα από καθένα τμήμα είναι ότι το φάσμα μεταξύ 200 και 280 nm κόβεται από όλα τμήματα, ενώ από

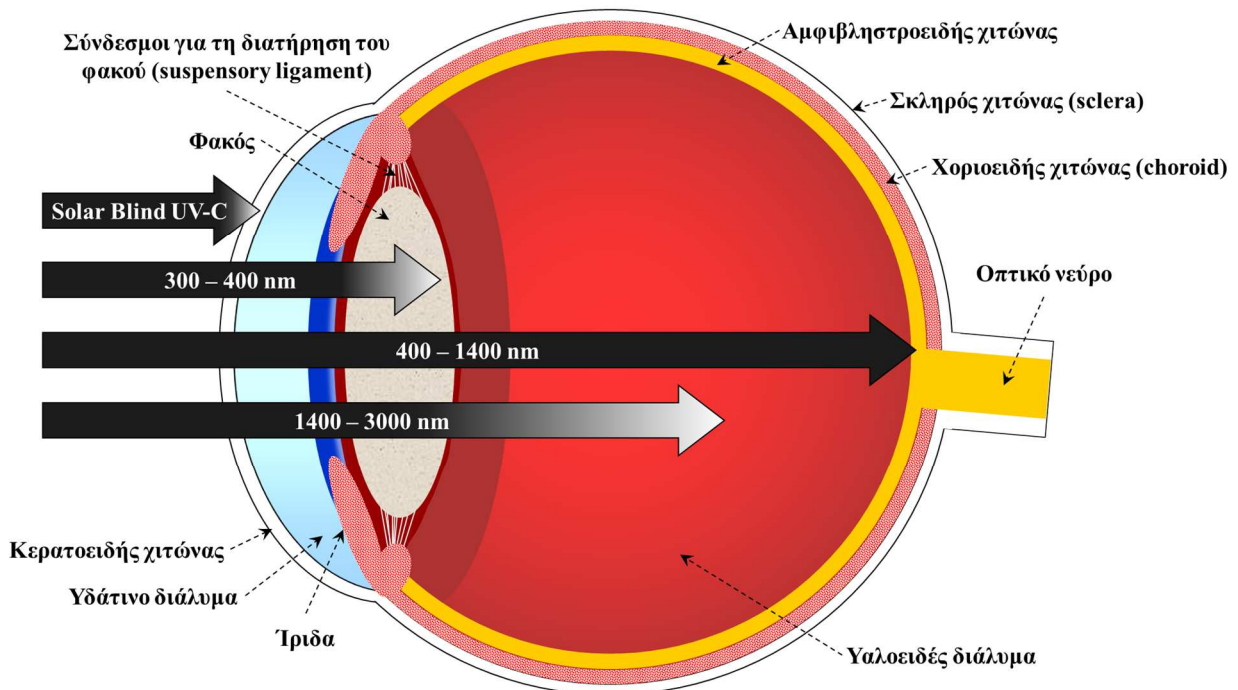
στο τμήμα από 400 nm μέχρι και τα 1400 nm, όλα τα τμήματα επιτρέπουν να περάσει σημαντική ποσότητα φωτός. Αυτό που έχει μεγάλη αξία είναι η συνολική απόκριση του ματιού στο φως και, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εκτίμηση της ακτινοβολίας που θα φθάσει στον αμφιβληστροειδή σε ποσοστό της ακτινοβολίας που θα προσπέσει αρχικά στον κερατοειδή εκτός του ματιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4(β). Αρχικά, η ποσότητα φωτός που θα πέσει στο υδατινό διάλυμα δε θα είναι σαν ποσοστό για καθεμία φασματική συνιστώσα ίση με τη διέλευση του κερατοειδούς στο Σχήμα 3.4(α) λόγω ανακλάσεων του φωτός κατά την πρόσπτωση πάνω στον κερατοειδή χιτώνα. Κατά τα υπόλοιπα στάδια, η ποσότητα σε κάποιο ενδιάμεσο τμήμα προκύπτει προσεγγιστικά από αυτό που έπεσε στο προηγούμενο στάδιο πολλαπλασιασμένο επί τη διέλευση του προηγούμενου σταδίου, καθώς οι απώλειες από εσωτερικές ανακλάσεις είναι πολύ μικρές [140]. Αυτό που επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα, είναι ότι στην περιοχή μετά τα 1400 nm, ότι φθάσει στο υαλοειδές θα απορροφηθεί προτού φθάσει στον αμφιβληστροειδή. Προσοχή χρειάζεται στο εγγύς υπέρυθρο μετά το ορατό φάσμα και κάτω από τα 1400 nm, ενώ ένα τμήμα στα όρια της UV-A και UV-B ακτινοβολίας γύρω από τα 320 nm φθάνει στον αμφιβληστροειδή ενός παιδιού λόγω του φακού του ματιού. Αυτή η μικρή κορυφή στο Σχήμα 3.4(β) εξαφανίζεται με τη γήρανση του ανθρώπου. Ο κερατοειδής είναι η αιτία μπλοκαρίσματος της UV-C από την άφιξη ενός ποσοστού στον αμφιβληστροειδή.



Σχήμα 3.4. (α) Ποσοστιαία διέλευση φωτός (transmittance) από τον κερατοειδή χιτώνα, το υδατινό διάλυμα (aqueous humor), το φακό και το υαλοειδές διάλυμα που έχει μορφή ζελέ του ματιού. (β) Προσπίπτουσα ακτινοβολία (ξεκινώντας από το 100% εκτός του ματιού) διαδοχικά μετά το πέρασμα από το κερατοειδή χιτώνα πάνω στο υδατινό διάλυμα, μετά το πέρασμα από το υδατινό διάλυμα πάνω στο φακό, μετά το πέρασμα από το φακό πάνω στο υαλοειδές διάλυμα, μετά το υαλοειδές διάλυμα πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Βοηθητικά, στο Σχήμα 3.5 δίνεται μία απλή απεικόνιση του ανθρώπινου ματιού με τις θέσεις των διαφόρων τμημάτων που αναφέρθηκαν. Επίσης, απεικονίζεται ποιοτικά και η διέλευση φωτός διαφορετικών περιοχών του φάσματος από τα διαφορετικά τμήματα. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην εκάστοτε φασματική περιοχή έχει σκούρο χρώμα και μετά το πέρασμα από το εκάστοτε τμήμα του ματιού που την απορροφά, αρχικά ανοίγει το χρώμα και τελικά γίνεται άσπρο το τελίωμα του βέλους. Φαίνεται καθαρά η χαμηλή διείσδυση της ακτινοβολίας στην περιοχή μεταξύ 200nm και 280 nm, καθώς αυτή απορροφάται απευθείας από τον κερατοειδή χιτώνα. Όσον αφορά το κομμάτι της υπεριώδους ακτινοβολία μεταξύ 300 nm και 400 nm, το Σχήμα 3.5 αφορά το μάτι ενηλίκου διότι σύμφωνα με το Σχήμα 3.4 θα υπήρχε κάποια υπολειπόμενη ακτινοβολία στον αμφιβληστροειδή αν επρόκειτο για μάτι ανηλίκου ατόμου. Η χρήση μηκών κύματος στον ελεύθερο χώρο στην περιοχή του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου φάσματος

μεταξύ 400 nm και 1400 nm χρειάζεται προσοχή ως προς τα επίπεδα μεταδιδόμενα επίπεδα ισχύος.

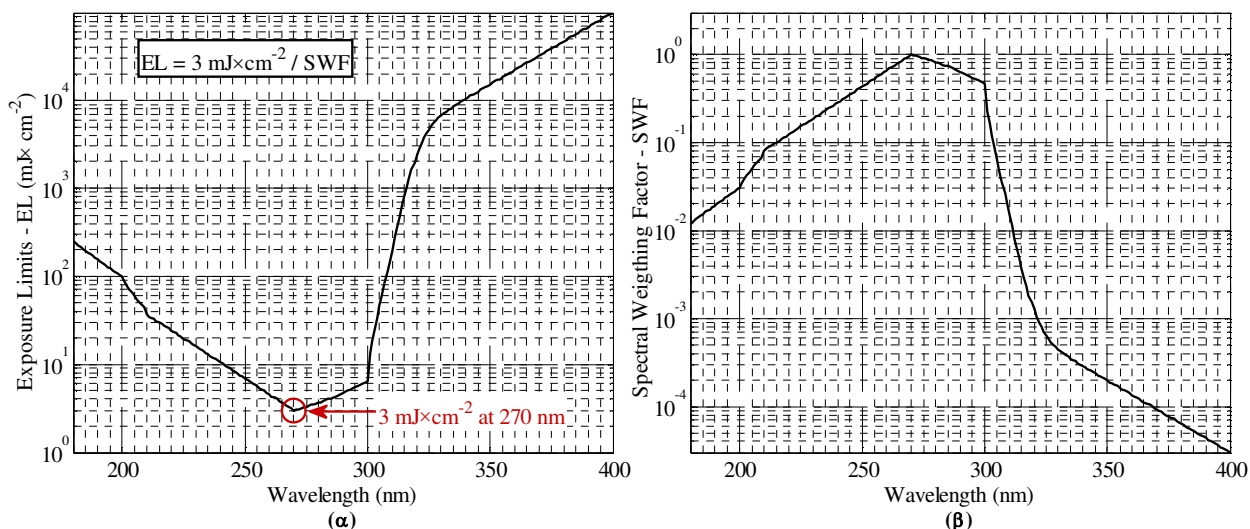


Σχήμα 3.5. Απλοποιημένη απεικόνιση της δομής του ματιού και ποιοτική απεικόνιση της διέλευσης φωτός σε διαφορετικές μπάντες μηκών κύματος.

Παρατεταμένη έκθεση σε UV-C ακτινοβολία ιδιαίτερα μεταξύ 100 και 280 nm μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βλάβες στο δέρμα, όπως εγκαύματα ή καρκίνο. Επίσης, πηγές με μήκη κύματος στην περιοχή των 260 nm χρησιμοποιούνται για καθαρισμό νερού, απολύμανση και αποστείρωση ιατρικών αντικειμένων. Τα φωτόνια με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκη κύματος περίπου στα 260 nm μπορούν να σπάσουν χημικούς δεσμούς μεταξύ συμπληρωματικών βάσεων του DNA και του RNA μικροοργανισμών όπως βακτήρια και ιοί. Έπειτα, ανάμεσα σε γειτονικές θυμίνες της ίδιας αλυσίδας δημιουργείται δεσμός διασπώντας το γενετικό κώδικα και προκαλώντας βλάβη στο DNA [141].

Αναφέρεται ότι με μικρά επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος και με μετάδοση ασύμφωνης ακτινοβολίας σε σχετικά μικρές αποστάσεις οι κίνδυνοι είναι περιορισμένοι. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό αν αξιολογηθούν τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια έκθεσης σε ακτινοβολία UV στο εύρος μηκών κύματος μεταξύ 200 με 280 nm. Πιο συγκεκριμένα, η διεθνής επιτροπή για την προστασία από τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP) έχει θέσει τα όρια έκθεσης απροστάτευτων ματιών και επιδερμίδας σε ασύμφωνη ακτινοβολία μεταξύ 100 και 400 nm [142]. Έχοντας θέσει ως μήκος κύματος αναφοράς τα 270 nm από μία μονοχρωματική πηγή, για το οποίο έχει βρεθεί η μέγιστη ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού για το εύρος μεταξύ 200 και 305 nm, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο έκθεσης του ανθρώπινου ματιού και της επιδερμίδας εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και η τιμή του είναι 30 J/m^2 ή όμοια 3 mJ/cm^2 για να είναι προσαρμοσμένο σε πιο μικρές επιφάνειες. Για τα υπόλοιπα μήκη κύματος μεταξύ 100 και 400 nm τα (ανώτατα) όρια έκθεσης (Exposure Limits – ELs) φαίνονται στο Σχήμα 3.6(α). Αυτές οι τιμές έχουν προκύψει διαιρώντας την τιμή της μέγιστης έκθεσης για τα 270 nm με τους παράγοντες φασματικού βάρους (Spectral Weighting Factors – SWFs) που εικονίζονται στο Σχήμα 3.6(β) για τα αντίστοιχα μήκη κύματος. Οι παράγοντες φασματικού βάρους εξαρτώνται από το μήκος κύματος, δεν έχουν διαστάσεις και ο παράγοντας για μήκος κύματος 270 nm έχει τιμή ίση με 1. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της ICNIRP

[142], για όλη την περιοχή μεταξύ 180 και 400 nm γίνεται αναγωγή στα 270 nm. Αυτό σημαίνει ότι για καθένα μήκος κύματος προκύπτει ένα ισοδύναμο (effective) όριο από τον πολλαπλασιασμό του ορίου έκθεσης με τον αντίστοιχο παράγοντα φασματικού βάρους και επομένως, ισοδύναμα σε όλη την περιοχή το όριο έκθεσης για απροστάτευτα μάτια και επιδερμίδα είναι 3 mJ/cm^2 .

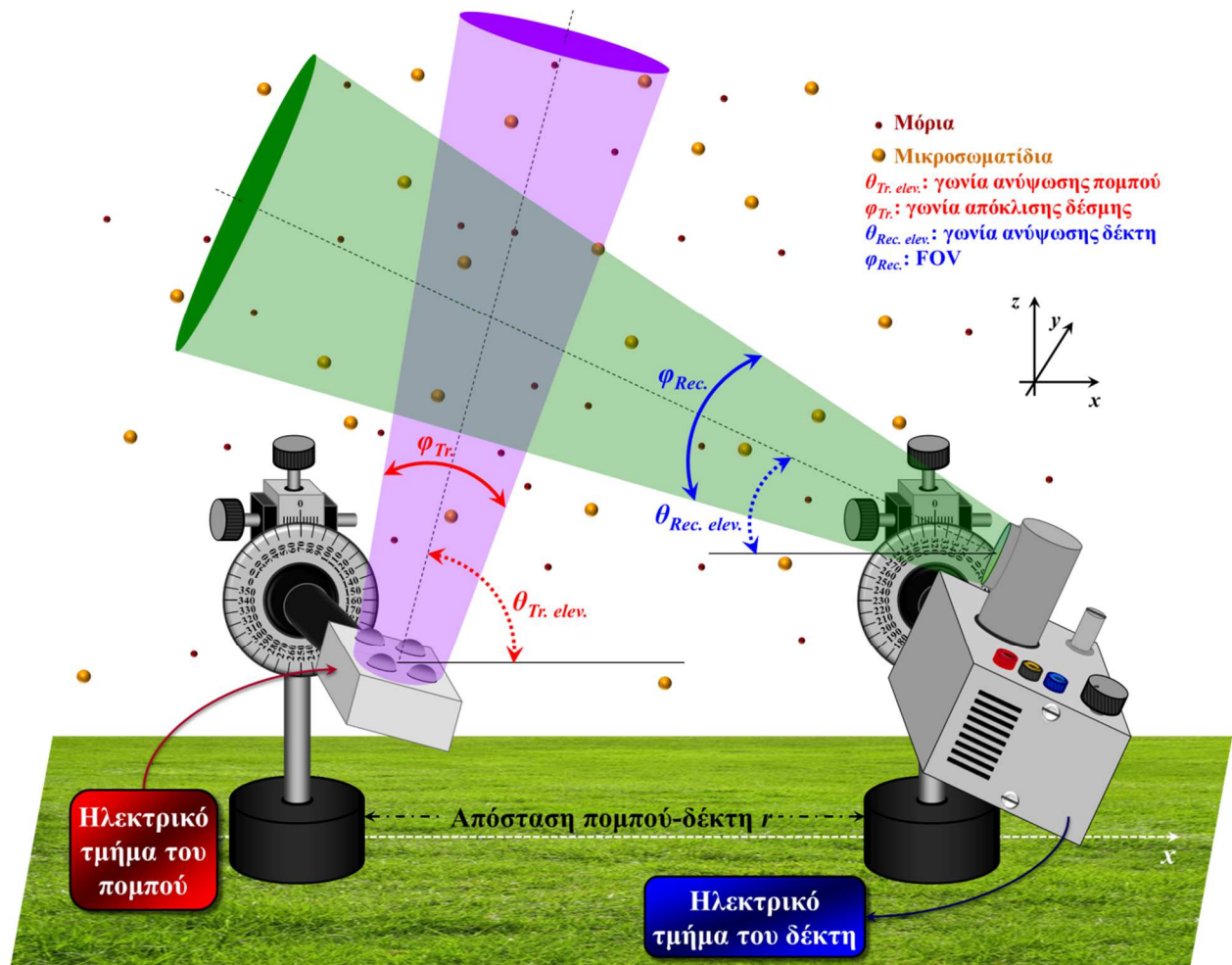


Σχήμα 3.6. (α) Ανώτατα όρια έκθεσης και (β) αντίστοιχοι συντελεστές φασματικού βάρους συναρτήσει του μήκους κύματος για ασύμφωνη ακτινοβολία μεταξύ 180 και 400 nm.

Αν είναι γνωστή η φωτεινή ένταση σ αυτό το εύρος μηκών κύματος σε μία επιφάνεια σε mW/cm^2 μπορεί να βρεθεί ο μέγιστος επιτρεπόμενος ημερήσιος χρόνος έκθεσης. Αυτό μπορεί να αξιολογηθεί με ένα παράδειγμα. Έστω μία ασύμφωνη μονοχρωματική πηγή που εκπέμπει 265 nm. Έστω ότι από αυτή την πηγή ένα επίπεδο φωτεινής έντασης ίσο με 1 mW/cm^2 μετράται σε μία επιφάνεια 1 cm^2 μετά από κάθετη πρόσπτωση σε αυτή. Με βάση το Σχήμα 3.6(β), ο παράγοντας φασματικής βαρύτητας είναι πολύ κοντά στην τιμή 0.8. Τότε, η ισοδύναμη φωτεινή ένταση μετά από πολλαπλασιασμό με το βάρος θα είναι 0.8 mW/cm^2 . Ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος έκθεσης σε αυτή την ακτινοβολία θα προκύψει από τη διαίρεση της μέγιστης επιτρεπόμενης έκθεσης (για τη μονοχρωματική πηγή των 270 nm) με την ισοδύναμη φωτεινή ένταση που υπολογίστηκε, δηλαδή ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος έκθεσης θα είναι $3 \text{ mJ/cm}^2 / (0.8 \text{ mW/cm}^2) = 3.75 \text{ s}$. Προφανώς, αν η πηγή δεν είναι μονοχρωματική, θα προκύπτει μία αντίστοιχη ισοδύναμη φωτεινή ένταση που θα είναι αποτέλεσμα των φωτεινών εντάσεων των φασματικών συνιστωσών που συνθέτουν την μετρούμενη ακτινοβολία. Σύμφωνα με το απλό παράδειγμα που μόλις αναφέρθηκε, η (ημερήσια) έκθεση μίας επιφάνειας 1 cm^2 , πχ επιδερμίδα ή μάτι, σε ακτινοβολία στα 265 nm για το συγκεκριμένο επίπεδο φωτεινής έντασης είναι 3.75 s. Ωστόσο, πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι αναφέροντας διάχυτες μεταδόσεις σαν αυτές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία εννοείται ότι η ασύμφωνη ακτινοβολία δεν εκπέμπεται συγκεντρωμένη προς κάποια κατεύθυνση, ενώ η δέσμη εκπέμπεται εντός μίας γωνίας που είναι η γωνία απόκλισης (divergence angle) της δέσμης. Ταυτόχρονα, με αξιοποίηση των σκεδάσεων για τη λήψη σημάτων, οι απώλειες αυξάνονται σημαντικά και όπως θα φανεί μπορεί να ξεπεράσουν και τα 90 dB για λίγες δεκάδες μέτρα. Αν στο ίδιος παράδειγμα, το επίπεδο 1 mW/cm^2 υποβαθμιστεί κατά 10^{-6} , τότε ο χρόνος έκθεσης αυξάνεται σε αρκετές δεκάδες ώρες. Άρα, λαμβάνοντας κάποια απλά προληπτικά μέτρα, όπως η χρήση προστατευτικών γυαλιών, οι κίνδυνοι μειώνονται σημαντικά από τη χρήση μηκών κύματος στη μπάντα μεταξύ 200 και 280 nm.

Έχοντας θέσει τις απαιτήσεις για τις μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή και έχοντας εξασφαλίσει ότι η μπάντα μεταξύ 200 nm και 280 nm τις καλύπτει, θα ακολουθήσει μία

σύντομη παρουσίαση της δομής των ζεύξεων που θα εξεταστούν. Πιο συγκεκριμένα, στο θεωρητικό τμήμα της μελέτης εξετάστηκαν τόσο ζεύξεις σημείου προς σημείο (point-to-point – ptp) όσο και περιπτώσεις δικτύων από μικρές ομάδες κόμβων (clusters) θεωρώντας μεταδόσεις στην εν λόγω μπάντα. Στο τμήμα της πειραματικής μελέτης, εξετάστηκαν αποκλειστικά ζεύξεις σημείου προς σημείο.



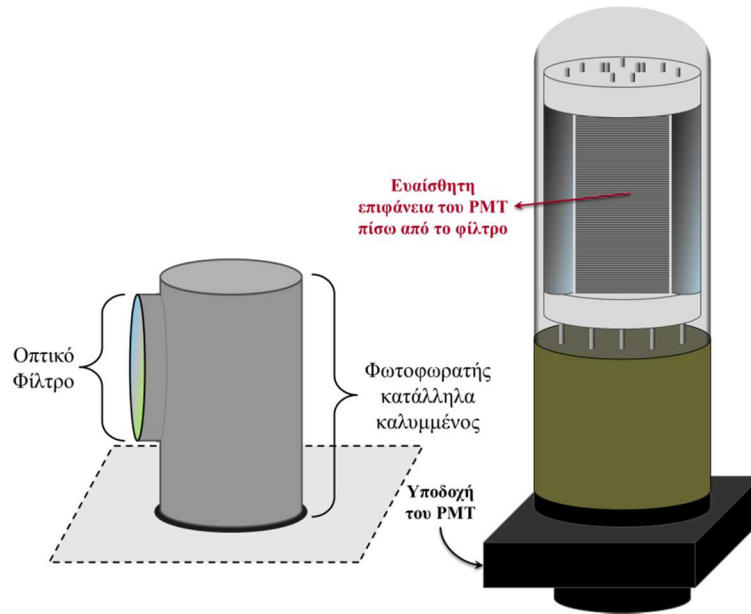
Σχήμα 3.7. Γενική εικόνα της τοπολογίας μίας ζεύξης σημείου προς σημείο. Ο άξονας της δέσμης του πομπού και ο άξονας της γωνίας θέασης του δέκτη βρίσκονται στο επίπεδο xz.

Μένοντας στο θεωρητικό κομμάτι, στις ζεύξεις σημείου προς σημείο οι σημαντικότερες μονάδες που απάρτιζαν το σύστημα ήταν ο οπτικός πομπός, το ασύρματο οπτικό κανάλι και ο οπτικός δέκτης. Χαρακτηριστικό είναι το Σχήμα 3.7. Όσον αφορά τον οπτικό πομπό, αυτός αποτελούνταν από το ηλεκτρικό και το οπτικό του τμήμα. Το ηλεκτρικό κομμάτι αφορούσε τη γέννηση των ηλεκτρικών σημάτων ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που εφαρμόστηκε για τη μετάδοση πληροφορίας. Το οπτικό κομμάτι αφορά τις οπτικές πηγές οι οποίες διαμορφώνονται άμεσα με το εκάστοτε ηλεκτρικό σήμα. Οι πηγές που θεωρήθηκαν εξέπεμπαν ασύμφωνη ακτινοβολία με χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά που έχουν οι φωτοεκπέμπουσες διοδοί (LEDs). Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε δοκιμάστηκαν διάφορες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, $\theta_{Tr. elev.}$ και $\theta_{Rec. elev.}$, αντίστοιχα, όπως δίνεται και στο Σχήμα 3.7. Το ασύρματο οπτικό μέσο περιλαμβάνει τον ελεύθερο χώρο. Φυσικά, ο ελεύθερος χώρος αποτελείται από τα μόρια που σχηματίζουν την κατώτερη ατμόσφαιρα και από τα αιωρούμενα μικροσωματίδια. Αυτά αποτελούν τα κέντρα σκέδασης ώστε να υλοποιηθεί η ζεύξη χωρίς οπτική επαφή. Επιπλέον, δεδομένου ότι έχει τεθεί και η ανάγκη λειτουργίας των ζεύξεων υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες, εκτός από τις τυπικές περιπτώσεις σύστασης της ατμόσφαιρας εξετάστηκε και η περίπτωση όπου μαζί με τα μόρια της

ατμόσφαιρας και τα μικροσωματίδια υπήρχε και ομίχλη μέσω της πρόσθετης ενσωμάτωσης σταγονιδίων νερού με συγκεκριμένες πυκνότητες. Αυτό σημαίνει ότι οι περιπτώσεις ασύρματος μέσου που εξετάστηκαν θεωρητικά ήταν είτε αραιό με βάση την τυπική σύστασή του είτε περιπτώσεις πιο πυκνού. Βέβαια, σε μία πιο απλοποιημένη αρχική εκδοχή, η περιγραφή του πόσο πυκνό ή αραιό ήταν το μέσο έγινε με την απευθείας χρήση των κατάλληλων συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης. Όσον αφορά τον οπτικό δέκτη, αυτός θεωρήθηκε ότι αποτελείται από το οπτικό φίλτρο ακολουθούμενο από τη μονάδα του φωτοφωρατή που θα μετατρέψει τα αφικνούμενα φωτόνια σε ηλεκτρόνια και κατ' επέκταση σε ρεύμα. Η μονάδα του φωτοφωρατή ονομάζεται φωτοπολλαπλασιαστής (Photo-Multiplier Tube – PMT) και τα χαρακτηριστικά του είναι ιδανικά για τη φώραση σημάτων πολύ χαμηλής ισχύος. Ο φωτοφωρατής ακολουθείται από το ηλεκτρικό τμήμα του δέκτη που περιλαμβάνει την ηλεκτρική ενίσχυση και την αποδιαμόρφωση της πληροφορίας ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που έχει θεωρηθεί. Ήδη αναφέρθηκε ότι σε κάποια σενάρια εξετάστηκε η επίδραση της γωνίας ανύψωσης του δέκτη. Επιπλέον, τέθηκε το ζήτημα της επίδρασης της γωνίας θέασης του δέκτη ($\varphi_{Rec.}$ – FOV), αλλά ελέγχοντας περιορισμένο εύρος τιμών.

Μένοντας προσωρινά στο κομμάτι του φωτοφωρατή, η βασική ιδιότητα των φωτοπολλαπλασιαστών είναι το ενδογενές κέρδος που αποδίδουν με το οποίο είναι δυνατό να αξιοποιηθούν λαμβανόμενα σήματα των οποίων η κβαντική φύση έχει γίνει έκδηλη λόγω των υψηλών απωλειών. Επιπλέον, με το υψηλό κέρδος της διάταξης και τα χαμηλά ρεύματα σκότους γίνεται δυνατή η υπερκέρωση του θερμικού θορύβου με την επικράτηση του θορύβου βολής. Κατασκευαστικά, ένας PMT είναι ένας σωλήνας κενού που αποτελείται από ένα παράθυρο εισόδου, μία φωτοκάθοδο, πιθανά ηλεκτρόδια που θα επιτρέψουν την καλύτερη εστίαση της ροής των παραγόμενων φωτο-ηλεκτρονίων που θα εμφανιστούν, ένα πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων και μία άνοδο [143]. Το τμήμα του πολλαπλασιασμού γίνεται σε στάδια, καθώς κατά το πέρασμα από διαδοχικές δυνόδους (dynodes) για καθένα ηλεκτρόνιο παράγονται πολλαπλάσια ηλεκτρόνια. Ανάλογα με την μπάντα μηκών κύματος εντός της οποίας είναι τα λαμβανόμενα σήματα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και το κατάλληλο υλικό κατασκευής φωτοκαθόδου. Η βασική λογική είναι η εξής: το φως εισέρχεται από το παράθυρο εισόδου του PMT, κάποια από τα φωτόνια θα διεγείρουν ηλεκτρόνια στην φωτοκάθοδο και κάποια θα απορροφηθούν, τα φωτο-ηλεκτρόνια επιταχύνονται και εστιάζονται από το/α ηλεκτρόδιο/α που βρίσκονται κοντά στην πρώτη δύνοδο, πολλαπλασιάζονται με την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων και αυτή η δευτερογενής εκπομπή επαναλαμβάνεται σε καθεμία δύνοδο. Μετά την τελευταία δύνοδο, τα δευτερογενή ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο. Η άνοδος είναι ένα ηλεκτρόδιο που συλλέγει τα δευτερογενή ηλεκτρόνια και περνά το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Στο Σχήμα 3.7 είχε παρουσιαστεί μία τυπική ζεύξη μαζί με όλες τις υπομονάδες που θα θεωρηθούν θεωρητικά και θα χρησιμοποιηθούν πειραματικά. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται απομονωμένο το τμήμα του PMT κατάλληλα καλυμμένο και με ενσωματωμένο το οπτικό φίλτρο, ενώ δίπλα ακριβώς δίνεται το σχήμα ενός PMT που βρίσκεται κάτω από το κάλυμμα. Σε αυτό το σχήμα, ο PMT προσεγγίζει την πραγματικότητα. Πρόκειται για PMT με πλευρική λήψη φωτονίων (side-on PMT) που όπως υποδηλώνει και το όνομά του, η επιφάνεια της φωτοκαθόδου στην οποία θα προσπέσουν τα φωτόνια ώστε στο εσωτερικό της διάταξης να εμφανιστούν φωτοηλεκτρόνια είναι πλάγια στη διάταξη. Στη βάση του PMT φαίνεται και η υποδοχή πάνω στην οποία τοποθετείται ο PMT. Σε ένα πραγματικό σύστημα, αυτή η υποδοχή περιλαμβάνει το κατάλληλο δίκτυωμα ώστε να είναι εύκολη η τροφοδότηση της καθόδου, όλων των δυνόδων και της ανόδου απευθείας και όχι καθεμίας ξεχωριστά. Η τροφοδότηση του PMT γίνεται με άλλη διάταξη η οποία ενώνεται με τους ακροδέκτες της υποδοχής. Επιπλέον, υπάρχουν και PMTs με λήψη από πάνω (head-on PMTs), όπου η φωτοκάθοδος βρίσκεται στην οροφή του

σωλήνα του PMT. Εδώ σημειώνεται ότι το Σχήμα 3.8 η ευαίσθητη επιφάνεια του PMT αφορά τη φωτοκάθοδο και στους PMTs με πλευρική λήψη φωτονίων συνήθως βρίσκεται πίσω από ένα πλέγμα [143], του οποίου η λειτουργία θα αναφερθεί πιο κάτω.

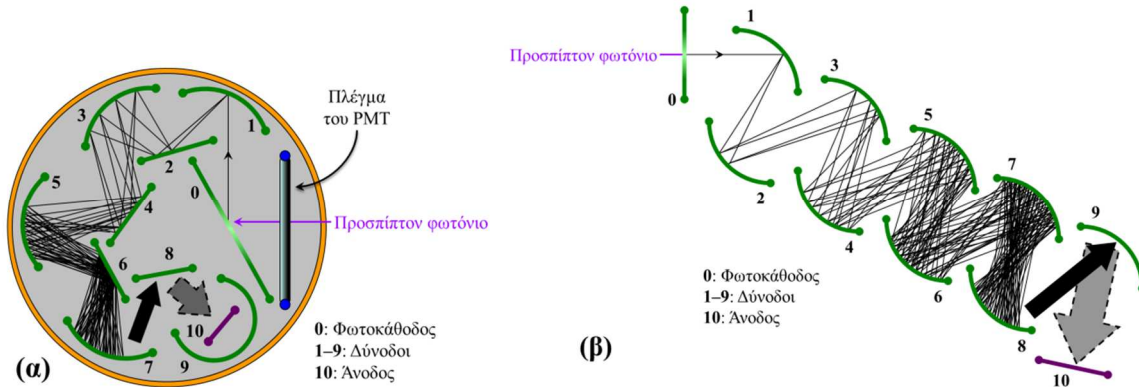


Σχήμα 3.8. Καλυμμένος PMT μαζί με οπτικό φίλτρο και PMT ακάλυπτος τοποθετημένος στην κατάλληλη υποδοχή.

Οι φωτοκάθοδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη διαδικασία εκπομπής φωτο-ηλεκτρονίων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν οι φωτοκάθοδοι τύπου ανάκλασης (reflection mode) και τύπου μετάδοσης (transmission mode). Μία φωτοκάθοδος με ανάκλαση συνήθως κατασκευάζεται πάνω σε μεταλλική επιφάνεια και τα φωτο-ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την ίδια πλευρά στην οποία προσπίπτουν τα φωτόνια που εισήλθαν στον PMT. Αναφέρεται και σαν αδιαφανής (opaque) φωτοκάθοδος. Οι φωτοκάθοδοι με ανάκλαση χρησιμοποιούνται κυρίως σε PMTs με πλευρική λήψη φωτονίων και αποτελεί φθηνή υλοποίηση κατάλληλη για εφαρμογές όπως η φασματοσκοπία όπου απαιτείται ευαισθησία χωρίς την ανάγκη για μεγάλη επιφάνεια της φωτοκάθοδου. Οι PMTs με πλευρική λήψη φωτονίων έχουν τις δυνόδους διευθετημένες σε μορφή κυκλικού κελιού (circular cage dynode type). Πλεονέκτημα αυτής της δομής είναι η συμπαγής μορφή και οι γρήγοροι χρόνοι απόκρισης. Κάτοψη ενός τυπικού PMT με πλευρική λήψη φωτονίων και φωτοκάθοδο με ανάκλαση φαίνεται στο Σχήμα 3.9(α). Σε αυτό το σχήμα, από ένα προσπίπτον φωτόνιο θα προκύψουν πολλαπλάσια αυτού μετά τις προσπτώσεις πάνω τις διαδοχικές δυνόδους. Το πλέγμα στην είσοδο του PMT, το οποίο αναφέρθηκε νωρίτερα, χρησιμοποιείται για την «καθοδήγηση» των ηλεκτρονίων που παράγονται στη φωτοκάθοδο προς τη δύνοδο 1 και όχι σε κάποια άλλη δύνοδο. Η «καθοδήγηση» γίνεται μέσω κατάλληλου ηλεκτρικού πεδίου και με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η αποδοτικότητα της «συλλογής» ηλεκτρονίων από την πρώτη δύνοδο που αποτελεί και το πρώτο στάδιο ενίσχυσης στην αλυσίδα των δυνόδων χωρίς να φεύγουν φωτοηλεκτρόνια από την φωτοκάθοδο και να οδηγούνται στην τελευταία δύνοδο αυξάνοντας τις απώλειες για ένα επιθυμητό λαμβανόμενο οπτικό σήμα. Σε αυτό το πολύ απλό παράδειγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9(α) από κάθε ένα ηλεκτρόνιο που θα προσπέσει σε μία δύνοδο, θα προκύψουν δύο δευτερογενή ηλεκτρόνια. Στις τελευταίες δύο δυνόδους (8 και 9), τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση των ηλεκτρονίων και το πάχος τους το πλήθος αυτών που θα προκύψουν αποδίδοντας τα ενισχυτικά στάδια της αλυσίδας.

Από την άλλη, μία φωτοκάθοδος με μετάδοση είναι ημιδιαφανής, συνήθως εναποτίθεται πάνω σε κατάλληλη διαφανή επιφάνεια και τα φωτο-ηλεκτρόνια εκπέμπονται στην ίδια

κατεύθυνση με αυτή που προσπίπτουν τα φωτόνια. Φωτοκάθοδοι με μετάδοση χρησιμοποιούνται κυρίως σε PMTs με λήψη από πάνω. Ένα παράδειγμα του τμήματος του PMT που με προσεκτική κατασκευή θα μπορούσε να αποτελεί τμήμα ενός PMT με λήψη από πάνω δίνεται στο Σχήμα 3.9(β). Όμοια με πριν, στις τελευταίες δύο δυνόδους (8 και 9) τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση των ηλεκτρονίων και το πάχος τους το πλήθος αυτών που θα προκύψουν. Το Σχήμα 3.9(α) και το Σχήμα 3.9(β) απεικονίζουν απλά την αρχή λειτουργίας, καθώς για καθένα ηλεκτρόνιο που θα προσπέσει πάνω σε μία δύνοδο είναι δυνατό να προκύψουν περισσότερα από δύο δευτερογενή ηλεκτρόνια ανάλογα με το κέρδος που προσφέρει ο PMT, ενώ η ακριβής κίνηση των δευτερογενών ηλεκτρονίων από δύνοδο σε δύνοδο εξαρτάται από τα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται μέσα στον PMT.



Σχήμα 3.9. PMT (α) με πλευρική λήψη φωτονίων, φωτοκάθοδο με ανάκλαση και δυνόδους διευθετημένες σε μορφή κυκλικού κελιού, (β) με φωτοκάθοδο με μετάδοση.

Μειονέκτημα των PMTs είναι το σχετικά περιορισμένο ηλεκτρικό εύρος ζώνης που υποστηρίζουν, καθώς οι χρόνοι ανόδου και καθόδου στην άνοδο είναι της τάξης των λίγων ns, ενώ ο χρόνος μετάβασης της τάξης των λίγων δεκάδων ns. Ο χρόνος ανόδου παλμού (pulse rise time) στην άνοδο είναι ο χρόνος που απαιτείται για τον παλμό εξόδου να ανέβει από το 10% στο 90% της τιμής κορυφής όταν όλη η φωτοκάθοδος «φωτίζεται» από ένα παλμό με μορφή συνάρτησης δέλτα. Το αντίστροφο αφορά το χρόνο καθόδου. Ο χρόνος μετάβασης (transit time) ηλεκτρονίου είναι το διάστημα μεταξύ της άφιξης του παλμού με μορφή συνάρτησης δέλτα στο παράθυρο εισόδου του PMT και του χρόνου κατά τον οποίο η έξοδος της ανόδου φθάνει την τιμή κορυφής για το συγκεκριμένο παλμό. Ο χρόνος μετάβασης περιλαμβάνει το χρόνο ανόδου. Με την αύξηση της παρεχόμενης τάσης στον PMT, ο χρόνος μετάβασης πέφτει και γενικότερα οι χρόνοι απόκρισης βελτιώνονται. Επιπλέον, ο χρόνος μετάβασης δεν είναι σταθερός, αλλά παρουσιάζει μία διακύμανση η οποία μειώνεται με την αύξηση του πλήθους των φωτο-ηλεκτρονίων ανά παλμό. Οι τιμές των χρόνων που αναφέρθηκαν αποδίδουν ως εύρος ζώνης του PMT κάποια MHz, τιμή η οποία με όρους τηλεπικοινωνιών είναι μικρή. Ωστόσο, οι υψηλές απώλειες από την έλλειψη οπτικής επαφής επιβάλλουν τη μετάδοση σημάτων σε πολύ χαμηλότερους ρυθμούς και ρυθμοί της τάξης των kilobits/s αρκούν για την κάλυψη αποστάσεων λίγων δεκάδων μέτρων και με σχετικά χαμηλά επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος. Περισσότερα στοιχεία για τους PMTs μπορούν να βρεθούν στην [143].

Εκτός από την θεωρητική εξέταση των επιδόσεων ζεύξεων σημείου προς σημείο, τέθηκε και το ζήτημα του ελέγχου των επιπέδων παρεμβολών και των απαιτήσεων ισχύος εκπομπής σε σενάρια όπου κάποιος κόμβος με τα χαρακτηριστικά εκπομπής που έχουν ήδη δοθεί, στέλνει πληροφορία σε ένα κεντρικό κόμβο. Επομένως, εξετάστηκε η συνύπαρξη του επιθυμητού κόμβου με ένα μικρό πλήθος κόμβων μέσα σε ένα δίκτυο με κατάλληλο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης στο ασύρματο μέσο, ώστε να μετριάζεται όσο είναι εφικτό το επίπεδο των παρεμβολών.

Όσον αφορά την πειραματική μελέτη, οι αλλαγές δεν ήταν σημαντικές ως προς τις μονάδες και ως προς τη γενικότερη διευθέτηση του συστήματος που ακολουθήθηκαν στην αντίστοιχη θεωρητική μελέτη, οπότε σε γενικές γραμμές η απεικόνιση που δίνεται στο Σχήμα 3.7 εξακολουθεί να ισχύει. Σχετικά με το τμήμα του πομπού, το ηλεκτρονικό τους μέρος αποτελούνταν από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο «χτίζονταν» τα σήματα που μεταδόθηκαν ασύρματα. Το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο συνδυασμός Simulink με Matlab. Οι διαφοροποιήσεις σε σχέση με όσα χρησιμοποιήθηκαν στα θεωρητικά μοντέλα ήταν η ενσωμάτωση της πλήρους διαδικασίας σύνθεσης του εκάστοτε σήματος και η σύνθεση του κατάλληλου σήματος για την πρόσθετη μέτρηση των απωλειών. Σαφέστερα, οι πειραματικές μετρήσεις βασίστηκαν σε δύο άξονες. Από τη μία, χτίστηκε και μεταδόθηκε κατάλληλο ημιτονικό σήμα ώστε να εκτιμηθούν οι απώλειες του ασύρματου μέσου. Από την άλλη, γεννήθηκαν και μεταδόθηκαν σήματα κατάλληλων σχημάτων διαμόρφωσης για την εκτίμηση των επιδόσεων του συστήματος. Επομένως, στην πλευρά του πομπού, στο περιβάλλον Matlab-Simulink, αναπτύχθηκε το κατάλληλο λογισμικό ώστε να παράγονται ηλεκτρικά σήματα κατάλληλα για την εκτίμηση των απωλειών, αλλά και ηλεκτρικά σήματα υπό κατάλληλη διαμόρφωση ώστε να μεταδοθούν και να εκτιμηθούν οι επιδόσεις τους και του συστήματος γενικότερα. Τα ηλεκτρικά σήματα έπειτα περνούσαν στις οπτικές πηγές ώστε να διαδοθεί το εκάστοτε σήμα στο ασύρματο μέσο μετά την άμεση διαμόρφωση του εκάστοτε οπτικού φέροντος. Οι οπτικές πηγές LEDs που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ονομαστική τιμή μήκους κύματος εκπομπής στα 265 nm. Οι εκδοχές του ασύρματου μέσου που εξετάστηκαν ήταν αυτό της καθαρής ατμόσφαιρας και του πυκνού μέσου λόγω εμφάνισης τεχνητής ομίχλης. Εδώ τονίζεται ότι η τεχνητή ομίχλη παρήχθη μέσω της χρήσης κατάλληλης μηχανής παραγωγής ομίχλης. Με αυτό τον τρόπο εκτιμήθηκε πειραματικά η επίδραση της πυκνότητας του ασύρματου μέσου τόσο στις απώλειες όσο και στις επιδόσεις των σχημάτων διαμόρφωσης. Στην πλευρά του δέκτη, στο οπτικό του τμήμα, χρησιμοποιήθηκαν ένα οπτικό φίλτρο και ένας PMT, οι οποίες είναι εμπορικά διαθέσιμες μονάδες. Μετά τη λήψη των οπτικών σημάτων και τη μετατροπή τους στο ηλεκτρικό επίπεδο, ακολούθησε η ηλεκτρική ενίσχυση. Τα σήματα έπειτα περνούσαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και ακολούθησε η κατάλληλη επεξεργασία. Το ένα τμήμα της μελέτης περιλάμβανε την εκτίμηση των απωλειών του ασύρματου μέσου και το δεύτερο (ανεξάρτητο πρώτου) την επεξεργασία και την εκτίμηση των επιδόσεων των σημάτων που είχαν προηγουμένως διαδοθεί. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διάφορα σετ γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη με ταυτόχρονο στόχο την διατήρηση του άξονα της οπτικής δέσμης από τις LEDs και του άξονα από το κέντρο του δέκτη στο ίδιο επίπεδο, πχ στο επίπεδο xz στο Σχήμα 3.7, δημιουργώντας ομοεπίπεδες γεωμετρίες (co-planar geometries).

Η θεωρητική και πειραματική αντιμετώπιση έδωσαν μία εικόνα των επιδόσεων και των απαιτήσεων των συστημάτων που βασίζονται σε μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή. Αυτή η εικόνα καθιστά δυνατή τη δόμηση ζεύξεων επικοινωνίας υπό διαφορετικές χωρικές διευθετήσεις του πομπού ή/και του δέκτη. Σε αυτό το σημείο κλείνει η εισαγωγική περιγραφή των θεμάτων που εξετάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις ασύρματες μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή για την κάλυψη μικρών αποστάσεων. Η περαιτέρω ανάλυση αναβάλλεται ώστε να δοθεί λεπτομερής απεικόνιση των ζεύξεων και του ασύρματου μέσου σε επόμενες παραγράφους. Στο αυτό κεφάλαιο περιγράφονται τα τμήματα των δύο μεγάλων αξόνων που μόλις αναλύθηκαν, του θεωρητικού και του πειραματικού σκέλους. Το θεωρητικό σκέλος περιλαμβάνει την περιγραφή του μοντέλου του καναλιού καθώς και του μοντέλου του οπτικού δέκτη. Αυτή η περιγραφή ακολουθείται από τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Αντίστοιχα, στο πειραματικό σκέλος, μετά την περιγραφή της εκάστοτε τοπολογίας, ακολουθεί η απεικόνιση των μετρήσεων των απωλειών και των επιδόσεων των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Το παρόν

κεφάλαιο κλείνει με κάποια συμπεράσματα που αφορούν τις μεταδόσεις με διάχυτο τρόπο σε μικρές αποστάσεις.

3.2 Θεωρητική περιγραφή του καναλιού διάδοσης και του συστήματος μεταδόσεων

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, δίνονται λίγα βοηθητικά στοιχεία που αφορούν τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, όπως η σύστασή της, η σκέδαση και απορρόφηση αυτής και πώς αυτά τα χαρακτηριστικά θα αξιοποιηθούν στα μοντέλα εκτίμησης των ιδιοτήτων του ασύρματου καναλιού στην εκάστοτε υπό εξέταση ζεύξη. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η διάδοση των φωτονίων σε μία ζεύξη βασίζεται στην σκέδαση και στην απορρόφηση, από τη σχετική θεωρία προέκυψαν τα αντίστοιχα μοντέλα του ασύρματου καναλιού. Από τα μοντέλα αυτά γίνεται δυνατή η εκτίμηση της κρουστικής απόκρισης και των απωλειών του καναλιού. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις αυξημένες απώλειες λόγω της έλλειψης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη και την αδυναμία χρήσης κάποιας ενισχυτικής μονάδας ενδιάμεσα, ο τύπος του φωτοφωρατή που θεωρήθηκε και χρησιμοποιήθηκε έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενδογενούς κέρδους που μπορούν να αξιοποιηθούν ώστε να ανακτηθεί το σήμα παρά την υποβάθμισή του από το κανάλι και την προσθήκη του θορύβου στον ίδιο το δέκτη σε ηλεκτρικό επίπεδο μετά τη φώραση. Το θεωρητικό μοντέλο του δέκτη με την ενσωμάτωση όλων των συνιστωσών θορύβου θα παρουσιαστεί σε ξεχωριστή ενότητα, όπου θα φανεί η επίδραση όλων των συνιστωσών θορύβου στο εκάστοτε σήμα για τα διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης που θεωρήθηκαν. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα όσον αφορά τις εκτιμήσεις των απωλειών και των κρουστικών αποκρίσεων για διάφορες περιπτώσεις πυκνότητας του ασύρματου μέσου. Η τελευταία υποενότητα αφορά τα αριθμητικά αποτελέσματα θεωρώντας μεταδόσεις στο ασύρματο κανάλι και λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο του δέκτη με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Με τις επιδόσεις του εκάστοτε συστήματος, καλύπτεται πλήρως η από άκρο σε άκρο θεωρητική περιγραφή του συστήματος.

3.2.1 Ατμόσφαιρα, σκέδαση, απορρόφηση

Όπως είναι γνωστό, η ακριβής σύσταση της ατμόσφαιρας εξαρτάται από τη γεωγραφική περιοχή, την εποχή, την ώρα της ημέρας, το υψόμετρο και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, πχ υγρασία, θερμοκρασία, άνεμοι. Η δυναμική εικόνα ενισχύεται και από την ανθρώπινη δραστηριότητα, πχ αιθάλη σε αστικά κέντρα, παράγωγα αζωτούχων ενώσεων από τη γεωργία αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα σε αγροτικές περιοχές. Όπως έχει ήδη φανεί στην εισαγωγική ενότητα αυτού του κεφαλαίου, τα μόρια και άτομα της ατμόσφαιρας θα αλληλεπιδράσουν με τη μεταδιδόμενη ακτινοβολία, ώστε τελικά να ληφθεί ένα κλάσμα της ισχύος που αρχικά εξέπεμψε ο πομπός. Όσον αφορά τη μοριακή σύνθεση της ατμόσφαιρας, ο Πίνακας 3.1 [134] περιλαμβάνει τυπική σύνθεση αυτής για χειμώνα στις ΗΠΑ σε μηδενικό ύψος που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της θάλασσας, θερμοκρασία -0.95°C και ατμοσφαιρική πίεση 1018 mb, όπου αναφέρονται πυκνότητες των βασικών μορίων.

Όσον αφορά τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, αυτά είναι το αποτέλεσμα φυσικών διαδικασιών και της ανθρώπινης δραστηριότητας. Περιλαμβάνουν σε μεγάλο ποσοστό υδρόφοβες (hygroscopic) ουσίες, ουσίες τύπου σκόνης (dust-like) και οργανικές ουσίες ή αλλά βιομηχανικά παράγωγα (ανάλογα με το περιβάλλον), καθώς επίσης και σταγονίδια νερού και κρυστάλλους πάγου με εύρος μεγεθών ακτίνων (θεωρώντας τα ως σφαίρες) μεταξύ 1 nm και 100 μm [134]. Οι μεταβολές στη συγκέντρωση, στις ιδιότητες της κατανομής του μεγέθους και στο δείκτη διάθλασης των μικροσωματιδίων μπορούν να οδηγήσουν σε μεταβολές των ιδιοτήτων της ατμόσφαιρας σε σχέση με τη σκέδαση και την απορρόφηση. Για παράδειγμα, το γεγονός ότι τα μικροσωματίδια είναι υδρόφιλα,

αλλαγή στην υγρασία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή στα χαρακτηριστικά της κατανομής του μεγέθους των μικροσωματιδίων πχ αλλαγή της μέσης τιμής του μεγέθους τους, στο δείκτη διάθλασής τους, αλλά και στην πυκνότητα των μικροσωματιδίων ανά μονάδα όγκου, μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά σκέδασης και απορρόφησης της ατμόσφαιρας.

Πίνακας 3.1. Πυκνότητα μορίων τυπικής ατμόσφαιρας χειμώνα στις ΗΠΑ στην επιφάνεια της θάλασσας.

Μόριο	Χημικός τύπος	Συγκέντρωση (cm ⁻³)
Άζωτο	N ₂	2.10×10 ¹⁹
Οξυγόνο	O ₂	5.63×10 ¹⁸
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	8.87×10 ¹⁵
Υποξείδιο του αζώτου	N ₂ O	7.28×10 ¹²
Μεθάνιο	CH ₄	4.30×10 ¹³
Μονοξείδιο του άνθρακα	CO	2.03×10 ¹²
Υδρατμοί	H ₂ O	1.17×10 ¹⁷
Όζον	O ₃	6.67×10 ¹¹
Άθροισμα		2.69×10¹⁹

Γενικά, σε μία απλή ζεύξη σημείου προς σημείο με διάχυτη μετάδοση, όπως αυτή στο Σχήμα 3.7, για μήκη κύματος στην περιοχή μεταξύ 200 και 280 nm, η απορρόφηση της UV ακτινοβολίας από μόρια και μικροσωματίδια είναι ένας παράγοντας μείωσης της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, όπως είναι αναμενόμενο. Από την άλλη, η σκέδαση της UV ακτινοβολίας, «δίνει τη δυνατότητα» να «αλλάξουν» κατεύθυνση τα φωτόνια που απαρτίζουν τη δέσμη, θεωρώντας την ακτινοβολία ως ασύμφωνη, και από μία κίνηση με κατεύθυνση στον άξονα αλλά εντός των ορίων της γωνίας απόκλισης της δέσμης τελικά να δίνεται στατιστικά η δυνατότητα κάποια από τα φωτόνια να κατευθυνθούν προς το δέκτη. Η «ποσότητα» του σήματος που θα κατευθυνθεί τελικά προς το δέκτη είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων σκέδασης των μορίων και των μικροσωματιδίων στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας (κυρίως στα κατώτερα 2 km της τροπόσφαιρας [144]). Το «πόσο έντονα» μπορούν τα μόρια και τα μικροσωματίδια να απορροφούν και να σκεδάζουν την ακτινοβολία εκφράζεται από τους συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης. Το άθροισμα των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης για τα μόρια ή τα μικροσωματίδια δίνει το συντελεστή απόσβεσης (extinction coefficient). Συντελεστές σκέδασης, απορρόφησης και απόσβεσης μπορούν να περιγράψουν ολόκληρο το ασύρματο μέσο προσθέτοντας τους αντίστοιχους συντελεστές των μορίων και των μικροσωματιδίων. Συνήθως, για την ατμόσφαιρα, οι συντελεστές αυτοί εκφράζονται σε τιμές 1/km.

Το κλάσμα των φωτονίων του σήματος που θα αλλάξουν κατεύθυνση και θα ανακατευθυνθούν προς το έδαφος φθάνοντας στο δέκτη δεν εξαρτάται μόνο από τους συντελεστές σκέδασης, αλλά και από τις ιδιότητες «γωνιακής διάχυσης» (angular dispersion) [144] του εκάστοτε σκεδαστή είτε είναι μόριο είτε είναι μικροσωματίδιο. Τα μόρια και τα μικροσωματίδια έχουν διαφορετικές ιδιότητες όσον αφορά τη σκέδαση και την απορρόφηση κυρίως λόγω της διαφοράς στο μέγεθός τους. Τα μόρια είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με το μήκος κύματος στην περιοχή μεταξύ 200 και 280 nm και η σκέδασή τους περιγράφεται από τη σκέδαση Rayleigh. Τα μικροσωματίδια έχουν μεγέθη της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος ή λίγο μεγαλύτερα και η σκέδασή τους ακολουθεί τη θεωρία της Mie σκέδασης. Η γωνιακή κατανομή της σκεδαζόμενης

ενέργειας γύρω από ένα σκεδαστή ονομάζεται συνάρτηση φάσης και αποτελεί μία στατιστική περιγραφή της κατεύθυνσης προς την οποία είναι πιθανότερο να ανακατευθυνθούν τα φωτόνια σε σχέση με τον άξονα διάδοσής τους κατά τη στιγμή της αλληλεπίδρασης με κάποιο σκεδαστή. Μετά τη σκέδαση μόνο η κατεύθυνση του φωτονίου αλλάζει. Η συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Rayleigh είναι γνωστή [133] με συγκεκριμένη μορφή. Η συνάρτηση φάσης (μονής σκέδασης) [145] της σκέδασης Mie δεν έχει σταθερή μορφή και εξαρτάται από το μέγεθος, το μήκος κύματος, τις διαστάσεις και το δείκτη διάθλασης του μικροσωματιδίου.

Οι συναρτήσεις φάσης που αφορούν τις σκεδάσεις Rayleigh και Mie περιγράφονται από το γενικευμένο μοντέλο Rayleigh και τη γενίκευση της συνάρτησης της Henyey-Greenstein (HG) [145] ώστε να ενσωματώνεται και η οπισθοσκέδαση [137], αντίστοιχα. Στο εξής η γενίκευση της συνάρτησης της Henyey-Greenstein θα αναφέρεται απλά ως συνάρτηση Henyey-Greenstein. Η επιλογή της συνάρτησης Henyey-Greenstein είναι αρκετά κοντά σε αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες περιγράφοντας ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά των μικροσωματιδίων ως σκεδαστές που αλληλεπιδρούν με φωτόνια σε μήκη κύματος στην UV-C μπάντα μεταξύ 200 και 280 nm. Οι δύο συναρτήσεις φάσης δίνονται από τους ακόλουθους τύπους

$$p_{Ray}(\cos(\theta)) = \frac{3 \times \{1 + 3\gamma + (1 - \gamma) \times [\cos(\theta)]^2\}}{16\pi \times (1 + 2\gamma)}, \quad \gamma = \frac{\rho}{2 - \rho}, \quad (3.1)$$

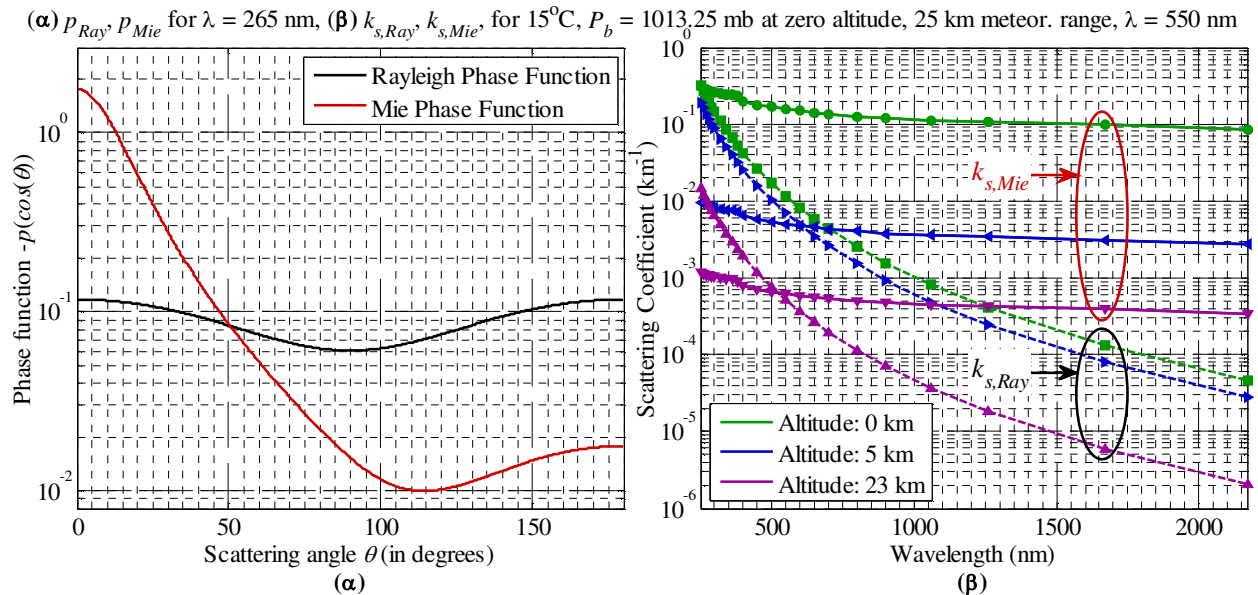
$$p_{Mie}(\cos(\theta)) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \times \left\{ \frac{1}{[1 + g^2 - 2 \times g \times \cos(\theta)]^{3/2}} + f \times \frac{0.5 \times \{3 \times [\cos(\theta)]^2 - 1\}}{(1 + g^2)^{3/2}} \right\}, \quad (3.2)$$

για τη σκέδαση Rayleigh και τη σκέδαση Mie, αντίστοιχα, όπου ρ είναι ο παράγοντας αποπόλωσης (depolarization factor) [133] και είναι συνάρτηση του μήκους κύματος, g είναι ο παράγοντας ασυμμετρίας ο οποίος υποδηλώνει το «πόσο» εμπρόσθια είναι η σκέδαση, καθώς όσο αυξάνεται η τιμή του τόσο περισσότερο «επικρατεί» η εμπρόσθια σκέδαση [134] και παίρνει τιμές μεταξύ -1 και 1 . Όταν $g = -1$, τότε πρόκειται για σκέδαση πλήρως κατευθυνόμενη προς τα πίσω, ενώ για $g = 1$, η σκέδαση είναι πλήρως κατευθυνόμενη προς τα μπρος [146]. Επιπλέον, f είναι μία παράμετρος που χρησιμοποιείται σαν συντελεστής βαρύτητας για το δεύτερο όρο της συνάρτησης φάσης της σκέδασης Mie που προκαλεί μία μικρή κορυφή της συνάρτησης με κατεύθυνση προς τα πίσω [145]. Τονίζεται ότι κατά τη θεωρητική εξέταση και τη μοντελοποίηση των καναλιών που θα ακολουθήσει, η σκέδαση εξετάζεται στατιστικά. Παρατηρώντας προσεκτικά τις (3.1) και (3.2) διαπιστώνουμε ότι πρόκειται για συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ως προς το συνημίτονο της γωνίας σκέδασης ($2\pi \times \int_{-1}^1 p_{Ray}(\mu) d\mu = 1$ και

$2\pi \times \int_{-1}^1 p_{Mie}(\mu) d\mu = 1$, $\mu = \cos(\theta)$, το όριο -1 αντιστοιχεί στο συνημίτονο των 180° , δηλαδή στη σκέδαση προς τα πίσω, και το όριο 1 αντιστοιχεί στο συνημίτονο 0° , δηλαδή στη σκέδαση προς τα μπρος). Επιπλέον, η συνολική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function – PDF) για την τυχαία μεταβλητή του συνημίτονου της γωνίας σκέδασης σε ένα μέσο, όπως η ατμόσφαιρα, είναι η συνάρτηση φάσης που προκύπτει από το σταθμισμένο μέσο των συναρτήσεων φάσης που περιγράφουν τη στατιστική των γωνιών σκέδασης των μορίων και των μικροσωματιδίων που υπάρχουν στο ασύρματο μέσο. Τα βάρη για τη στάθμιση είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie. Επιπλέον, η συνάρτηση φάσης της σκέδασης Rayleigh περιγράφει τη γωνιακή κατανομή των σκεδάσεων των μορίων στο σύνολο

τους. Αντίστοιχα ισχύει για την συνάρτηση φάσης Henyey-Greenstein και τα μικροσωματίδια στο σύνολό τους.

Σχηματικά, οι συναρτήσεις φάσεις για τις σκεδάσεις Rayleigh και Mie φαίνονται στο Σχήμα 3.10(α). Για τη συνάρτηση φάσης της σκέδασης Mie, στην (3.2) για τον παράγοντα ασυμμετρίας χρησιμοποιήθηκε η τιμή $g = 0.72$ και για το συντελεστή $f = 0.5$. Αυτές αποτελούν αντιπροσωπευτικές τιμές για την περιοχή της UV-C μπάντας που εξετάζεται [145]. Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει τη γωνία ως προς την οποία είναι πιθανόν να σκεδαστεί ένα φωτόνιο. Η γωνία 0° εκφράζει την αμιγώς προς τα μπρος και οι 180° την σκέδαση προς τα πίσω. Η κορυφή στη συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie κοντά στο μηδέν του οριζόντιου άξονα εκφράζει το γεγονός ότι η Mie έχει χαρακτηριστικά εντονότερης σκέδασης προς τα μπρος. Αντίθετα, παρατηρώντας τη μορφή της αντίστοιχης συνάρτησης φάσης για τη σκέδαση Rayleigh, αυτή είναι πιο ομοιόμορφη με μικρότερη διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Σε ένα εύρος γωνιών από 0° ως 30° σε σχέση με τον άξονα διάδοσης ενός φωτονίου, φαίνεται να ευνοείται η σκέδαση Mie, ενώ σε ένα εύρος μεταξύ των 70° και 130° , που αποτελεί ένα εύρος γωνιών που επιτρέπει «την αλλαγή κατεύθυνσης» των φωτονίων, φαίνεται να ευνοείται η σκέδαση Rayleigh, καθώς έχει μεγαλύτερη τιμή η αντίστοιχη συνάρτηση φάσης. Ωστόσο, το πόσο ευνοείται η καθεμία περίπτωση σκέδασης έχει να κάνει και με τους αντίστοιχους συντελεστές σκέδασης.



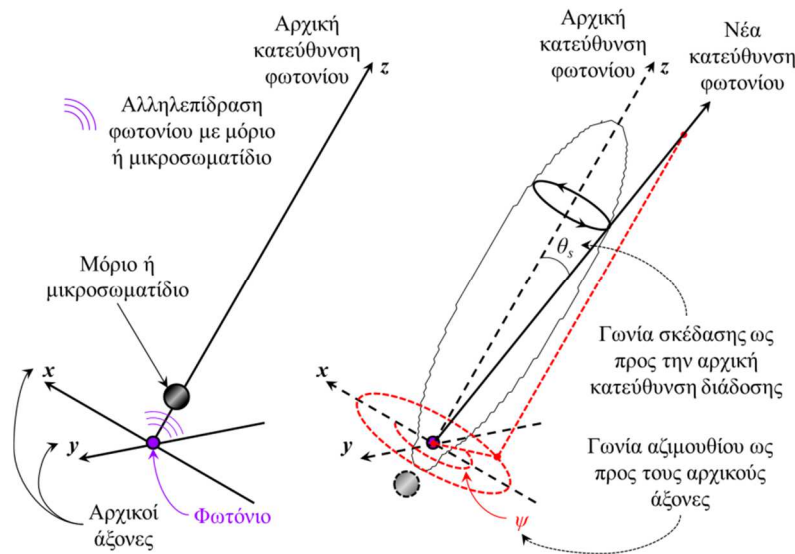
Σχήμα 3.10. (α) Συναρτήσεις φάσεις για τις σκεδάσεις Rayleigh και Mie. Για τη Mie σκέδαση χρησιμοποιήθηκε η γενίκευση της συνάρτησης της Henyey-Greenstein με $g = 0.72$ και $f = 0.5$. (β) Συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie από 250 nm μέχρι 2170 nm στην επιφάνεια της θάλασσας, σε 5 km και σε 23 km από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι τιμές των συντελεστών στη επιφάνεια της θάλασσας έχουν προκύψει για θερμοκρασία 15°C , ατμοσφαιρική πίεση 1013.25 mb και για καθαρή ατμόσφαιρα με ορατότητα 25 km.

Στο Σχήμα 3.10(β), φαίνονται οι συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie σε κανονικές συνθήκες (σε θερμοκρασία 15°C και ατμοσφαιρική πίεση $P_b = 1031.25$ mb), για καθαρή ατμόσφαιρα με ορατότητα 25 km για μηδενικό υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και για υψόμετρα 5 km και 23 km από την επιφάνεια της θάλασσας [135]. Αυτό που φαίνεται καθαρά είναι ότι για μηδενικό υψόμετρο, δηλαδή για τις επίγειες διάχυτες επικοινωνίες, οι συντελεστές σκέδασης (οι δύο καμπύλες πράσινου χρώματος, συνεχής για τη Mie και διακεκομμένη για τη Rayleigh) έχουν τις μεγαλύτερες τιμές τους στο τμήμα της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας. Οι υψηλότεροι συντελεστές θα ευνοήσουν τις πολλαπλές σκεδάσεις και θα επιτρέψουν τη διάχυτη μετάδοση σημάτων χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, επιβεβαιώνοντας όσα αναφέρθηκαν στην

εισαγωγή του κεφαλαίου ότι οι συντελεστές είναι ίδιας τάξης μεγέθους και η συνεισφορά και των δύο είναι που ισχυροποιεί τη δυνατότητες σκέδασης σε αυτή την περιοχή μηκών κύματος. Επομένως, στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα οι συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie συνεισφέρουν παρόμοια στη στάθμιση των συναρτήσεων φάσης. Από την άλλη, για μεγαλύτερες τιμές μηκών κύματος προκύπτει η επικράτηση της σκέδασης Mie, δηλαδή η έντονη επικράτηση της εμπρόσθιας σκέδασης με την τιμή των συντελεστών σκέδασης Mie να είναι ελαφρώς χαμηλότεροι σε σχέση με αυτούς της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας και την τιμή των αντίστοιχων συντελεστών της σκέδασης Rayleigh να μειώνονται και κατά τρεις τάξεις μεγέθους. Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν για την σημαντική μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή μεταξύ 200 και 280 nm, είναι λογική η χρήση της UV-C μπάντας για την εφαρμογή διάχυτων μεταδόσεων. Με την αύξηση του υψομέτρου οι συντελεστές και για τους δύο τύπους σκέδασης μειώνονται σημαντικά λόγω της αραιότερης ατμόσφαιρας. Για τη σκέδαση Mie, με την αύξηση του υψομέτρου στα 5 km (η συνεχής καμπύλη μπλε χρώματος που η κορυφή των τριγώνων δείχνει αριστερά), η μείωση των συντελεστών είναι μεγαλύτερη από μία τάξη μεγέθους, ενώ η αντίστοιχη πτώση για τους συντελεστές Rayleigh (η διακεκομμένη μπλε καμπύλη που η κορυφή των τριγώνων δείχνει δεξιά) είναι πολύ μικρή. Με την αύξηση του υψομέτρου στα 23 km, όπου εμφανίζεται η μέγιστη απορρόφηση της εισερχόμενης στην ατμόσφαιρα ηλιακής ακτινοβολίας λόγω του όζοντος, οι συντελεστές σκέδασης πέφτουν κατά μία ακόμα τάξη μεγέθους (καμπύλες μωβ χρώματος).

Αυτό που ίσως δεν είναι σαφές, είναι πώς θεωρείται ότι γίνεται «η αλλαγή κατεύθυνσης» στον τρισδιάστατο χώρο, ενώ οι (3.1), (3.2) περιγράφουν τη γωνιακή κατανομή της σκεδαζόμενης ενέργειας γύρω από ένα σκεδαστή. Αυτό μπορεί να γίνει πιο ξεκάθαρο, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύστημα κυκλικών συντεταγμένων. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ως z-άξονα τον άξονα διάδοσης του φωτονίου κατά τη στιγμή της αλληλεπίδρασης με κάποιο σκεδαστή, τότε η γωνία σκέδασης που σχηματίζεται ως προς τον άξονα αυτό αποτελεί μία γωνία ζενίθ. Όσον αφορά τη γωνία αζιμούθιου πάνω στο επίπεδο που είναι κάθετο στο z-άξονα (προηγούμενο άξονα διάδοσης), αυτή κατανέμεται στατιστικά ομοιόμορφα σε ένα εύρος γωνιών μεταξύ 0° και 360° . Δηλαδή, στο «τοπικό» σύστημα συντεταγμένων, η σκέδαση και η αλλαγή κατεύθυνσης θα γίνει υπό γωνία ζενίθ που κατανέμεται μεταξύ των γωνιών 0° και 180° , ακολουθώντας τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (3.1) και (3.2), για την περίπτωση που ο σκεδαστής είναι μόριο ή μικροσωματίδιο, αντίστοιχα. Η αλλαγή κατεύθυνσης στο αζιμούθιο μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε γωνία. Επομένως, στο αζιμούθιο έχουμε ομοιόμορφη κατανομή από 0° ως 360° με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $\rho(\psi) = 1/(2 \times \pi)$ με $0^\circ \leq \psi < 360^\circ$. Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται το παράδειγμα της σκέδασης ενός φωτονίου κατά την αλληλεπίδρασή του με ένα μικροσωματίδιο ή μόριο της ατμόσφαιρας. Δεδομένου ότι η σκέδαση εξετάζεται στατιστικά, εδώ δεν έχει σημασία αν πρόκειται για μόριο ή μικροσωματίδιο. Σαφέστερα, από το Σχήμα 3.10(β) για μήκος κύματος 260 nm, οι συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie είναι $k_{s, Ray} = 0.269 \text{ km}^{-1}$, $k_{s, Mie} = 0.284 \text{ km}^{-1}$, αντίστοιχα. Από τις δύο τιμές και από τις (3.1), (3.2), η συνάρτηση φάσης για την περίπτωση καθαρής ατμόσφαιρας και για κανονικές συνθήκες θα προκύψει από τη σχέση $(k_{s, Ray}/(k_{s, Ray} + k_{s, Mie})) \times \rho_{Ray}(\cos(\theta)) + (k_{s, Mie}/(k_{s, Ray} + k_{s, Mie})) \times \rho_{Mie}(\cos(\theta))$. Αυτή θα είναι και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που θα περιγράψει τη σκέδαση σε κάθε σημείο στο χώρο. Στο παράδειγμα φαίνεται ότι τελικά το φωτόνιο σκεδάστηκε ως προς μία γωνία σκέδασης θ_s και ως προς μία γωνία αζιμούθιου ψ σε σχέση με το «τοπικό» σύστημα συντεταγμένων πριν τη σκέδαση. Μετά τη σκέδαση, το φωτόνιο θα έχει ένα νέο (τοπικό) z-άξονα με βάση τη νέα του κατεύθυνση και ένα νέο επίπεδο xy κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσής του. Ο μετασχηματισμός στο νέο σύστημα συντεταγμένων προκύπτει άμεσα από τα διανύσματα κατεύθυνσης του φωτονίου πριν τη σκέδαση και από τις γωνίες σκέδασης ζενίθ και αζιμούθιου, θ_s και ψ ,

αντίστοιχα, μετά τη σκέδαση. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σε πολικές συντεταγμένες), δηλαδή η σταθμισμένη συνάρτηση φάσης ως αποτέλεσμα του γραμμικού συνδυασμού των (3.1), (3.2). Η μηδενική γωνία σκέδασης αντιστοιχεί σε μηδενική γωνία ζενίθ ως προς τον άξονα που διαδιδόταν μέχρι τη στιγμή πριν τη σκέδαση. Φαίνεται ότι είναι πιο πιθανό να σκεδαστεί σε μία κατεύθυνση προς τα μπρος κάτι που δείχνει ότι η σκέδαση Mie έχει μεγαλύτερη επίδραση από τη σκέδαση Rayleigh παρά το ότι οι δύο συντελεστές σκέδασης είναι ίδιας τάξης μεγέθους. Σ' αυτή τη μορφή της συνάρτησης φάσης, φαίνεται ότι σκέδαση προς κάποια πλάγια κατεύθυνση οφείλεται στο ατρακτοειδές σχήμα της συνάρτησης και στατιστικά η μεγαλύτερη επίδραση στις σκεδάσεις προς κάποια κατεύθυνση σε γωνίες ζενίθ μεγαλύτερες από 60° είναι από τη σκέδαση Rayleigh, σύμφωνα και με το Σχήμα 3.10(α).



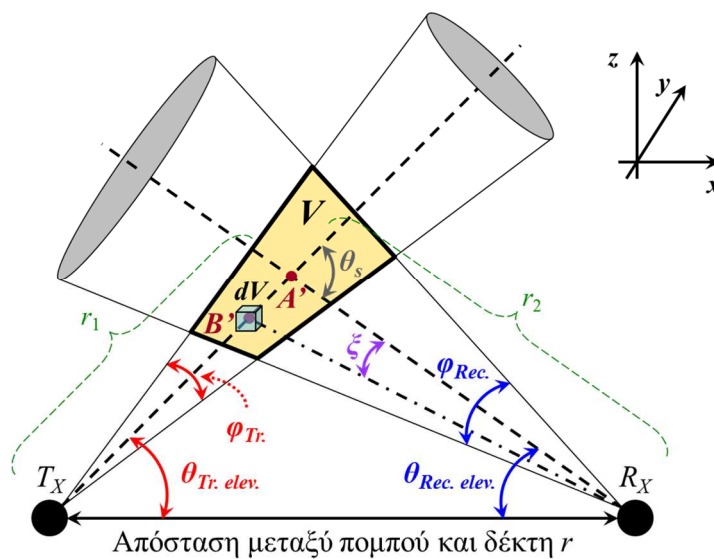
Σχήμα 3.11. Αλληλεπίδραση φωτονίου με μόριο ή μικροσωματίδιο για τις συνθήκες υπό τις οποίες προέκυψαν οι καμπύλες για μηδενικό υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας στο Σχήμα 3.10(β) και για μήκος κύματος 260 nm.

3.2.2 Μοντέλο καναλιού

3.2.2.1 Εφαρμογή μοντέλου μονής σκέδασης

Αναφορικά με τα θεωρητικά μοντέλα περιγραφής του ασύρματου καναλιού, οι δύο βασικές κατηγορίες περιλαμβάνουν τα μοντέλα μονής σκέδασης (single scattering channel models) από τη μία και τα μοντέλα πολλαπλών σκεδάσεων (multiple scattering channel models) από την άλλη. Τα μοντέλα μονής σκέδασης βασίζονται σε μία και μοναδική αλληλεπίδραση κάθε φωτονίου με τα μόρια της ατμόσφαιρας και τα μικροσωματίδια προτού το φωτόνιο φθάσει στο φωρατή. Αυτού του είδους τα μοντέλα είναι απλά και απαιτούν μικρή υπολογιστική ισχύ. Έχει αποδειχτεί ότι τα μοντέλα μονής σκέδασης μπορεί να οδηγήσουν σε ικανοποιητικές εκτιμήσεις των απωλειών του καναλιού στον ελεύθερο χώρο, αλλά υπό συγκεκριμένες συνθήκες, όπως για μικρές αποστάσεις και σχετικά μεγάλες γωνίες ανύψωσης [147], αν και αυτή είναι μία απλοποιημένη παρατήρηση, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη και πρόσθετες παράμετροι, όπως οι θεωρούμενες καιρικές συνθήκες η γωνία απόκλισης του πομπού και η γωνία θέασης του δέκτη κα. Παρόλα αυτά, τροποποιημένα μοντέλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να δώσουν βελτιωμένες εκτιμήσεις για πολύπλοκες γεωμετρίες ζεύξεων [148]. Τα μοντέλα πολλαπλών σκεδάσεων, που όπως υποδηλώνει και το όνομά τους προβλέπουν την πιθανότητα ένα φωτόνιο να υποστεί πλήθος σκεδάσεων και όχι κατ' ανάγκη μόνο μία κατά τη διάδοσή του, όπως τα μοντέλα Monte Carlo [149]

και Monte Carlo Integration [150], δίνουν πιο ακριβείς εκτιμήσεις των κρουστικών αποκρίσεων και των απωλειών του θεωρούμενου καναλιού με κόστος την αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Επιπροσθέτως, υπάρχουν και παραμετρικά μοντέλα που έχουν εφαρμοσθεί τόσο για τις απώλειες [151] όσο και για τις κρουστικές αποκρίσεις [149]. Τέτοια μοντέλα αποτελούν απλές μαθηματικές περιγραφές των καναλιών που έχουν προκύψει μετά από προσαρμογή σε πειρατικές μετρήσεις. Σαφέστερα, πρόκειται για μαθηματικές συναρτήσεις των οποίων κάποιες παράμετροι προσαρμόζονται ώστε είτε οι τιμές των συναρτήσεων αυτών να προσεγγίζουν μετρημένες τιμές απωλειών [151] είτε οι κυματομορφές των συναρτήσεων να προσεγγίζουν μετρημένες ή εκτιμούμενες καμπύλες κρουστικών αποκρίσεων που έχουν κάποια αναμενόμενη μορφή [149]. Τέτοια μοντέλα είναι ιδιαίτερα βολικά για να δώσουν μία άμεση εικόνα των περιορισμών που εισάγει το κανάλι. Ωστόσο, οι παραμετρικές λύσεις προσαρμόζονται σε συγκεκριμένες συνθήκες και περιπτώσεις καναλιών και δε μπορούν να γενικευθούν, πχ για διαφορετικές καιρικές συνθήκες.



Σχήμα 3.12. Απλοποιημένη απεικόνιση της ζεύξης χωρίς οπτική επαφή με έμφαση στην περιγραφή του μοντέλου μονής σκέδασης.

Η πρώτη προσέγγιση που ακολουθήθηκε ήταν αυτή ενός μοντέλου μονής σκέδασης [152]. Μία σχηματική απεικόνιση μίας γενικής τοπολογίας σαν αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3.7 θα διευκολύνει τη σύντομη παρουσίαση του μοντέλου. Ωστόσο, επειδή το επίκεντρο είναι το μοντέλο, η τοπολογία σε απλοποιημένη μορφή είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Οι γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη είναι όπως έχουν δοθεί και στο Σχήμα 3.7, $\theta_{Tr. elev.}$ και $\theta_{Rec. elev.}$, αντίστοιχα. Η γωνία απόκλισης της δέσμης είναι και πάλι $\varphi_{Tr.}$. Όμοια με πριν, το FOV είναι $\varphi_{Rec.}$. Πομπός και δέκτης θεωρούνται ότι είναι σημειακοί. Ο κοινός όγκος μεταξύ της γωνίας απόκλισης της δέσμης και του FOV του δέκτη είναι V . Οι δέσμες παραμένουν ομοεπίπεδες στο επίπεδο xz (co-planar). Οπότε, οι γωνίες αζιμούθιου μπορούν να παραληφθούν από την περιγραφή. Για πεπερασμένο όγκο dV , θεωρώντας ότι η δέσμη είναι ομοιόμορφη ως προς την κατανομή της στο χώρο, τότε το κέρδος του πομπού με στερεά γωνία $\Omega_t = 2\pi \times (1 - \cos(\varphi_{Tr.}/2))$, θα είναι:

$$dG_t = \begin{cases} \frac{1}{\Omega_t} & , \text{ if } dV \in V \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3.3)$$

Το κέρδος του δέκτη είναι

$$dG_r = \cos(\xi \times \pi / \varphi_{Rec.}) \quad (3.4)$$

όπου ξ είναι η γωνία μεταξύ του άξονα του δέκτη ($R_X A'$) και του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει το δέκτη με το κέντρο του διαφορικού όγκου ($R_X B'$), όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.12.

Ένας διαφορικός όγκος dV συνεισφέρει σε μία διαφορική ποσότητα ενέργειας στο δέκτη που δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$dE_r = \frac{k_s \times E_t \times P(\mu) \times A_r dV}{r_1^2 \times r_2^2} e^{-k_e \times (r_1 + r_2)}, \quad k_s = k_{s, Ray} + k_{s, Mie}, \quad k_e = k_s + k_{abs}, \quad (3.5)$$

όπου $r_1 = T_X A'$ είναι το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει τον πομπό με το κέντρο του κοινού όγκου V , $r_2 = A' R_X$ είναι το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει το κέντρο του κοινού όγκου V με το δέκτη, k_e είναι ο συντελεστής απόσβεσης, k_{abs} είναι ο συντελεστής απορρόφησης του μέσου, k_s είναι ο συντελεστής σκέδασης, $k_{s, Ray}$ είναι ο συντελεστής εξαιτίας της σκέδασης λόγω των μορίων της ατμόσφαιρας, δηλαδή της σκέδασης Rayleigh και $k_{s, Mie}$ είναι ο σχετικός συντελεστής εξαιτίας της σκέδασης των μικροσωματιδίων ή όμοια της σκέδασης Mie. $P(\mu)$ είναι η συνάρτηση φάσης με $\mu = \cos(\theta_s)$ και $\theta_s = \theta_{Tr. elev.} + \theta_{Rec. elev.}$, σύμφωνα και με το Σχήμα 3.12. A_r είναι το εμβαδό της επιφάνειας του φωτοφωρατή. Η συνάρτηση φάσης εκφράζεται ως ο γραμμικός συνδυασμός των αντίστοιχων συναρτήσεων φάσης των σκεδάσεων Rayleigh και Mie, δηλαδή

$$P(\cos(\theta)) = \frac{k_{s, Ray}}{k_s} \times p_{Ray}(\cos(\theta)) + \frac{k_{s, Mie}}{k_s} \times p_{Mie}(\cos(\theta)) \quad (3.6)$$

Οι συναρτήσεις φάσης που αφορούν τις σκεδάσεις Rayleigh και Mie περιγράφονται από τις σχέσεις (3.1) και (3.2), αντίστοιχα, της ενότητας 3.2.1.

Για καθένα dV , ο δέκτης λαμβάνει ισοδύναμη ενέργεια ίση με $dE_e = dE_r \times dG_t \times dG_r$. Η συνολική ενέργεια που λαμβάνεται εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$E_r = \int_V dE_r \times dG_t \times dG_r = \int_V \frac{k_s \times E_t \times P(\mu) \times A_r \times \cos(\xi \times \pi / \varphi_{Rec.})}{\Omega_t \times r_1^2 \times r_2^2} e^{-k_e \times (r_1 + r_2)} dV \quad (3.7)$$

Η λαμβανόμενη ενέργεια, δηλαδή το ολοκλήρωμα της σχέσης (3.7), μπορεί να εκτιμηθεί αριθμητικά. Οι απώλειες διάδοσης εκτιμώνται από το λόγο της λαμβανόμενης προς την εκπεμπόμενη ενέργεια. Η κρουστική απόκριση μπορεί να εκτιμηθεί από το όρισμα του ίδιου ολοκληρώματος της (3.7) [152]. Βέβαια, απαιτείται ένα πρόσθετο βήμα κι αυτό είναι η ταξινόμηση των τιμών των απωλειών που αντιστοιχούν στους στοιχειώδεις όγκους dV . Η ταξινόμηση για κάθε όγκο dV γίνεται με βάση τις χρονικές στιγμές άφιξης στο δέκτη του εκάστοτε φωτονίου που υπέστη μία σκέδαση μέσα στον όγκο dV (και πιο συγκεκριμένα στο κέντρο του). Εδώ τονίζεται ότι η επιλογή των γωνιών σκέδασης μ στη σχέση (3.7) γίνεται με βάση το πώς θα έπρεπε να σκεδαστούν τα φωτόνια μέσα στον κοινό όγκο που σχηματίζεται από τη δέσμη του πομπού και το FOV του δέκτη, ώστε να κατευθυνθούν απευθείας στο δέκτη με μία σκέδαση. Δεν πρόκειται για καθαρά στατιστική μέθοδο, αλλά φαίνεται ότι απαιτείται μία γεωμετρική αντιμετώπιση στην επίλυση των εξισώσεων.

3.2.2.2 Εφαρμογή μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων. Τεχνική Monte Carlo

Εκτός από την τεχνική μοντέλο μονής σκέδασης, εφαρμόσθηκε και η τεχνική πολλαπλών σκεδάσεων Monte Carlo για την εξαγωγή αντίστοιχων θεωρητικών αποτελεσμάτων όσον αφορά τις απώλειες του ασύρματου καναλιού για διάφορες περιπτώσεις αποστάσεων και γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη. Ο κορμός της

βασικής υλοποίησης βασίζεται στην αναφορά [149]. Επικουρικά χρησιμοποιήθηκαν και οι αναφορές [154], [155]. Μένοντας στη γενική δομή της τεχνικής Monte Carlo, πρόκειται για μία μέθοδο που βασίζεται στη στατιστική. Γι' αυτό και για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων γίνεται προσομοίωση της εκπομπής και διάδοσης μεγάλου πλήθους φωτονίων. Και σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε γεωμετρικός σχηματισμός της ζεύξης πομπού και δέκτη τέτοιος ώστε αυτή η ζεύξη σημείου προς σημείο να είναι ομοεπίπεδη, όπως ακολουθήθηκε και στην περίπτωση της τεχνικής μονής σκέδασης. Όπως και πριν, οι πηγές θεωρήθηκαν ότι είναι LEDs και ο δέκτης PMT. Τα χαρακτηριστικά του πομπού που έχουν ληφθεί υπόψη είναι η γωνία ανύψωσης και η γωνία απόκλισης της οπτικής δέσμης της πηγής. Τα όρια που ορίζονται από αυτές τις γωνίες καθόρισαν και το εύρος των γωνιών ζενίθ (ως προς τον άξονα τη δέσμης της πηγής) και αζιμούθιου εντός των οποίων θα ήταν οι τιμές εκκίνησης καθενός φωτονίου που θα θεωρούνταν ότι εξέπεμψε ο πομπός. Δηλαδή χρησιμοποιούνταν κατάλληλες γεννήτριες τυχαίων αριθμών, ώστε για καθένα φωτόνιο να προκύπτει τυχαία αλλά μέσα στα προβλεπόμενα όρια η γωνία ζενίθ και αζιμούθιου ως προς τη νοητή διεύθυνση της οπτικής δέσμης. Στην πλευρά της λήψης, οι γωνίες ανύψωσης και FOV μαζί με το εμβαδόν του φωτοφωρατή χαρακτηρίζουν το δέκτη. Ο πομπός βρίσκεται στο σημείο με συντεταγμένες $(0, 0, 0)$, ενώ ο δέκτης βρίσκεται στο σημείο με συντεταγμένες $(r, 0, 0)$, αν η απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη είναι r . Όσον αφορά τα τμήματα εκπομπής και λήψης, εξακολουθεί να ισχύει το Σχήμα 3.12 για τη ζεύξη, χωρίς τον περιορισμό της μονής σκέδασης ανά φωτόνιο μόνο μέσα στον κοινό όγκο.

Έχοντας θέσει το πώς θα συμπεριληφθούν οι παράμετροι των άκρων της ζεύξης, το επόμενο βήμα αφορά την περιγραφή της διάδοσης των φωτονίων. Το τμήμα της διάδοσης είναι αυτό που ενσωματώνει την στατιστική της σκέδασης και τη στατιστική των μηκών κάλυψης ανά βήμα εκτέλεσης. Σε γενικές γραμμές, μετά τη γέννηση ενός φωτονίου, η εξέλιξη της παρουσίας του εντός του ασύρματου μέσου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: διάδοση και απορρόφηση, σκέδαση, ανανέωση των κατάλληλων παραμέτρων και επανάληψη των προηγούμενων βημάτων εφόσον καλύπτονται οι συνθήκες που αφορούν την επιβίωση του φωτονίου. Η διάδοση σε ένα βήμα γίνεται μεταξύ δύο κέντρων σκέδασης δημιουργώντας ένα μονοπάτι από νοητές τεθλασμένες γραμμές μετά από πολλαπλά βήματα. Μέχρι να βρεθεί ένα επόμενο σημείο σκέδασης δε συμβαίνει κάτι άλλο πλην της απορρόφησης κατά τη διάδοση. Αυτή η απορρόφηση θα περάσει στην ανανέωση του κατάλληλου βάρους μετά τη σκέδαση που θα ακολουθήσει όταν το φωτόνιο φθάσει στο επόμενο «σημείο» αλληλεπίδρασης με το μέσο. Το «πόσο μακριά» θα θεωρηθεί ότι φθάνει ένα φωτόνιο μετακινούμενο μεταξύ δύο διαδοχικών κέντρων σκέδασης εξαρτάται από το συντελεστή σκέδασης με αντίστροφη αναλογία. Για να γίνει αυτό σαφές, το βήμα μετακίνησης δεν είναι σταθερό και προκύπτει από κατάλληλη γεννήτρια τυχαίων αριθμών, αλλά ο συντελεστής σκέδασης καθορίζει την τάξη μεγέθους των βημάτων. Το ασύρματο μέσο θεωρείται ομογενές και μέσα σε αυτό υπάρχουν οι σκεδαστές. Όπως γίνεται αντιληπτό, υψηλός συντελεστής σκέδασης σημαίνει πυκνότερο μέσο και κατ' επέκταση μικρότερα βήματα, δηλαδή περισσότερες σκεδάσεις για κάλυψη μίας απόστασης. Το βήμα μετακίνησης θα αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή με μορφή $\Delta s = -\ln(\xi_s)/k_s$ όπου k_s είναι ο συντελεστής σκέδασης στο ασύρματο μέσο, όπως έχει ορισθεί νωρίτερα, και ξ_s είναι μία ομοιόμορφα κατανομημένη τυχαία μεταβλητή μεταξύ 0 και 1.

Αυτά που χαρακτηρίζουν ένα φωτόνιο είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x_i, y_i, z_i) και το διάνυσμα κατεύθυνσης ως προς την αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες που ανανεώνονται μετά από κάθε μετακίνηση του φωτονίου και οι κατευθύνσεις διάδοσης επαναπροσδιορίζονται μετά από κάθε σκέδαση μέσω κατάλληλου μετασχηματισμού. Κατά την εκκίνηση, ακριβώς πριν τον καθορισμό της νέας κατεύθυνσης καθενός φωτονίου εντός της γωνίας

απόκλισης της δέσμης, το διάνυσμα κατεύθυνσης έχει τις εξής συνιστώσες: $[\mu_{x,0}, \mu_{y,0}, \mu_{z,0}] = [\sin(\pi/2 - \theta_{Tr. elev.}), 0, \cos(\pi/2 - \theta_{Tr. elev.})]$, όπου $\pi/2 - \theta_{Tr. elev.}$ είναι η γωνία ζενίθ του άξονα της δέσμης της πηγής ως προς τον άξονα z που θεωρείται άξονας αναφοράς και η γωνία αζιμούθιου είναι 0. Το διάνυσμα κατεύθυνσης είναι μοναδιαίο. Όταν καθοριστούν οι νέες γωνίες ζενίθ ως προς τον άξονα της δέσμης και αζιμούθιου για τα φωτόνια, το διάνυσμα θα ανανεωθεί μέσω κατάλληλου μετασχηματισμού. Έστω ότι θ_b είναι η γωνία ζενίθ ως προς τον άξονα της δέσμης που βρίσκεται εντός της γωνίας απόκλισης $\varphi_{Tr. elev.}$ της δέσμης. Αυτή η γωνία θ_b προέρχεται από μία ομοιόμορφη τυχαία μεταβλητή $1 - \cos(\theta_b)$ μεταξύ 0 και $1 - \cos(\varphi_{Tr}/2)$, με $2\pi \times [1 - \cos(\varphi_{Tr}/2)]$ να αποτελεί τη στερεά γωνία που δημιουργείται από την οπτική δέσμη. Επομένως, η γωνία ως προς τον άξονα της δέσμης προκύπτει ως εξής: $\theta_b = \arccos\{1 - \xi_\theta \times [1 - \cos(\varphi_{Tr}/2)]\}$. Η αντίστοιχη γωνία αζιμούθιου είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα 0 ως 2π , οπότε $\psi_b = 2\pi \times \xi_\psi$. Οι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές ξ_θ και ξ_ψ είναι ομοιόμορφα κατανομημένες μεταξύ 0 και 1. Έπειτα απαιτείται αλλαγή της κατεύθυνσης για καθένα φωτόνιο με τέτοιο τρόπο ώστε η νέα κατεύθυνση να είναι εκφρασμένη ως προς την αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων και όχι ως προς τον άξονα της δέσμης. Η αλλαγή κατεύθυνσης προτού τα φωτόνια αποχωρήσουν από τον πομπό προκύπτει από το ακόλουθο μετασχηματισμό

$$\begin{aligned} \mu_{x,1} &= \frac{\sin(\theta_b)}{\sqrt{1 - \mu_{z,0}^2}} \times \{ \mu_{x,0} \times \mu_{z,0} \times \cos(\psi_b) - \mu_{y,0} \times \sin(\psi_b) \} + \mu_{x,0} \times \cos(\theta_b) \\ \mu_{y,1} &= \frac{\sin(\theta_b)}{\sqrt{1 - \mu_{z,0}^2}} \times \{ \mu_{y,0} \times \mu_{z,0} \times \cos(\psi_b) - \mu_{x,0} \times \sin(\psi_b) \} + \mu_{y,0} \times \cos(\theta_b) \quad (3.8) \\ \mu_{z,1} &= -\sin(\theta_b) \times \cos(\psi_b) \times \sqrt{1 - \mu_{z,0}^2} + \mu_{z,0} \times \cos(\psi_b) \end{aligned}$$

Αμέσως, μετά γεννώνται οι αποστάσεις Δs για τα φωτόνια που βρίσκονται ακριβώς στον πομπό. Γενικότερα, όταν ένα φωτόνιο βρίσκεται στο σημείο με συντεταγμένες $[x_i, y_i, z_i]$, έχει διάνυσμα κατεύθυνσης $[\mu_{x,i}, \mu_{y,i}, \mu_{z,i}]$ και έχει προκύψει βήμα μετακίνησης Δs , τότε η νέα θέση θα είναι: $[x_i + \mu_{x,i} \times \Delta s, y_i + \mu_{y,i} \times \Delta s, z_i + \mu_{z,i} \times \Delta s]$.

Φθάνοντας σε ένα κέντρο σκέδασης, δε χρειάζεται κάποια πρόσθετη πληροφορία που να καθορίζει αν πρόκειται για μόριο ή μικροσωματίδιο, λόγω του ότι η σκέδαση μελετάται στατιστικά. Αφού το φωτόνιο μετακινηθεί κατά το μήκος που καθορίζεται από το συντελεστή σκέδασης, έπειτα θα πραγματοποιηθεί η σκέδαση η οποία στο συγκεκριμένο μοντέλο ισοδυναμεί με μία αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης σε σχέση με την τρέχουσα κατεύθυνση που έχει το φωτόνιο. Η αλλαγή της κατεύθυνσης περιγράφεται από μία γωνία ζενίθ σε σχέση με την τρέχουσα κατεύθυνση και από μία γωνία αζιμούθιου, ακριβώς όπως έχει ήδη απεικονισθεί στο Σχήμα 3.11 για τις γωνίες θ_s και ψ , αντίστοιχα. Όπως περιγράφηκε στη υποενότητα 3.2.1 η γωνία αζιμούθιου (ψ) θα είναι ομοιόμορφα κατανομημένη ομοιόμορφα σε ένα εύρος από $[0, 2\pi)$ ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Η γωνία ζενίθ, δηλαδή η τυχαία τιμή της γωνίας σκέδασης (θ_s) θα προκύψει και πάλι από μία τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0, 1]$ ως εξής: το ολοκλήρωμα της σταθμισμένης συνάρτησης φάσης $F_M(\mu_s) = 2\pi \times \int_{-1}^{\mu_s} P(\mu) d\mu$ αποτελεί την αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function – CDF) της τυχαίας μεταβλητής μ , δηλαδή των συνημίτονων των γωνιών σκέδασης. Η $P(\mu)$ δόθηκε στην (3.6) και περιγράφηκε στην 3.2.1, ενώ $\mu = \cos(\theta)$ με $-1 \leq \mu \leq 1$. Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής παίρνει τιμές από 0 ως 1. Επομένως, από μία τυχαία μεταβλητή ξ_μ ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0, 1]$ για την οποία θα ισχύει ότι $\xi_\mu = 2\pi \times \int_{-1}^{\mu_s} P(\mu) d\mu$, μπορούν να

προκύψουν τιμές $\mu_s = \cos(\theta_s)$. Πιο συγκεκριμένα, το ολοκλήρωμα λύνεται αριθμητικά για μεγάλο πλήθος τιμών της μ_s . Έπειτα, επιλέγοντας τυχαία κάποια τιμή μεταξύ 0 και 1 για την ξ_μ , αυτή θα αντιστοιχεί σε κάποια γωνία σκέδασης θ_s . Με αυτό τον τρόπο μπορεί να καθοριστεί το ζεύγος των γωνιών σκέδασης-ζενίθ (θ_s) και αζιμούθιου του φωτονίου (ψ) ως προς την τρέχουσα κατεύθυνση.

Αφού καθορίστηκαν μετά από τη σκέδαση οι νέες γωνίες υπό τις οποίες θα διαδοθεί το καθένα φωτόνιο, θα ακολουθήσει ο υπολογισμός του διανύσματος κατεύθυνσης για καθένα φωτόνιο ως προς την αρχή των αξόνων του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Αν ένα προηγούμενο διάνυσμα κατεύθυνσης ήταν το $[\mu_{x,n}, \mu_{y,n}, \mu_{z,n}]$ στο n -οστό βήμα, τότε το νέο διάνυσμα κατεύθυνσης θα είναι το $[\mu_{x,n+1}, \mu_{y,n+1}, \mu_{z,n+1}]$ και θα προκύψει από τις εξισώσεις στην (3.8) με αντικατάσταση των $\mu_{x,0}, \mu_{y,0}, \mu_{z,0}$ από τα $\mu_{x,n}, \mu_{y,n}, \mu_{z,n}$, των $\mu_{x,1}, \mu_{y,1}, \mu_{z,1}$ από τα $\mu_{x,n+1}, \mu_{y,n+1}, \mu_{z,n+1}$ των θ_b, ψ_b από τις γωνίες θ_s και ψ , αντίστοιχα.

Επιπροσθέτως, κάθε φωτόνιο χαρακτηρίζεται και από ένα παράγοντα-βάρος (w_n) που αποτελεί την πιθανότητα επιβίωσης του καθώς και από ένα παράγοντα που αποτελεί την πιθανότητα το φωτόνιο να αφιχθεί στο δέκτη επιτυχώς μετά τη n -οστή σκέδαση. Το βάρος που εκφράζει την πιθανότητα επιβίωσης ανανεώνεται από την αλληλουχία μίας μετακίνησης και μίας σκέδασης ξεκινώντας από τιμή 1 κατά την εκπομπή ($w_0 = 1$). Μετά τις ανανεώσεις των βαρών ακολουθούν και οι ανανεώσεις της πιθανότητας επιτυχούς άφιξης του φωτονίου στο δέκτη. Προφανώς, μετά από μετακινήσεις, το βάρος-πιθανότητα επιβίωσης μειώνεται λόγω της απορρόφησης του μέσου η οποία εξελίσσεται ως εκθετική πτώση της ισχύος ανά βήμα μετακίνησης μεταξύ δύο θέσεων.

Για τον καθορισμό της πιθανότητας επιτυχούς άφιξης του φωτονίου στο δέκτη, υπολογίζεται η πιθανότητα το φωτόνιο να φθάσει στο δέκτη εντός του FOV του μετά από n σκεδάσεις. Για να εκφραστεί αυτή μαθηματικά, ορίζεται ως Ω_n η στερεά γωνία που εκφράζει το πώς το φωτόνιο «βλέπει» το δέκτη μετά την τελευταία σκέδασή του. Ο δέκτης θεωρούμε ότι έχει σχήμα δίσκου και εμβαδόν S_R . Επομένως, θα έχει ακτίνα $(S_R/\pi)^{0.5}$. Από τη θέση του φωτονίου και από το εμβαδό του δέκτη σχηματίζεται ένας κώνος. Από αυτή τη σχέση θα προκύψει και η γωνία θ' η οποία αφορά τη στερεά γωνία Ω_n . Επιπλέον, η επιφάνεια του φωτοφωρατή που θα βλέπει το φωτόνιο δεν είναι η S_R , αλλά η προβολή της S_R πάνω στο επίπεδο που ορίζεται από την κάθετη στο ευθύγραμμο τμήμα $r_{n \rightarrow rec}$ που συνδέει το κέντρο του φωτοφωρατή με το φωτόνιο. Κατατοπιστικό είναι το Σχήμα 3.13 που ακολουθεί. Θεωρώντας ότι $P(\mu)$ είναι η σταθμισμένη συνάρτηση φάσης από την (3.6), η πιθανότητα το φωτόνιο να φθάσει στο δέκτη εντός του FOV του μετά από n σκεδάσεις προκύπτει από την εξής σχέση:

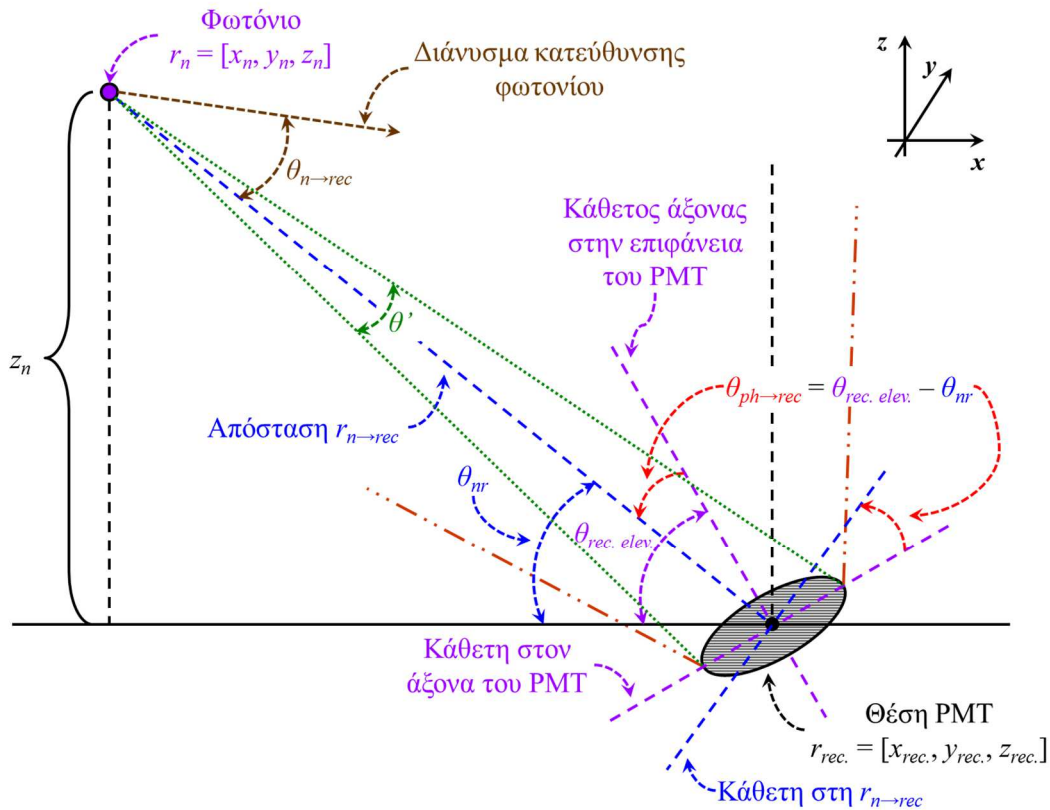
$$\rho_{1,n} = \int_{\Omega_n} P(\mu) d\Omega \quad (3.9)$$

Από τον ορισμό της στερεάς γωνίας και από το Σχήμα 3.13, προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \rho_{1,n} &= \int_{\Omega_n} P(\mu) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta'/2} P(\cos(u)) \times \sin(u) du d\psi \approx \\ &\approx 2\pi \times \int_0^{\theta'/2} P(\cos(\theta_{n \rightarrow rec})) \times \sin(u) du = \\ &= 2\pi \times P(\cos(\theta_{n \rightarrow rec})) \times [-\cos(u)]_0^{\theta'/2} = \\ &= 2\pi \times P(\cos(\theta_{n \rightarrow rec})) \times [1 - \cos(\theta'/2)] \end{aligned} \quad (3.10)$$

Σε αυτό το σημείο έγινε η υπόθεση ότι η απόσταση μεταξύ του φωτονίου από την n -οστή θέση σκέδασής του (r_n) και του δέκτη είναι μεγάλη σε σχέση με το εμβαδό του δέκτη. Αυτό σημαίνει ότι οι διαστάσεις του δέκτη είναι μικρές και επομένως η $\theta_{n \rightarrow rec}$ μπορεί να θεωρηθεί ως η μόνη γωνία που περιγράφει ικανοποιητικά την υποτιθέμενη

αλλαγή κατεύθυνσης του φωτονίου μέσω του μηχανισμού της σκέδασης ώστε να κατευθυνθεί απευθείας στην επιφάνεια του φωτοφωρατή.



Σχήμα 3.13. Σχηματικές απεικονίσεις της θέσης και της κατεύθυνσης φωτονίου μετά από n σκεδάσεις, της θέσης και του προσανατολισμού του φωτοφωρατή (PMT), καθώς και των γωνιών που απαιτούνται για τον υπολογισμό της πιθανότητας το φωτόνιο να φθάσει στο δέκτη εντός του FOV του μετά από n σκεδάσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια που είναι η προβολή της S_R πάνω στο επίπεδο που είναι κάθετο στο τμήμα $r_{n \rightarrow rec}$, η ποσότητα $\cos(\theta'/2)$ προκύπτει ως εξής:

$$\cos(\theta'/2) = \frac{r_{n \rightarrow rec}}{\sqrt{r_{n \rightarrow rec}^2 + \frac{S_R}{\pi} \times [\cos(\theta_{ph \rightarrow rec})]^2}} \quad (3.11)$$

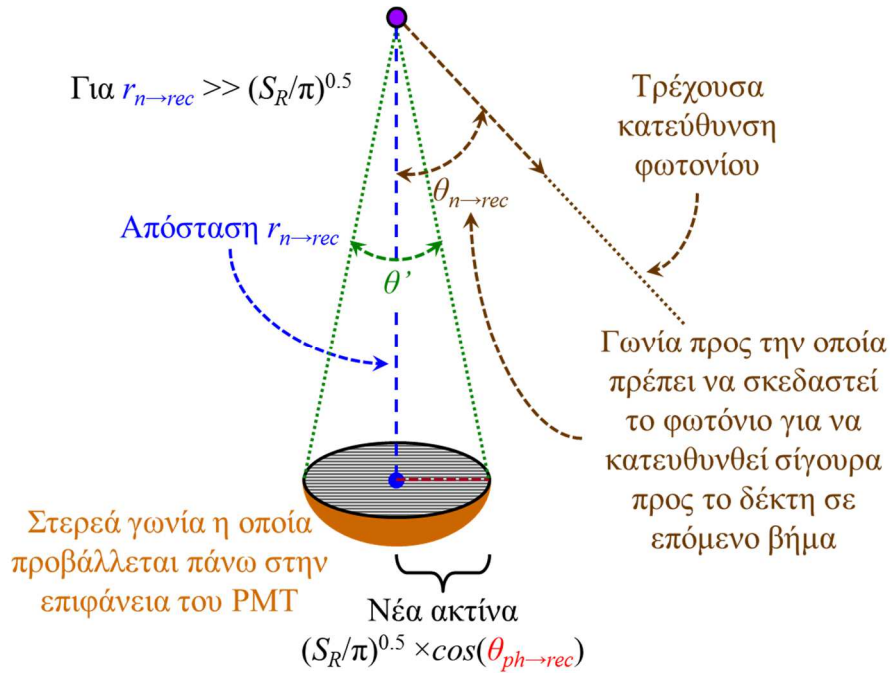
με $r_{n \rightarrow rec} = |r_n - r_{rec}| = [(x_{rec} - x_n)^2 + (y_{rec} - y_n)^2 + (z_{rec} - z_n)^2]^{0.5}$ και $\theta_{ph \rightarrow rec} = \theta_{Tr. elev.} - \theta_{nr}$. Από το Σχήμα 3.13, $\sin(\theta_{nr}) = z_n/r_{n \rightarrow rec}$. Η σχέση για την $\theta_{ph \rightarrow rec}$ θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν το ευθύγραμμο τμήμα $r_{n \rightarrow rec}$ είναι μαζί με τον άξονα του φωτοφωρατή στο ίδιο επίπεδο που κόβει κάθετα τον φωτοφωρατή. Επομένως, η ενσωμάτωση της $\theta_{ph \rightarrow rec}$ είναι και αυτή προσεγγιστική και δεν είναι ακριβής. Στα μοντέλα που έχουν υλοποιηθεί συνήθως δεν ενσωματώνεται κάποια ποσότητα $\cos(\theta_{ph \rightarrow rec})$ στον τύπο της $\cos(\theta'/2)$ [149], [155] και θεωρείται ότι έχει αμελητέα επίδραση, γεγονός που επιβεβαιώθηκε.

Για να υπολογιστεί η γωνία $\theta_{n \rightarrow rec}$, θα θεωρηθεί μία νομοτελειακή σκέδαση και αλλαγή κατεύθυνσης από την τρέχουσα σε μία νέα που οδηγεί απευθείας στο δέκτη νοητά πάνω στο τμήμα $r_{n \rightarrow rec}$. Αυτό σημαίνει ότι η γωνία $\theta_{n \rightarrow rec}$ είναι μία γωνία ζενίθ ως προς την τρέχουσα διεύθυνση διάδοσης, σύμφωνα και με το απλοποιημένο Σχήμα 3.14. Έχοντας τα $[x_n, y_n, z_n]$ και $[\mu_{x,n}, \mu_{y,n}, \mu_{z,n}]$, τα οποία υπολογίζονται σε κάθε βήμα, θα είναι σα να καθορίζεται μία νέα, αλλά επιθυμητή γωνία σκέδασης. Η γωνία $\theta_{n \rightarrow rec}$ θα υπολογιστεί μέσω του εσωτερικού γινομένου του διανύσματος κατεύθυνσης $[\mu_{x,n}, \mu_{y,n}, \mu_{z,n}]$ με το ευθύγραμμο τμήμα $r_{n \rightarrow rec}$. το διάνυσμα με κατεύθυνση από το φωτόνιο προς

το δέκτη θα έχει μορφή $\vec{r}_{n \rightarrow rec} = [x_{rec} - x_n, y_{rec} - y_n, z_{rec} - z_n]$. Επομένως, από το εσωτερικό γινόμενο των δύο διανυσμάτων με γνωστές τιμές θα έχουμε:

$$\begin{aligned} & [\mu_{x,n}, \mu_{y,n}, \mu_{z,n}] \bullet [x_{rec} - x_n, y_{rec} - y_n, z_{rec} - z_n] = \\ & = |\mu_{x,n}, \mu_{y,n}, \mu_{z,n}| |x_{rec} - x_n, y_{rec} - y_n, z_{rec} - z_n| \cos(\theta_{n \rightarrow rec}) = r_{n \rightarrow rec} \cos(\theta_{n \rightarrow rec}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Οπότε τελικά, $\cos(\theta_{n \rightarrow rec}) = [\mu_{x,n} \times (x_{rec} - x_n) + \mu_{y,n} \times (y_{rec} - y_n) + \mu_{z,n} \times (z_{rec} - z_n)] / r_{n \rightarrow rec}$. Επομένως, μπορεί να εκτιμηθεί η πιθανότητα $p_{1,n}$ το φωτόνιο να φθάσει στο δέκτη εντός του FOV του μετά από n σκεδάσεις από την (3.10) με όλες τις παραμέτρους γνωστές.



Σχήμα 3.14. Απλοποίηση των σχηματικών απεικονίσεων της θέσης και της κατεύθυνσης φωτονίου μετά από n σκεδάσεις και της θέσης του φωτοφωρατή από το Σχήμα 3.13.

Η πιθανότητα το φωτόνιο να μην φθάσει στο δέκτη, κινούμενο εκτός του FOV του μετά από n σκεδάσεις είναι $1 - p_{1,n}$. Ανάμεσα στις σκεδάσεις γίνεται μία μετακίνηση που έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας. Αυτό συμβαίνει κατά την αλλαγή θέσης από το σημείο (κέντρο σκέδασης) με συντεταγμένες $r_{n-1} = [x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}]$ στο σημείο (κέντρο σκέδασης) $r_n = [x_n, y_n, z_n]$. Κατά τη μετακίνηση, καλύπτεται απόσταση ίση με $\Delta s = |r_n - r_{n-1}|$ στο εκάστοτε βήμα. Σ' αυτή την απόσταση, το φωτόνιο υπόκειται σε απώλεια ενέργειας ίση με $\exp(-k_{abs} \times \Delta s)$. Η πιθανότητα επιβίωσης του φωτονίου κατά την πρόσπτωση στο n -οστό κέντρο σκέδασης θα είναι $w_n = (1 - p_{1n}) \times \exp(-k_{abs} \times \Delta s) \times w_{n-1}$. Μετά την n -οστή σκέδαση, η πιθανότητα το φωτόνιο να φθάσει επιτυχώς στο δέκτη δίνεται από τη σχέση $P_n = w_n \times p_{1,n} \times p_{2,n}$, με $p_{2,n} = \exp(-k_e \times |r_{rec} - r_n|) = \exp(-k_e \times r_{n \rightarrow rec})$ που αντιστοιχεί στις απώλειες διάδοσης του φωτονίου από το n -οστό κέντρο σκέδασης στο οποίο βρίσκεται ως το δέκτη. Η πιθανότητα P_n αφορά ένα φωτόνιο, οπότε για καθένα από τα M φωτόνια που θα γεννηθούν, θα κρατηθούν αντίστοιχες ποσότητες $P_{n,m}$. Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι η πιθανότητα P_n θα υπολογίζεται εφόσον γεωμετρικά το φωτόνιο βρίσκεται εντός του FOV του δέκτη όντας στο σημείο r_n , αλλιώς η P_n παίρνει τιμή 0. Η ενσωμάτωση αυτού του ελέγχου γίνεται καθορίζοντας αρχικά την κατεύθυνση του άξονα του φωτοφωρατή μέσω αντίστοιχου διανύσματος κατεύθυνσης. Θεωρώντας ζεύξη δύο σημείων όπως αυτή στο Σχήμα 3.12, με την αρχή των αξόνων να αντιστοιχεί στον πομπό, όπως έχει θεωρηθεί ως τώρα, το διάνυσμα κατεύθυνσης για τον άξονα του φωτοφωρατή θα είναι ίσο με $[\mu_{x,rec}, \mu_{y,rec}, \mu_{z,0}] = [\sin(\pi/2 - \theta_{Rec. elev.}) \times \cos(\pi), \sin(\pi/2 - \theta_{Rec. elev.}) \times \sin(\pi), \cos(\pi/2 - \theta_{Rec. elev.})]$. Ο έλεγχος γίνεται μέσω της γωνίας προβολής του

διανύσματος $-\vec{r}_{n \rightarrow rec} = -1 \times [x_{rec} - x_n, y_{rec} - y_n, z_{rec} - z_n]$ πάνω στον άξονα του φωτοφωρατή, δηλαδή με υπολογισμό της σχετικής γωνίας από το εσωτερικό γινόμενο $-\vec{r}_{n \rightarrow rec} \cdot [\mu_{x,rec}, \mu_{y,rec}, \mu_{z,rec}] = |-\vec{r}_{n \rightarrow rec}| \cos(\theta_{ph \rightarrow rec}) = r_{n \rightarrow rec} \cos(\theta_{ph \rightarrow rec})$. Από το Σχήμα 3.13, προφανώς πρέπει να ισχύει ότι $\theta_{ph \rightarrow rec}^* \leq \varphi_{rec}/2$, ώστε το φωτόνιο να βρίσκεται εντός του FOV του δέκτη. Η γωνία φ_{rec} είναι η γωνία που δημιουργείται από τις δύο πορτοκαλί διακεκομμένες γραμμές αν ενωθούν πίσω από την επιφάνεια του φωτοφωρατή. Αν ένα φωτόνιο δεν φθάσει εντός του FOV του φωτοφωρατή (PMT) μετά από n σκεδάσεις, τότε δε σημαίνει κατ' ανάγκη ότι η πιθανότητα επιβίωσης μηδενίζεται και το φωτόνιο σβήνει, καθώς η πιθανότητα επιβίωσης μηδενίζεται αν η τιμή της πέσει κάτω από την ελάχιστη που έχει τεθεί.

Η αλληλουχία των τριών βημάτων που περιγράφηκε επαναλαμβάνεται είτε για ένα συγκεκριμένο πλήθος σκεδάσεων είτε μέχρι το εκάστοτε φωτόνιο «χάσει σημαντική ποσότητα ενέργειας». Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα επιβίωσης του φωτονίου έχει πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι και άρα το φωτόνιο φαίνεται ότι απορροφήθηκε από το μέσο. Για τον υπολογισμό των απωλειών, πρώτα υπολογίζεται η σχέση $P_{N,ph,m} = \sum_{n=1}^N P_{n,m}$ για κάθε φωτόνιο m (που έχει υποστεί συνολικά N σκεδάσεις) και αποτελεί τη συνολική πιθανότητα άφιξης ενός συγκεκριμένου φωτονίου. Από M φωτόνια που υποτίθεται ότι μεταδόθηκαν, αντιστρέφοντας το μέσο όρο των $P_{N,ph,m}$ για τα M φωτόνια, δηλαδή από τη σχέση $M / \sum_{m=1}^M P_{N,ph,m}$, θα προκύψουν απώλειες σε δεκαδικές τιμές.

Στο μοντέλο προβλέπεται και η εξαγωγή της κρουστικής απόκρισης, ωστόσο επειδή το εύρος ζώνης των καναλιών είναι της τάξης των εκατοντάδων kHz ως και μερικά MHz για κανάλια χωρίς οπτική επαφή στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα για μικρές αποστάσεις [153] λίγων δεκάδων μέτρων, όταν χρησιμοποιήθηκε η τεχνική Monte Carlo για την προσομοίωση του καναλιού στην αξιολόγηση αριθμητικών αποτελεσμάτων για το σύστημα, το κανάλι λαμβανόταν υπόψη μόνο ως προς τις απώλειες που προκαλεί, καθώς η επίδρασή του στο φάσμα σημάτων λίγων kHz θα ήταν αμελητέα αν λαμβανόταν υπόψη. Για την κρουστική απόκριση, για καθένα φωτόνιο (m), χρειάζονται όλες οι πιθανότητες $P_{n,m}$, δηλαδή οι πιθανότητες επιτυχούς λήψης από όλες τις σκεδάσεις που υπέστη το φωτόνιο. Ένα φωτόνιο μπορεί να υποστεί πχ 5 σκεδάσεις ($n = 1, 2, \dots, 5$), ενώ ένα άλλο 3 ($n = 1, 2, 3$). Για κάθε $P_{n,m}$ και για κάθε φωτόνιο υπολογίζεται ένας χρόνος διάδοσης μέχρι εκείνο το σημείο που βρίσκεται το φωτόνιο (λαμβάνοντας υπόψη σωρευτικά όλα τα προηγούμενα Δs [149]) αλλά υπολογίζεται και ένας χρόνος διάδοσης από το σημείο που βρίσκεται ως το δέκτη (λαμβάνοντας υπόψη και την τελευταία επιθυμητή σκέδαση), ώστε μετά να διευθετηθούν χρονικά οι πιθανότητες (μετά από ταξινόμηση). Αν αυτό γίνει για όλα τα φωτόνια που εξέπεμψε ο πομπός και μπουν σε δύο άξονες με τον οριζόντιο να αφορά το χρόνο και τον κατακόρυφο να αφορά τα $P_{n,m}$, τότε η περιβάλλουσα θα είναι η κρουστική απόκριση.

3.2.3 Μοντέλο συστήματος

3.2.3.1 Σχήματα διαμόρφωσης που εξετάστηκαν

Τα σχήματα διαμόρφωσης που θεωρήθηκαν ήταν παλμικά (pulsed) και πολλαπλών φερόντων (multicarrier schemes). Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν θεωρητικά (και πειραματικά) εφαρμόστηκε άμεση διαμόρφωση των πηγών, ενώ ο τύπος των πηγών ήταν LEDs. Όσον αφορά τα παλμικά σχήματα διαμόρφωσης, οι επιλογές που εξετάστηκαν ήταν το On-Off-Keying (OOK) με Non-Return-to-Zero (NRZ) αλλά και με

* Εδώ η γωνία $\theta_{ph \rightarrow rec}$ είναι ορθά θεωρημένη.

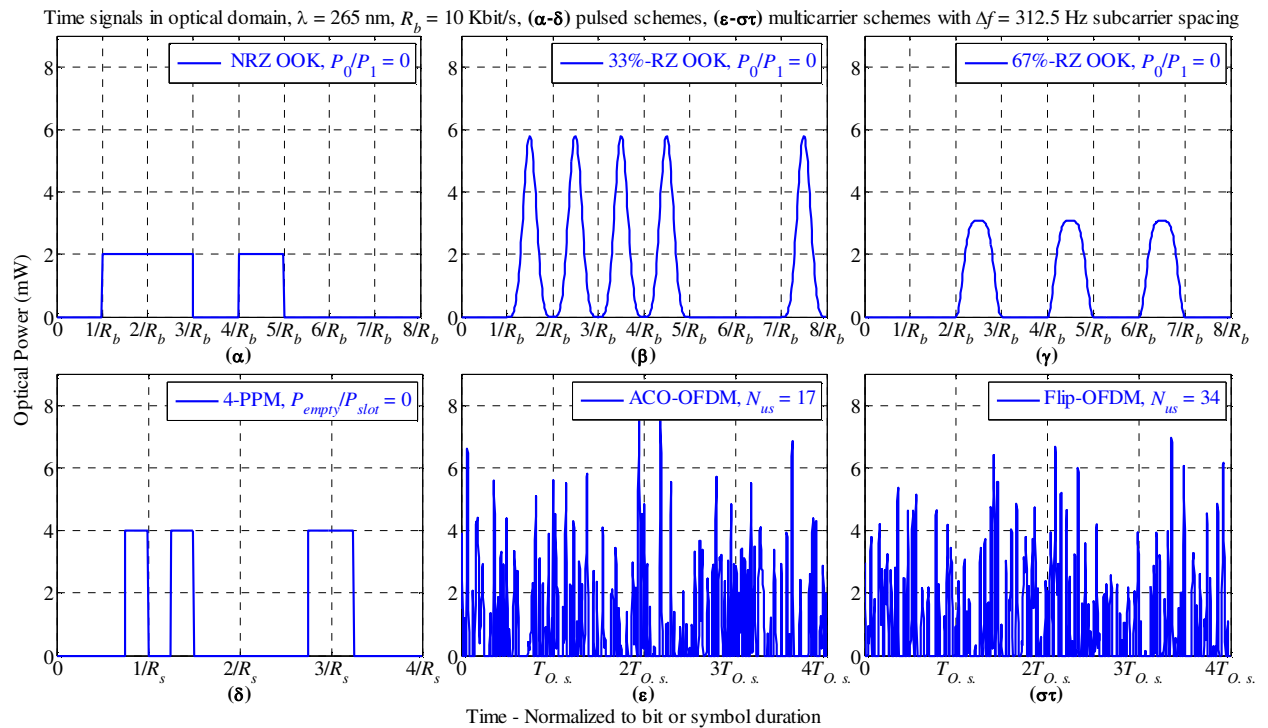
Return-to-Zero (RZ) παλμούς [128]. Στην περίπτωση του OOK με RZ παλμούς, το εύρος ημίσειας ισχύος (Full Width at Half Maximum – FWHM) ήταν 33% και 67%. Στην κατηγορία των παλμικών σχημάτων που εξετάστηκαν συμπεριλήφθηκε και το Pulse-Position-Modulation (PPM) τάξης $M = 4$ [128]. Τα σχήματα πολλαπλών φερόντων ήταν τα Asymmetrically Clipped – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (ACO-OFDM) [156] και Flip – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Flip-OFDM) [157].

Σε αυτό το σημείο γεννάται το ερώτημα γιατί να χρησιμοποιηθούν αυτά τα σχήματα διαμόρφωσης. Πρώτα από όλα, στις οπτικές επικοινωνίες με ασύμφωνες (incoherent) μεταδόσεις, διαμορφώνοντας τη φωτεινή ένταση των οπτικών πηγών, προκύπτουν μονοπολικά (unipolar) σήματα. Τα OOK και M -PPM έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε θεωρητικές και πειραματικές μεταδόσεις στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα [15]. Το OOK με εφαρμογή NRZ παλμών παρά το γεγονός ότι έχει μικρότερο φάσμα από τα M -PPM σήματα, έχει χειρότερες επιδόσεις, σε κανάλια με επαρκές φάσμα που δεν θα παραποιήσει το μεταδιδόμενο σήμα, λόγω της χρήσης κατωφλίου κατά τη φώραση. Το OOK θα χρησιμοποιηθεί σαν αναφορά στις θεωρητικές μελέτες. Το M -PPM, με $M = 4$, έχει καλύτερα ενεργειακά χαρακτηριστικά (μικρότερος λόγος του τετραγώνου της μέσης οπτικής ισχύος προς την αντίστοιχη ηλεκτρική ισχύ) σε σχέση με το OOK και βέλτιστη φώραση χωρίς κατώφλι. Σε κανάλια χωρίς ή ελάχιστη διάχυση, εμφάνισε καλύτερη απόδοση από όλα τα σχήματα διαμόρφωσης που εξετάστηκαν.

Περνώντας στα σχήματα πολλαπλών φερόντων, ένα πραγματικό συμβατικό OFDM σήμα είναι διπολικό και επομένως, απαιτείται μία υψηλή τιμή DC πόλωσης να προστεθεί στο OFDM σήμα στο ηλεκτρικό επίπεδο, ώστε σε οπτικό επίπεδο να προκύψει μονοπολικό σήμα. Αυτό οδηγεί σε ένα υψηλό επίπεδο μέσης οπτικής ισχύος κάνοντας ενεργειακά μη αποδοτικό το OFDM σχήμα διαμόρφωσης [156]. Επιπλέον, μία εσφαλμένη προσαρμογή της DC πόλωσης στο ηλεκτρικό επίπεδο μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητο ψαλίδισμα (clipping) του αρνητικού μέρους του OFDM σήματος στο πεδίο του χρόνου αλλοιώνοντας την κατανομή της ισχύος στα υποφέροντα του σήματος [157]. Αυτό δε συμβαίνει με τα σχήματα ACO και Flip OFDM, τα οποία εκτός από φασματικά αποδοτικά που είναι το τυπικό χαρακτηριστικό των OFDM εκδοχών, είναι ενεργειακά πιο αποδοτικά από το αρχικό DC-OFDM (ή όμοια Discrete Multi-Tone (DMT) σήμα με DC πόλωση) από το οποίο προέρχονται [156]. Η μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να είναι κρίσιμη παράμετρος σε περιπτώσεις όπου η μέση εκπεμπόμενη οπτική ισχύς είναι περιορισμένη για λόγους ασφαλείας των ματιών (eye safety). Άλλο τυπικό χαρακτηριστικό των OFDM σημάτων, γενικότερα, είναι η αντιμετώπιση της αλληλοπαρεμβολής συμβόλων (Inter-Symbol-Interference – ISI), όταν υπάρχει στο κανάλι, επιλέγοντας κατάλληλο μέγεθος για το κυκλικό πρόθεμα κάθε OFDM συμβόλου.

Σχετικά με τη γέννηση των σημάτων που βασίζονται σε παλμικά σχήματα διαμόρφωσης, τόσο για το NRZ-OOK όσο και για το 4-PPM χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνοι παλμοί. Για τις δύο εκδοχές RZ-OOK, οι παλμοί δεν έχουν τετραγωνικό σχήμα, αλλά γεννώνται από μία συνάρτηση της μορφής $\cos(a_1 + a_2 \times \cos(\pi \times R_b \times t))^2$, όπου a_1 και a_2 είναι κατάλληλες φάσεις-ορίσματα για καθεμία τιμή του FWHM και R_b είναι ο ρυθμός των bits. Για την περίπτωση της εκδοχής OOK με RZ παλμούς με FWHM = 33%, $a_1 = \pi/4$, $a_2 = -\pi/4$, ενώ για FWHM = 67%, $a_1 = \pi/2$, $a_2 = \pi/2$. Στο Σχήμα 3.15(α), στο Σχήμα 3.15(β), στο Σχήμα 3.15(γ) και στο Σχήμα 3.15(δ) απεικονίζονται ακολουθίες των 8 bits για ρυθμό δεδομένων 10 kbit/s για NRZ OOK, OOK με RZ παλμούς με FWHM 33% και 67%, καθώς και για 4-PPM, αντίστοιχα. Οι ακολουθίες για τα τέσσερα παλμικά σχήματα είναι διαφορετικές. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι μεν $R_b = 10$ kbit/s, αλλά προτιμήθηκε στον οριζόντιο άξονα να αποδοθεί η διαδοχή bits για τα OOK σήματα ή των συμβόλων για το 4-PPM. Επομένως, οι εικονιζόμενες τιμές στον οριζόντιο άξονα είναι πολλαπλάσια της διάρκειας των bits ($T_{bit} = 1/R_b$) ή των συμβόλων ($T_{symbol} =$

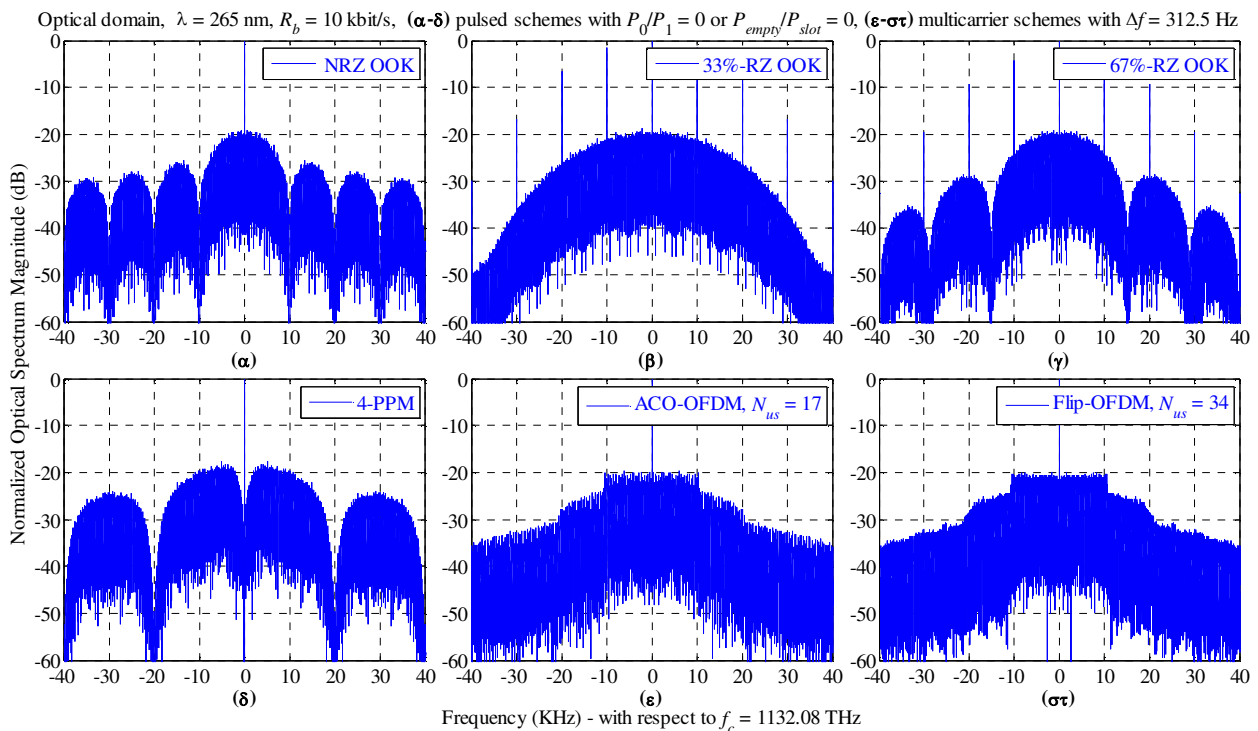
$1/R_s = 1/\{R_b/\log_2(4)\}$), για τις εκδοχές ΟΟΚ και για το 4-PPM, αντίστοιχα. Οι κατακόρυφοι άξονες αντιστοιχούν σε οπτική ισχύ. Τα σήματα από τα οποία προέκυψαν οι ακολουθίες έχουν την ίδια μέση ισχύ, η οποία τέθηκε ίση με 1 mW. Για όλες τις εκδοχές ΟΟΚ, ο λόγος της οπτικής ισχύος του λογικού μηδέν (P_0) προς την αντίστοιχη ισχύ για τον άσο (P_1) είναι 0. Αντίστοιχα, για το 4-PPM, ο λόγος της οπτικής ισχύος που αντιστοιχεί σε μία θυρίδα χωρίς παλμό (P_{empty}) προς την οπτική ισχύ κορυφής για θυρίδα με παλμό (P_{peak}) θα είναι ίσος με 0 ($P_{empty}/P_{peak} = 0$).



Σχήμα 3.15. Χρονικά οπτικά σήματα υπό διαμόρφωση (α) ΟΟΚ με NRZ παλμούς, (β) ΟΟΚ με RZ παλμούς με FWHM = 33%, (γ) ΟΟΚ με RZ παλμούς με FWHM = 67%, (δ) 4-PPM, (ε) ACO-OFDM με 17 περιπτώσεις υποφέροντα με δεδομένα και (στ) Flip-OFDM με 34 υποφέροντα με δεδομένα με απόσταση υποφερόντων 312.5 Hz για τις περιπτώσεις (ε) και (στ). R_s είναι ο ρυθμός των συμβόλων για το 4-PPM και $T_{O.s.}$ είναι η διάρκεια ενός ACO ή Flip-OFDM συμβόλου μαζί με το κυκλικό πρόθεμα.

Από τα 4 σχήματα, οι παλμοί με την υψηλότερη ισχύ κορυφής εμφανίζονται για την περίπτωση του ΟΟΚ με RZ παλμούς με FWHM = 33%. Ωστόσο, οι στενότεροι παλμοί οδηγούν σε διευρυμένο φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, τα αντίστοιχα μέτρα των φασμάτων των οπτικών σημάτων φαίνονται στο Σχήμα 3.16. Όλα τα μέτρα των φασμάτων έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη τιμή τους και αποδίδονται σε dB στον κατακόρυφο άξονα. Στο οριζόντιο άξονα φαίνονται οι συχνότητες σε kHz για τα σήματα στα 10 kbit/s. Επιπλέον, οι μηδενικές κεντρικές συχνότητες στο κέντρο των φασμάτων σημαίνει μηδενική απόσταση από τη φέρουσα συχνότητα που αναφέρεται στο κάτω μέρος του σχήματος για την περίπτωση των 265 nm. Στο Σχήμα 3.16(α), φαίνεται ότι το ΟΟΚ με NRZ παλμούς έχει το στενότερο φάσμα από τα παλμικά σχήματα. Στην περίπτωση του ΟΟΚ με RZ παλμούς και FWHM = 33% στο Σχήμα 3.16(β), παρατηρείται το ευρύτερο φάσμα. Μεταξύ των δύο περιπτώσεων ΟΟΚ, βρίσκεται η περίπτωση 67%-RZ ΟΟΚ στο Σχήμα 3.16(γ), με το πρώτο «βύθισμα» να γίνεται μεταξύ 10 KHz και 20 KHz απόσταση από την κεντρική συχνότητα και από τις δύο πλευρές του φάσματος. Σε επόμενη παράγραφο στο παρόν κεφάλαιο, θα εξεταστεί αν στενότεροι χρονικά παλμοί μπορεί να οδηγήσουν σε καλύτερες επιδόσεις στην περίπτωση που το κανάλι εισάγει κάποια χρονική διάχυση των παλμών. Κατά τα γνωστά, μικρή διάχυση από το κανάλι μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη αλληλοπαρεμβολή συμβόλων (ISI) για τους στενότερους RZ παλμούς σε σχέση με τους NRZ παλμούς. Βέβαια, χρειάζεται προσοχή λόγω του

διευρυμένου φάσματος. Στην περίπτωση του 4-PPM (Σχήμα 3.15(δ)), είναι τέσσερις οι πιθανές θέσεις εμφάνισης παλμού στη διάρκεια ενός συμβόλου που έχει διάρκεια διπλάσια του bit για τον ίδιο ρυθμό δεδομένων. Επειδή η εμφάνιση παλμού πραγματοποιείται μέσα στη χρονική διάρκεια μίας θυρίδας (T_{slot}), το εύρος ζώνης του σήματος υπό 4-PPM διαμόρφωση θα είναι διπλάσιο του OOK με NRZ παλμούς, καθώς η διάρκεια μίας θυρίδας είναι η μισή αυτής ενός bit στο OOK με NRZ παλμούς για τον ίδιο ρυθμό δεδομένων. Αυτό φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 3.16(δ) όπου το πρώτο «βύθισμα» στο φάσμα γίνεται στα 20 kHz για $R_b = 10$ kbit/s. Το πλεονέκτημα από την εφαρμογή ενός σήματος 4-PPM είναι στο βύθισμα των λοβών γύρω από το 0. Στο ηλεκτρικό επίπεδο στο δέκτη, το λαμβανόμενο σήμα θα έχει υποστεί και την επίδραση από το θόρυβο περιβάλλοντος. Αν καταστεί δυνατή η αποκοπή της DC συνιστώσας λόγω του ηλίου, το 4-PPM σήμα δεν θα έχει επηρεαστεί αρνητικά αφού δε θα αποκοπεί και ωφέλιμο σήμα. Παραμένει, ωστόσο, το πρόβλημα της διακύμανσης του θορύβου από το περιβάλλον της οποίας η επίδραση θα μελετηθεί στην επόμενη ενότητα. Σημειώνεται, βέβαια, ότι η εμφάνιση μίας ισχυρής DC συνιστώσας λόγω του ηλίου μπορεί να προκαλέσει πολύ σημαντικούς περιορισμούς στη λειτουργία του φωτοφωρατή [131] καθιστώντας την επιτυχή φώραση σημάτων αδύνατη. Βέβαια, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι το επίκεντρο της μελέτης βρίσκεται στο ηλιακά τυφλό τμήμα της UV-C μπάντας, όπου ελαχιστοποιείται ο θόρυβος από το περιβάλλον.

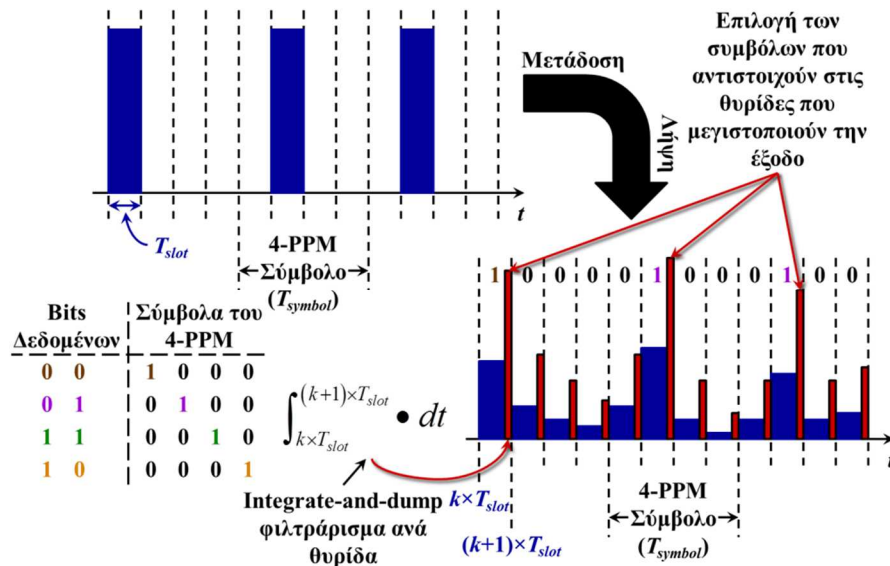


Σχήμα 3.16. Μέτρο του φάσματος των οπτικών σημάτων υπό διαμόρφωση (α) OOK με NRZ παλμούς, (β) OOK με RZ παλμούς με FWHM = 33%, (γ) OOK με RZ παλμούς με FWHM = 67%, (δ) 4-PPM, (ε) ACO-OFDM με 17 περιπτώσεις υποφέρωντα με δεδομένα και (στ) Flip-OFDM με 34 υποφέρωντα με δεδομένα με απόσταση υποφέρωντων 312.5 Hz για τις περιπτώσεις (ε) και (στ).

Όσον αφορά το τμήμα της φώρασης για τα παλμικά σχήματα, μετά τη μετατροπή από το οπτικό στο ηλεκτρικό επίπεδο στην φωτοκάθοδο και το πέρασμα από την ενισχυτική μονάδα του φωτοπολλαπλασιαστή, το ενισχυμένο σήμα υπό μορφή ηλεκτρονίων περνά από την άνοδο. Για τη διάρκεια τ κάθε παλμού, το σήμα διέρχεται από ένα φίλτρο integrate-and-dump που εκτελεί μία πράξη ολοκλήρωσης $\int_{k \times \tau}^{(k+1) \times \tau} \bullet dt$ που δεν είναι τίποτα περισσότερο από άθροιση των ηλεκτρονίων στη διάρκεια του παλμού είτε στη διάρκεια αυτή υπήρχε είτε δεν υπήρχε παλμός (το οποίο φυσικά δε γνωρίζει ο δέκτης). Ως εδώ η διαδικασία είναι ίδια για όλα τα παλμικά σχήματα. Η μονή διαφορά μεταξύ των

OOK σχημάτων και του 4-PPM είναι ότι η διάρκεια τ είναι ίση με T_{bit} για τις εκδοχές του OOK και T_{slot} για το 4-PPM. Αυτό σημαίνει ότι το φιλτράρισμα integrate-and-dump για τα OOK σήματα γίνεται στη διάρκεια καθενός bit, ενώ στο 4-PPM γίνεται στη διάρκεια της θυρίδας καθενός συμβόλου. Εδώ τονίζεται ότι στο επίπεδο της προσομοίωσης, οι συνιστώσες θορύβου γεννώνται κατάλληλα και προστίθεται μετά το πέρασμα του σήματος από αυτό το μηχανισμό άθροισης φωτοηλεκτρονίων ανά διάρκεια τ . Αυτό συμβαίνει διότι μετά την επίδραση των απωλειών του καναλιού, η επεξεργασία του εξασθενημένου σήματος σε επίπεδο φωτοηλεκτρονίων θα γίνει στα διαστήματα τ χωρίς ενδιάμεση λήψη δειγμάτων. Στη συνέχεια, για τα σήματα OOK γίνεται φώραση με εφαρμογή βέλτιστου κατωφλίου [158]. Για το 4-PPM, ακολουθείται φώραση μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood detection). Εφόσον, έχει επιτευχθεί ο συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη, ομάδες 4 θυρίδων που αποτελούν καθένα σύμβολο θα ελεγχθούν για να αποφασισθεί ποιο σύμβολο από τα 4 δυνατά σύμβολα μεταδόθηκε. Η απόφαση θα ληφθεί με βάση τη θέση της θυρίδας στη οποία ανιχνεύθηκε η υψηλότερη τιμή σήματος χωρίς την ανάγκη χρήσης κατωφλίου. Δηλαδή ακόμα κι αν υπάρχει μόνο θόρυβος σε τρεις θυρίδες και σε κάποια από τις θυρίδες του συμβόλου υπάρχουν φωτοηλεκτρόνια από ένα παλμό μαζί με θόρυβο, τότε γι' αυτή τη θυρίδα θα μετρηθεί η μέγιστη τιμή και η θέση της θυρίδας στο σύμβολο θα καθορίσει την απόφαση για το σύμβολο που εξέπεμψε ο πομπός. Η βέλτιστη φώραση του σχήματος PPM, λόγω της ανυπαρξίας κατωφλίου, δίνει την αίσθηση ότι θα υπερτερεί έναντι των άλλων παλμικών σχημάτων παρά το γεγονός ότι το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου κατά 4-PPM σήματος είναι διπλάσιο του OOK με εφαρμογή NRZ παλμών. Βέβαια, αυτό θα συμβεί υπό την προϋπόθεση μηδενικής διάχυσης από το κανάλι, ώστε να μην προκληθεί ISI. Αυτά θα επιβεβαιωθούν θεωρητικά σε επόμενη παράγραφο.

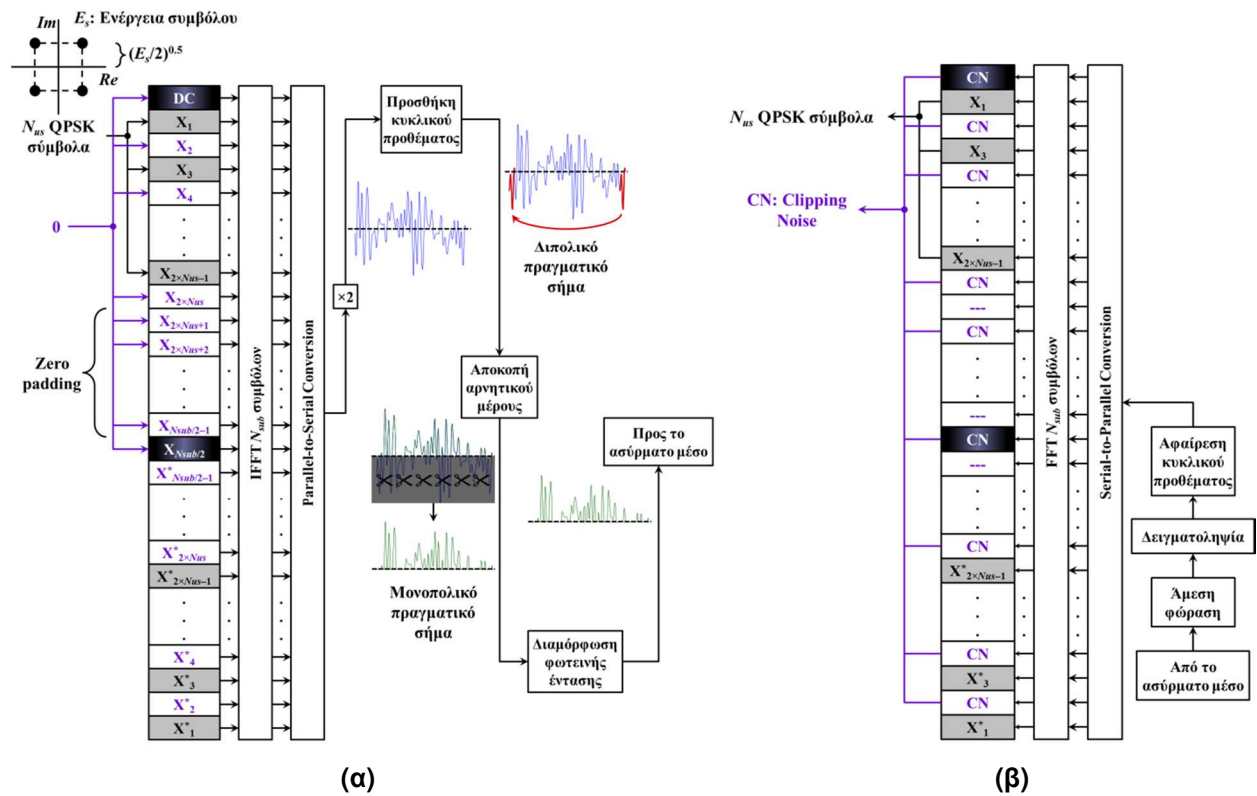
Επειδή το τελευταίο τμήμα της διαδικασίας της φώρασης για την περίπτωση των παλμικών σχημάτων είναι γνωστή [158], [159], θα γίνει μία σύντομη περιγραφή της διαδικασίας φώρασης μόνο για το 4-PPM. Αναφέρεται ότι εδώ απομονώθηκε μόνο το κομμάτι στο ηλεκτρικό επίπεδο που είναι σχετικό με το σχήμα διαμόρφωσης, ενώ ο όρος φώραση αναφέρεται στη «ανίχνευση» του συμβόλου που έλαβε ο δέκτης. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.17, μία ακολουθία από τρία σύμβολα 4-PPM, τα 1000, 0100 και 0100, περνούν μέσα από ένα κανάλι και κατά τη λήψη καθένα σύμβολο έχει υποστεί κάποια εξασθένηση, ενώ στη διάρκεια μία θυρίδας μπορεί να έχει προστεθεί θόρυβος από το περιβάλλον και από τον ίδιο το δέκτη (πχ θερμικός) και πιθανόν κάποια διάχυση από γειτονικές θυρίδες. Η απόφαση για το ποιο σύμβολο ελήφθη προκύπτει από τη θέση της μέγιστης από τις 4 τιμές που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης για τις 4 θυρίδες ενός 4-PPM συμβόλου. Επομένως, όταν για το πρώτο σύμβολο, από τις τέσσερις τιμές που προέκυψαν από τις τέσσερις ολοκληρώσεις, η μέγιστη ήταν η πρώτη, τότε λαμβάνεται η απόφαση ότι το σύμβολο που έλαβε ο δέκτης είναι το 1000 και τα αντίστοιχα bits είναι το ζεύγος 00. Αντίστοιχη είναι η διαδικασία για την περίπτωση των υπόλοιπων δύο συμβόλων. Με την επιβολή των υψηλών απωλειών στην περίπτωση των διάχυτων μεταδόσεων που πραγματευόμαστε και με επεξεργασία σε επίπεδο φωτοηλεκτρονίων, γίνεται εύκολα αντιληπτό το γεγονός ότι η ολοκλήρωση είναι καταμέτρηση φωτοηλεκτρονίων και στο τέλος της θυρίδας το αποτέλεσμα είναι το άθροισμά τους που μετρήθηκε σε όλη τη διάρκεια καθενιάς θυρίδας. Προφανώς, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του λαμβανόμενου συμβόλου βάσει της θέσης, δηλαδή της θυρίδας, όπου καταμετρήθηκε η μεγαλύτερη ποσότητα φωτοηλεκτρονίων.



Σχήμα 3.17. Φιλτράρισμα Integrate-and-dump και φώραση για τρία σύμβολα που αφορούν σήμα διαμορφωμένο κατά 4-PPM.

Όσον αφορά τα σχήματα διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων, στις προσομοιώσεις δε χρησιμοποιήθηκαν πιλοτικά υποφέροντα μεταξύ των υποφερόντων με ωφέλιμα δεδομένα, ενώ ο συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη ήταν τέλειος. Πιο συγκεκριμένα, για το σχήμα ACO-OFDM και για καθένα σύμβολο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18(α), στο τμήμα του πομπού, ξεκινώντας την αρίθμηση από το 0, N_{us} περιπτώσεις υποφέροντα φορτώνονται με πληροφορία, ενώ τα άρτια φορτώνονται με μηδενικά [156], ενώ για να καλυφθεί το κομμάτι των υποφερόντων μέχρι το μισό μήκος του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT) τα υπόλοιπα υποφέροντα φορτώνονται επίσης με μηδενικά (zero padding). Τα δεδομένα είναι υπό μορφή Quadrature Phase Shift Keying (Q-PSK) συμβόλων. Στη συνέχεια, στο υποφέρον $N_{sub}/2$, με N_{sub} τη διάσταση των FFT/IFFT, εισάγεται ένα μηδενικό, όπως είχε γίνει και για το υποφέρον που αφορά το DC. Τα υπόλοιπα υποφέροντα μετά το $N_{sub}/2$ μέχρι και το τελευταίο φορτώνονται με τα κατοπτρικά συζυγή δεδομένα των αρχικών μισών υποφερόντων, ξεκινώντας από το $(N_{sub}/2 - 1)$ -οστό μέχρι το 1ο υποφέρον λόγω της κατοπτρικής ιδιότητας. Ακολουθεί ο IFFT και η μετατροπή της ροής από παράλληλη σε σειριακή και ένας πολλαπλασιασμός του πραγματικού διπολικού σήματος επί «2» ώστε για τα ACO και Flip-OFDM, τα μονοπολικά χρονικά σύμβολα να έχουν την ίδια ενέργεια. Έπειτα προστίθεται το κυκλικό πρόθεμα, παίρνοντας ένα τμήμα από το τέλος του συμβόλου και τοποθετώντας στην αρχή ώστε να υπάρχει η απαραίτητη προστασία σε περίπτωση εμφάνισης διάχυσης από το κανάλι. Σε αυτό το σημείο, το σύμβολο είναι πραγματικό και διπολικό. Επομένως, το επόμενο βήμα είναι η αποκοπή (clipping) του αρνητικού μέρους χωρίς επίδραση στα ωφέλιμα δεδομένα που βρίσκονται στα περιπτώσεις υποφέροντα. Ακολουθεί η άμεση διαμόρφωση των πηγών και η διάδοση στο ασύρματο διάχυτο μέσο. Στη λήψη, όπως βοηθητικά δίνεται και στο Σχήμα 3.18(β), μετά την άμεση φώραση, το σήμα δειγματοληπτείται, αφαιρείται το κυκλικό πρόθεμα και η ροή των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε ένα σύμβολο μετατρέπεται από σειριακή σε παράλληλη ώστε να περάσει από τον ευθύ μετασχηματισμό Fourier (FFT) και να ληφθούν τα δεδομένα από τα περιπτώσεις υποφέροντα που είχαν φορτωθεί με αυτά στον πομπό. Εδώ τονίζεται ότι η αποκοπή του αρνητικού μέρους του πραγματικού ηλεκτρικού σήματος στον πομπό είναι η αιτία εμφάνισης μη γραμμικού θορύβου στα άρτια υποφέροντα μετά την εφαρμογή του FFT στο δέκτη. Τα υπόλοιπα υποφέροντα, κάποια από τα οποία φέρουν ωφέλιμα δεδομένα, μένουν ανεπηρέαστα. Εννοείται ότι από όλη αυτή την αλυσίδα της μετάδοσης τα υποφέροντα θα επηρεαστούν και από όλες τις υπόλοιπες συνιστώσες θορύβου που υπάρχουν στο σύστημα (πχ θερμικός θόρυβος, θόρυβος

βολής). Στο σχήμα Σχήμα 3.18(β), τα υποφέροντα με περιεχόμενο «---» είχαν φορτωθεί με μηδενικά κατά την εκπομπή και θα απορριφθούν.



Σχήμα 3.18. (α) Πομπός και (β) δέκτης για το σχήμα ACO-OFDM.

Σχετικά με το Flip-OFDM [157], κατ' αντιστοιχία με πριν, δίνεται το Σχήμα 3.19 (α). Στον πομπό ακολουθείται η συμβατική διαδικασία γέννησης πραγματικών OFDM συμβόλων. Στο μηδενικό υποφέρον εισάγεται ένα μηδενικό για να ακολουθήσουν N_{US} υποφέροντα με Q-PSK σύμβολα. Για το Flip-OFDM, το πλήθος N_{US} είναι διπλάσιο από ότι στο σχήμα ACO-OFDM. Στη συνέχεια, $N_{Sub}/2 - (N_{US} + 1)$ υποφέροντα φορτώνονται με μηδενικά. Το $N_{Sub}/2$ φορτώνεται με ένα μηδενικό και τα υπόλοιπα υποφέροντα είναι τα κατοπτρικά συζυγή των πρώτων, όπως πριν. Η διαδικασία παραμένει ίδια με την εφαρμογή του IFFT N_{Sub} σημείων και τη μετατροπή της ροής σε σειριακή. Το πραγματικό διπολικό σύμβολο χωρίζεται σε θετικό και αρνητικό, το αρνητικό πολλαπλασιάζεται επί «-1» και μ' αυτό τον τρόπο, η πληροφορία ενός αρχικού συμβόλου μεταδίδεται στη διάρκεια δύο μονοπολικών συμβόλων που είναι δυνατό να μεταδοθούν χωρίς την εφαρμογή κάποιας αρχικής DC πόλωσης των πηγών. Γι' αυτό και το πλήθος των υποφερόντων που φέρουν δεδομένα (N_{US}) είναι διπλάσιο σε σχέση με την περίπτωση του σχήματος ACO-OFDM με το οποίο δε χρειάζεται διάρκεια δύο συμβόλων για τη μετάδοση ενός αρχικού συμβόλου. Επιστρέφοντας στο σχήμα Flip-OFDM, το ανεστραμμένο (flipped) μετά τον πολλαπλασιασμό σύμβολο καθυστερεί ώστε να δημιουργηθεί η αλληλουχία δύο συμβόλων. Τα δύο διαδοχικά σύμβολα θα διαμορφώσουν άμεσα τη φωτεινή ένταση των πηγών. Στη λήψη, σύμφωνα και με το Σχήμα 3.19(β), μετά την άμεση φώραση και τη δειγματοληψία, τα δύο σήματα θα αποπολυπλεχθούν, θα αφαιρεθούν τα κυκλικά προθέματα και το σύμβολο που δεν υπέστη αντιστροφή θα καθυστερήσει σε σχέση με το δεύτερο σύμβολο που θα πολλαπλασιαστεί ξανά με «-1». Αφού τα δύο σήματα ευθυγραμμιστούν χρονικά, θα προστεθούν ώστε να δώσουν μία παραποιημένη μορφή (λόγω θορύβου) του αρχικού διπολικού συμβόλου. Το διπολικό σύμβολο θα περάσει από την αντίστροφη διαδικασία. Δηλαδή, η ροή των δειγμάτων θα μετατραπεί σε παράλληλη για να ακολουθήσει ο FFT N_{Sub} σημείων. Τα πρώτα N_{US} υποφέροντα μετά το DC περιέχουν τα ωφέλιμα Q-PSK σύμβολα.

αντίστοιχο φάσμα φαίνεται στο Σχήμα 3.16(ε). Για το Flip-OFDM, το πλήθος των υποφερόντων με δεδομένα ήταν διπλάσιο, δηλαδή 34, καθώς για τον ίδιο ρυθμό δεδομένων η μετάδοση ενός αρχικού διπολικού πραγματικού συμβόλου με ωφέλιμο δεδομένα μεταδίδεται στη διάρκεια δύο Flip-OFDM συμβόλων. Επιπλέον, για διπλάσιο N_{us} , ο ρυθμός στο δεξί μέλος της (3.13) διαιρείται διά 2, καθώς στη διάρκεια δύο συμβόλων μεταδίδεται ένα ωφέλιμο σύμβολο δεδομένων. Στο Σχήμα 3.15(στ) φαίνεται η αλληλουχία τεσσάρων Flip-OFDM χρονικών συμβόλων (μαζί με το κυκλικό προθέμα) για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Η πλήρης διάρκεια καθενός συμβόλου τέθηκε $T_{o.s.}$, όπως και με το ACO-OFDM στο Σχήμα 3.15(ε). Το αντίστοιχο φάσμα φαίνεται στο Σχήμα 3.16(στ), όπου εύκολα παρατηρεί ο αναγνώστης ότι η «χτένα» που δημιουργείται από τα υποφέροντα με δεδομένα είναι πυκνότερη από την αντίστοιχη περίπτωση του φάσματος του ACO-OFDM σήματος στο Σχήμα 3.16(ε). Με αυτό τον τρόπο που γεννώνται τα δύο σήματα, εξασφαλίζονται ίση μέση οπτικής ισχύς εκπομπής και ίδιες επιδόσεις κατά τη λήψη και φώραση για τα δύο σχήματα.

Η εκτίμηση του καναλιού υποτίθεται ότι εκτελούνταν τέλεια. Εδώ τονίζεται ότι το μέγεθος του κυκλικού προθέματος καθορίζει και το πλήθος των υποφερόντων που φέρουν χρήσιμα δεδομένα. Αυτό μπορεί να φανεί από την (3.13). Ένα σύμβολο με μεγαλύτερη διάρκεια θα επέβαλε να φορτωθούν με δεδομένα μεγαλύτερο πλήθος υποφερόντων για ένα συγκεκριμένο ρυθμό δεδομένων που έχει τεθεί ως στόχος με σταθερές τις παραμέτρους $M_{each\ subc.}$ ($M_{each\ subc.} = 4$) και $T_{use.\ symb.\ dur.}$. Οι καμπύλες του ρυθμού σφαλμάτων bits συναρτήσει του SNR δεν επηρεάζονται σημαντικά από το μήκος του κυκλικού προθέματος, υπό την προϋπόθεση ότι η διάχυση του καναλιού έχει καλυφθεί.

3.2.3.2 Εκτιμήσεις του ρυθμού σφαλμάτων bits μέσω αναλυτικών τύπων

Η θεωρητική επίδοση του συστήματος ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που εφαρμόζεται μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας αναλυτικούς τύπους του ρυθμού σφαλμάτων bits (BER) σε συνάρτηση του ηλεκτρικού SNR, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το θόρυβο βολής στο δέκτη. Θεωρήθηκε ότι δεν εισάγεται αλληλοπαρεμβολή συμβόλων (ISI) από το ασύρματο κανάλι. Τα θεωρητικά αποτελέσματα θα δώσουν μία αρχική ένδειξη των προσδοκώμενων επιδόσεων σε σύγκριση με αυτές θα εξαχθούν από το αριθμητικό μοντέλο. Αναφέρεται ότι το ηλεκτρικό SNR ορίζεται μέσω της μέση οπτικής ισχύος, όπως στις αναφορές [128], [160] και [161]. Εστιάζοντας στα παλμικά σχήματα διαμόρφωσης, στην πλευρά του πομπού, ο λόγος του επιπέδου της ισχύος για ένα bit "0" προς το επίπεδο της ισχύος κορυφής για ένα bit "1" για τις εκδοχές του OOK τέθηκε ίσος με 0. Όμοια σε μηδενική τιμή τέθηκε και ο λόγος του επιπέδου της ισχύος σε μία θυρίδα χωρίς παλμό προς το επίπεδο της ισχύος σε μία θυρίδα με ένα παλμό για το σχήμα 4-PPM. Αναφορικά με το σχήμα ACO-OFDM, στο ηλεκτρικό επίπεδο στην πλευρά του πομπού, μετά την εφαρμογή του clipping στο αρχικό OFDM σήμα, το σήμα πολλαπλασιάζεται επί 2 (Σχήμα 3.18(α)), ώστε να επιτευχθεί ίση ενέργεια συμβόλου για τα σχήματα ACO-OFDM και Flip-OFDM [157]. Όσον αφορά το ηλεκτρικό SNR, τα σήματα που έχουν διαμορφωθεί υπό τα σχήματα ACO-OFDM και Flip-OFDM θα έχουν την ίδια επίδοση [157].

Ξεκινώντας από τη διακύμανση του θορύβου βολής, εδώ θα ακολουθηθεί μία προσέγγιση που ενοποιεί το θόρυβο στη φωτοκάθοδο και το θόρυβο του κέρδους του PMT ξεκινώντας από την [161]. Θεωρώντας δύο ανεξάρτητα γεγονότα σε σειρά (cascading) και δύο αντίστοιχες γεννήτριες συναρτήσεις πιθανοτήτων $A(s)$ και $B(s)$, τότε η γεννήτρια συνάρτηση πιθανοτήτων της αλληλουχίας των γεγονότων από το θεώρημα Π.1.3 στην παράγραφο Π.2 του παραρτήματος θα είναι $Q_{AB}(s) = A[B(s)]$. Από την πρόταση Π.1.4, η μέση τιμή και η διακύμανση της αλληλουχίας των γεγονότων θα είναι $n_{AB} = n_A \times n_B$ και $(\sigma_{AB})^2 = (n_B)^2 \times (\sigma_A)^2 + n_A \times (\sigma_B)^2$, αντίστοιχα, όπου n_A , σ_A είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής που περιγράφει το πρώτο γεγονός και

n_B , σ_B είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τυχαιάς μεταβλητής που περιγράφει το δεύτερο γεγονός της ακολουθίας.

Η πιθανότητα n φωτόνια να φθάσουν στο δέκτη, δηλαδή αρχικά στη φωτοκάθοδο του PMT, σε ένα χρονικό διάστημα τ με ένα μέσο ρυθμό άφιξης φωτονίων I_p περιγράφεται από μία κατανομή Poisson με μορφή $P(n, \tau) = [(I_p \times \tau)^n / n!] \times \exp(-I_p \times \tau)$. Η μέση τιμή και η διακύμανση των αφίξεων φωτονίων είναι κατά τα γνωστά $n_p = (\sigma_p)^2 = I_p \times \tau$. Στη συνέχεια ακολουθεί η ενσωμάτωση του θορύβου της φωτοδιόδου. Για κάθε ένα φωτόνιο που προσπίπτει στη φωτοκάθοδο η οποία έχει κβαντική απόδοση η , ένα ηλεκτρόνιο γεννιέται με πιθανότητα η , ενώ κανένα ηλεκτρόνιο δεν εμφανίζεται με πιθανότητα $1 - \eta$. Η τυχαιά μεταβλητή X_e που περιγράφει τη γέννηση και εκπομπή ηλεκτρονίου στη φωτοκάθοδο από την πρόσπτωση ενός φωτονίου ακολουθεί κατανομή Bernoulli και μπορεί να περιγραφεί από μία Συνάρτηση Πιθανότητας Μάζας (Probability Mass Function – PMF) της μορφής

$$f(X_e) = P(X_e = x) = \eta^x \times (1 - \eta)^{1-x}, \quad x = 0, 1 \quad (3.14)$$

Η μέση τιμή και η διακύμανση της εμφάνισης ενός φωτοηλεκτρονίου ακριβώς μετά τη φωτοκάθοδο είναι αντίστοιχα

$$n_{pc} = E[X_e] = \sum_{x=0}^1 x \times \eta^x \times (1 - \eta)^{1-x} = \eta \quad (3.15)$$

$$\sigma_{pc}^2 = E[(X_e - E[X_e])^2] = E[X_e^2] - (E[X_e])^2 = \eta - \eta^2$$

Η αλληλουχία των αφίξεων φωτονίων (μέσα σε διάστημα τ) που ακολουθούν κατανομή Poisson και της εμφάνισης φωτοηλεκτρονίου για καθένα φωτόνιο που αφικνείται και ακολουθεί κατανομή Bernoulli δημιουργούν μία τυχαιά μεταβλητή του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο. Η μέση τιμή και η διακύμανση του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων με τη βοήθεια του θεωρήματος Π.1.4 και της σχέσης (3.15) είναι αντίστοιχα

$$n_{ph-e} = n_p \times n_{pc} = n_p \times \eta \quad (3.16)$$

$$\sigma_{ph-e}^2 = n_{pc}^2 \times \sigma_p^2 + n_p \times \sigma_{pc}^2 = \eta^2 \times n_p + n_p \times (\eta - \eta^2) = n_p \times \eta = n_{ph-e}$$

Έπειτα, υποτίθεται ότι ένα αρχικό (primary) φωτοηλεκτρόνιο προσπίπτει στην πρώτη δύνοδο του PMT και δευτερεύοντα ηλεκτρόνια μέσου πλήθους $\delta_1 = \delta$ και διακύμανσης $(\sigma_{\delta,1})^2 = \delta$ θα εκπεμφθούν. Αυτά ηλεκτρόνια θα προσπέσουν στη δεύτερη δύνοδο. Με την πρόσπτωση ενός ηλεκτρονίου στη δεύτερη δύνοδο με ίδια χαρακτηριστικά με την πρώτη είναι δυνατό να γεννηθούν ηλεκτρόνια μέσου πλήθους $\delta_2 = \delta$ και διακύμανσης $(\sigma_{\delta,2})^2 = \delta$, ακριβώς όπως και στην προηγούμενη δύνοδο. Οι δύο δύνοδοι δημιουργούν μία αλληλουχία γεγονότων, που είναι οι δύο διαδοχικές ενισχύσεις. Το μέσο κέρδος και η διακύμανσή του από την αλληλουχία των δύο δυνόδων θα είναι και πάλι με τη βοήθεια του θεωρήματος Π.1.4

$$g_2 = \delta_1 \times \delta_2 \quad (3.17)$$

$$\sigma_{g,2}^2 = \delta_2^2 \times \sigma_{\delta,1}^2 + \delta_1 \times \sigma_{\delta,2}^2$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, μετά την πρόσπτωση των ηλεκτρονίων στην τρίτη δύνοδο, το μέσο κέρδος ανά προσπίπτον ηλεκτρόνιο θα είναι $\delta_3 = \delta$ και η διακύμανση $(\sigma_{\delta,3})^2 = \delta$. Για την αλληλουχία των δύο πρώτων δυνόδων με την τρίτη δύνοδο, το μέσο κέρδος και η διακύμανση θα είναι

$$\begin{aligned}
 g_3 &= g_2 \times \delta_3 = \delta_1 \times \delta_2 \times \delta_3 \\
 \sigma_{g,3}^2 &= \delta_3^2 \times \sigma_{g,2}^2 + g_2 \times \sigma_{\delta,3}^2 = \delta_3^2 \times (\delta_2^2 \times \sigma_{\delta,1}^2 + \delta_1 \times \sigma_{\delta,2}^2) + \delta_1 \times \delta_2 \times \sigma_{\delta,3}^2 = \\
 &= \delta_1^2 \times \delta_2^2 \times \delta_3^2 \times \left(\frac{\sigma_{\delta,1}^2}{\delta_1^2} + \frac{\sigma_{\delta,2}^2}{\delta_1 \times \delta_2^2} + \frac{\sigma_{\delta,3}^2}{\delta_1 \times \delta_2 \times \delta_3^2} \right)
 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Μετά από k ενισχυτικές βαθμίδες στον PMT, το μεταβαλλόμενο κέρδος της αλληλουχίας των ενισχύσεων θα έχει μέση τιμή και διακύμανση

$$\begin{aligned}
 G &= \delta_1 \times \delta_2 \times \dots \times \delta_k \\
 \sigma_G^2 &= \sigma_{g,k}^2 = \delta_1^2 \times \delta_2^2 \times \dots \times \delta_k^2 \times \left(\frac{\sigma_{\delta,1}^2}{\delta_1^2} + \frac{\sigma_{\delta,2}^2}{\delta_1 \times \delta_2^2} + \dots + \frac{\sigma_{\delta,k}^2}{\delta_1 \times \delta_2 \times \dots \times \delta_{k-1} \times \delta_k^2} \right)
 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Υπό την υπόθεση ότι όλες οι δύνοδοι έχουν ίδια χαρακτηριστικά και κέρδος που ακολουθεί την ίδια κατανομή (Poisson), με μέση τιμή $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_k = \delta$ και διακύμανση $(\sigma_{\delta,1})^2 = (\sigma_{\delta,2})^2 = \dots = (\sigma_{\delta,k})^2 = \delta$, καθώς επίσης θεωρώντας $1/G \ll 1$ για μεγάλες τιμές του G , τότε η (3.19) γίνεται

$$\begin{aligned}
 G &= \delta \times \delta \times \dots \times \delta = \delta^k \\
 \sigma_G^2 &= \underbrace{\delta^2 \times \delta^2 \times \dots \times \delta^2}_{k \text{ ΦΟΡΕΣ}} \times \left(\frac{\delta}{\delta^2} + \frac{\delta}{\delta \times \delta^2} + \dots + \frac{\delta}{\underbrace{\delta \times \delta \times \dots \times \delta}_{k-1 \text{ ΦΟΡΕΣ}} \times \delta^2} \right) = \\
 &= \delta^{2 \times k} \times \frac{1}{\delta} \times \left(1 + \frac{1}{\delta} + \dots + \frac{1}{\delta^{k-1}} \right) = G^2 \times \frac{1}{\delta} \times \frac{1}{\frac{1}{\delta} - 1} - 1 \\
 &= G^2 \times \frac{1}{\delta} \times \frac{1}{\frac{1}{\delta} - 1} \stackrel{1/G \ll 1}{\approx} G^2 \times \frac{1}{\delta} \times \frac{-1}{\frac{1}{\delta} - 1} = G^2 \times \frac{-1}{1 - \delta} = G^2 \times \frac{1}{\delta - 1}
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

Θεωρώντας τον PMT σαν ένα πλήρες σύστημα, δημιουργείται μία ακολουθία που αποτελείται από το μεταβαλλόμενο πλήθος φωτοηλεκτρονίων και το μεταβαλλόμενο κέρδος του PMT. Τα φωτοηλεκτρόνια που αφικνούνται στην άνοδο του PMT σε ένα διάστημα αποτελούν μία τυχαία μεταβλητή. Το μέσο πλήθος φωτοηλεκτρονίων και η διακύμανση αυτού του πλήθους στην άνοδο του PMT σε ένα χρονικό διάστημα τ προκύπτει με τη βοήθεια του θεωρήματος Π.1.4 και θα είναι:

$$\begin{aligned}
 N_{mean} &= G \times n_{ph-e} = G \times \eta \times n_p \\
 \sigma_{N,mean}^2 &= G^2 \times \sigma_{ph-e}^2 + n_{ph-e} \times \sigma_G^2 = G^2 \times \eta \times n_p + \eta \times n_p \times G^2 \times \frac{1}{\delta - 1} = \\
 &= G^2 \times \eta \times n_p \times \left(1 + \frac{1}{\delta - 1} \right) = G^2 \times \eta \times n_p \times \frac{\delta}{\delta - 1}
 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Η παράμετρος $F = \delta/(\delta - 1)$ ονομάζεται παράγοντας περίσσιου θορύβου (excess noise factor) του PMT. Μένοντας προσωρινά στη (3.21), παρατηρούμε ότι αφού $\delta = G^{1/k}$ από την (3.20), με $\delta > 1$ και $G \gg 1$, αν το ηλεκτρικό SNR στο δέκτη μετά το πέρασμα από την αλληλουχία φώρασης και σταδίων ενίσχυσης τεθεί $SNR_{el.} = (N_{mean})^2 / (\sigma_{N,mean})^2$ [161], τότε $SNR_{el.} = \eta \times n_p / \{\delta / (\delta - 1)\}$. Ο αντίστοιχος λόγος μετά τη φωτοκάθοδο του φωτοφωρατή και πριν τα στάδια ενίσχυσης από την (3.16) θα είναι $SNR_{el.,ph-e} = \eta \times n_p$,

δηλαδή μεγαλύτερος από ότι μετά την ενίσχυση. Επιπλέον, αλλαγή του κέρδους ακόμα και κατά μία τάξη μεγέθους δεν αλλάζει σημαντικά το ηλεκτρικό SNR, καθώς πρέπει $\delta \gg 1$ για να προκύψει $SNR_{el.} \approx SNR_{el.,ph-e}$. Ωστόσο, η απαραίτητη ενισχυτική μονάδα θα αναδείξει το σήμα ώστε να είναι δυνατή η αξιοποίησή του αντισταθμίζοντας τις τεράστιες απώλειες του μέσου, τη χαμηλή απόδοση του οπτικού φίλτρου και όλες τις συνιστώσες ηλεκτρικού θορύβου στο δέκτη, παρά το γεγονός ότι το SNR στην είσοδο της ενισχυτικής μονάδας είναι μεγαλύτερο από ότι στην έξοδο, όπως είναι φυσιολογικό.

Τροποποιώντας ελαφρώς τις εξισώσεις της (3.21), προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} N_{mean} &= \frac{G}{q} \times \frac{\eta \times q}{h \times f_c} \times \frac{h \times f_c \times n_p}{\tau} \times T = \frac{G \times \mathfrak{R} \times P_{mean} \times T}{q} \\ \sigma_{N,mean}^2 &= \frac{G^2 \times F}{q} \times \frac{\eta \times q}{h \times f_c} \times \frac{h \times f_c \times n_p}{\tau} \times T = \frac{G^2 \times F \times \mathfrak{R} \times P_{mean} \times T}{q} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Στις προηγούμενες εξισώσεις, q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, P_{mean} είναι το μέσο επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος όταν ένα οπτικό φίλτρο που αφήνει να περάσει το ωφέλιμο σήμα χωρίς απώλειες, δηλαδή έχει απόδοση ίση με τη μονάδα (transmittance = 1), είναι τοποθετημένο μπροστά από τον PMT (Σχήμα 3.7), h είναι η σταθερά του Planck και f_c είναι η κεντρική συχνότητα που των μεταδόσεων. \mathfrak{R} είναι η αποκρισιμότητα του PMT, με $\mathfrak{R} = \eta \times q / (h \times f_c)$. Όσον αφορά το αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή του φιλτραρίσματος Integration-and-dump, το οποίο αποτελεί διαδικασία μέτρησης φωτοηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων διαστημάτων, τότε το διάστημα τ καλύπτει τη διάρκεια ενός bit (T_{bit}) για την περίπτωση που το λαμβανόμενο σήμα είναι διαμορφωμένο κατά OOK ή τη διάρκεια μίας θυρίδας (T_{slot}) για την περίπτωση που λαμβάνονται M -PPM σήματα. Παράδειγμα έχει δοθεί στο Σχήμα 3.17 για το 4-PPM.

Όταν θεωρηθεί OOK με NRZ παλμούς, P_1 και N_1 είναι το επίπεδο οπτικής ισχύος και τα φωτοηλεκτρόνια στην άνοδο του PMT, αντίστοιχα, που αντιστοιχούν στο bit "1", ενώ P_0 και N_0 είναι το επίπεδο οπτικής ισχύος και τα φωτοηλεκτρόνια, αντίστοιχα, για το bit "0". Για ένα ρυθμό bit R_b , η διάρκεια του bit είναι $T_{bit} = 1/R_b$ και σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή της (3.22), τα φωτοηλεκτρόνια N_1 σχετίζονται με την ισχύ P_1 μέσω της σχέσης $N_1 = G \times \mathfrak{R} \times P_1 \times T_{bit} / q$. Όταν θεωρηθεί ότι υπάρχει μόνο ο θόρυβος βολής του ίδιου του σήματος στο δέκτη, χωρίς να υπάρχει κάποια συνιστώσα θορύβου από το περιβάλλον, τότε η διακύμανση του θορύβου για το bit "1" γίνεται $(\sigma_{N,1})^2 = G^2 \times F \times \mathfrak{R} \times P_1 \times T_{bit} / q$. Επιπλέον, $N_0 = 0$, $P_0 = 0$ και $(\sigma_{N,0})^2 = 0$ ($P_0/P_1 = 0$). Τότε, όμως, $P_{mean} = P_1/2$, $N_{mean} = N_1/2$, $(\sigma_{N,mean})^2 = (\sigma_{N,1})^2/2$ και το ηλεκτρικό SNR στο δέκτη θα είναι $SNR_{el.} = (N_{mean})^2 / (\sigma_{N,mean})^2$ [161]. Θέτοντας βέλτιστο κατώφλι και ξεκινώντας από μία προσέγγιση ηλεκτρικών ρευμάτων [158], το BER συναρτήσει του ηλεκτρικού SNR προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{e,OOK} &= Q\left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}\right) = Q\left(\frac{\frac{N_1}{T_{bit}} \times q - \frac{N_0}{T_{bit}} \times q}{\frac{\sigma_{N,1}}{T_{bit}} \times q + \frac{\sigma_{N,0}}{T_{bit}} \times q}\right) = Q\left(\frac{N_1}{\sigma_{N,1}}\right) = \\ &= Q\left(\frac{\frac{G \times \mathfrak{R} \times P_1 \times T_{bit}}{q}}{\sqrt{\frac{G^2 \times F \times \mathfrak{R} \times P_1 \times T_{bit}}{q}}}\right) = Q\left(\frac{\frac{G \times \mathfrak{R} \times 2 \times P_{mean} \times T_{bit}}{q}}{\sqrt{\frac{G^2 \times F \times \mathfrak{R} \times 2 \times P_{mean} \times T_{bit}}{q}}}\right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= Q \left(\frac{\sqrt{4 \times \left(\frac{G \times \mathfrak{R} \times P_{mean} \times T_{bit}}{q} \right)^2}}{\sqrt{2 \times \frac{G^2 \times F \times \mathfrak{R} \times P_{mean} \times T_{bit}}{q}}} \right) = Q \left(\sqrt{2 \times \frac{N_{mean}^2}{\sigma_{N,mean}^2}} \right) = \\
 &= Q \left(\sqrt{2 \times SNR_{el.}} \right)
 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Αν η μόνη παρούσα συνιστώσα θορύβου στο δέκτη ήταν ο θερμικός θόρυβος, τότε $(\sigma_{N,1})^2 = (\sigma_{N,0})^2 = 2 \times k_B \times T_K \times T_{bit} / (R_L \times q^2)$ [162], όπου k_B είναι η σταθερά Boltzmann, T_K είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και R_L είναι η αντίσταση φόρτου. Τότε $P_{e,OOK} = Q(SNR_{el.}^{0.5})$. Τονίζεται ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των μεταδόσεων των σημάτων που είναι διαμορφωμένα κατά NRZ-OOK όταν στο δέκτη υπάρχει τόσο ο θερμικός θόρυβος όσο και ο θόρυβος βολής (του σήματος και του περιβάλλοντος) θα δώσουν τιμές BER σε συνάρτηση του ηλεκτρικού SNR που θα βρίσκονται μεταξύ των $Q((2 \times SNR_{el.})^{0.5})$ και $Q(SNR_{el.}^{0.5})$.

Το κριτήριο μέγιστης πιθανοφάνειας του 4-PPM αναμένεται να προσφέρει καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά τις απαιτούμενες τιμές ηλεκτρικού SNR για συγκεκριμένες τιμές BER από ότι το OOK, αφού είναι βέλτιστο σχήμα φώρασης. Για το M -PPM, όταν η μόνη συνιστώσα θορύβου που είναι παρούσα στο δέκτη είναι ο θόρυβος βολής (του σήματος), η λαμβανόμενη οπτική ισχύς κορυφής που αντιστοιχεί σε μία θυρίδα με παλμό θα είναι P_{peak} και το επίπεδο ισχύος που αντιστοιχεί σε μία θυρίδα χωρίς παλμό θα είναι $P_{empty} = 0$ ($P_{empty}/P_{peak} = 0$), αντίστοιχα με τη θεώρηση στην παράγραφο 3.2.3.1. Η μέση λαμβανόμενη οπτική ισχύς, P_{mean} , σχετίζεται με την ισχύ κορυφής (P_{peak}) μέσω της εξίσωσης:

$$P_{mean} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_{M-PPM}(t) dt \right) = \frac{1}{T_{PPM, symbol}} \int_0^{T_{slot}} P_{peak} dt = \frac{P_{peak}}{M} \quad (3.24)$$

όπου $x_{M-PPM}(t)$ είναι ένα σήμα διαμορφωμένο κατά M -PPM, $T_{PPM, symbol}$ είναι η διάρκεια ενός M -PPM συμβόλου και T_{slot} είναι η διάρκεια μίας θυρίδας από τις M του M -PPM συμβόλου η οποία είναι ίση με $T_{slot} = T_{PPM, symbol} / M = \log_2(M) / (M \times R_b)$. Τα φωτοηλεκτρόνια που αντιστοιχούν στο επίπεδο ισχύος κορυφής είναι $N_{peak} = G \times \mathfrak{R} \times P_{peak} \times T_{slot} / q^*$. Η διακύμανση του θορύβου βολής για τη διάρκεια μίας θυρίδας θα είναι $(\sigma_{N,peak})^2 = G^2 \times F \times \mathfrak{R} \times P_{peak} \times T_{slot} / q$. Η αντίστοιχη διακύμανση για μία άδεια θυρίδα είναι $(\sigma_{N,empty})^2 = 0$. Τότε, το μέσο πλήθος φωτοηλεκτρονίων θα είναι $N_{mean} = N_{peak} / M$ και η αντίστοιχη διακύμανση του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων θα είναι $(\sigma_{N,mean})^2 = (\sigma_{N,peak})^2 / M$. Όπως και πριν, $SNR_{el.} = (N_{mean})^2 / (\sigma_{N,mean})^2$. Αρχικά, η ελάχιστη ευκλείδεια απόσταση δύο οποιωνδήποτε M -PPM συμβόλων στο M -διαστάσεων χώρο σε $(A^2/Hz)^{0.5\ddagger}$ είναι [163]:

* Αντίστροφα, αν θεωρηθεί μηδενική αλληλο-παρεμβολή συμβόλων και ξεκινήσαμε από το γεγονός ότι με την πώση της ισχύος λόγω των απωλειών και ανάδειξη της κβαντικής φύσης του φωτός, με n'_p φωτόνια στη διάρκεια μίας θυρίδας ενός M -PPM σήματος, τότε η ισχύς κορυφής σε αυτή τη θυρίδα θα ήταν ίση με $P_{peak} = (n'_p \times h \times f_c) / T_{slot}$. Ορθότερα, η P_{peak} θα ισοδυναμούσε με την ισχύ ενός «εκφυλισμένου» παλμού. Επιπροσθέτως, από την (3.21) θα ίσχυε ότι $N_{peak} = G \times \eta \times n'_p$ και θα προέκυπτε ότι το μέσο πλήθος φωτονίων (ανά σύμβολο) θα ήταν ίσο με $N_{mean} = \{N_{peak} \times T_{slot} + (M-1) \times N_{empty} \times T_{slot}\} / T_{symbol} = N_{peak} \times T_{slot} / T_{symbol}$ με $N_{empty} = 0$ και $n_p = n'_p \times T_{slot} / T_{symbol}$. Η μέση ισχύς που θα αντιστοιχούσε σε ένα M -PPM σύμβολο (και κατ' επέκταση η μέση ισχύς ενός M -PPM σήματος) θα είναι $P_{mean} = (n_p \times h \times f_c) / T_{slot}$, διότι σε καθεμία από τις M θυρίδες θα αντιστοιχούσαν κατά μέσο όρο n_p φωτόνια. Αντικαθιστώντας τα φωτόνια n_p στην P_{mean} , προκύπτει $P_{mean} = (n'_p \times h \times f_c) / T_{symbol} = P_{peak} / M$. Φαίνεται ότι η καταχρηστική χρήση ολοκληρωμάτων οδηγεί στα ίδια ακριβώς αποτελέσματα, όπως φαίνεται και από την (3.24).

† Πιο σωστά πρόκειται για μονάδες $(W/Hz)^{0.5}$, αλλά για κανονικοποιημένη φασματική πυκνότητα της ηλεκτρικής ισχύος έχουμε όμοια $(A^2/Hz)^{0.5}$.

$$\begin{aligned}
 d_{\min, M-PPM}(I_{\text{symbol},i}, I_{\text{symbol},i+1}) &= \min \left\{ \sqrt{(I_{\text{symbol},i} - I_{\text{symbol},i+1})^2 \times R_L \times T_{\text{slot}}} \right\} = \\
 &= \min \left\{ \sqrt{I_{\text{peak}}^2 \times R_L \times T_{\text{slot}} + I_{\text{peak}}^2 \times R_L \times T_{\text{slot}}} \right\}^{R_L=1\Omega} = \quad (3.25) \\
 &= \sqrt{2 \times I_{\text{peak}}^2 \times T_{\text{slot}}}
 \end{aligned}$$

όπου $I_{\text{symbol},i}$ και $I_{\text{symbol},i+1}$ είναι τα ηλεκτρικά ρεύματα στην άνοδο του PMT που αντιστοιχούν σε δύο M -PPM σύμβολα, $R_L = 1 \Omega$ είναι η αντίσταση φόρτου και $I_{\text{peak}} = N_{\text{peak}} \times q / T_{\text{slot}}$ είναι το ρεύμα κορυφής για ένα παλμό στη διάρκεια μίας θυρίδας. Από τις [163], [164] και υπό την παρουσία μόνο της συνιστώσας του θορύβου βολής του σήματος, η πιθανότητα σφάλματος bit σε συνάρτηση του ηλεκτρικού SNR μπορεί να αποδειχτεί ότι είναι:

$$\begin{aligned}
 P_{e, M-PPM} &= \frac{M}{2 \times (M-1)} \times Q \left(\frac{d_{\min, M-PPM}(I_{\text{symbol},i}, I_{\text{symbol},i+1})}{\sqrt{2 \times \sigma_{\text{peak}, \text{psd}}}} \right) = \\
 &= \frac{M}{2 \times (M-1)} \times Q \left(\frac{\sqrt{2 \times I_{\text{peak}}^2 \times T_{\text{slot}}}}{\sqrt{2 \times \sigma_{N, \text{peak}} \times q / \sqrt{T_{\text{slot}}}}} \right) = \\
 &= \frac{M}{2 \times (M-1)} \times Q \left(\sqrt{\frac{2 \times \left(N_{\text{peak}} \times \frac{q}{T_{\text{slot}}} \right)^2 \times T_{\text{slot}}}{2 \times \sigma_{N, \text{peak}}^2 \times \frac{q^2}{T_{\text{slot}}}}} \right) = \quad (3.26) \\
 &= \frac{M}{2 \times (M-1)} \times Q \left(\sqrt{\frac{(M \times N_{\text{mean}})^2}{M \times \sigma_{N, \text{mean}}^2}} \right) = \frac{M}{2 \times (M-1)} \times Q \left(\sqrt{M \times \frac{N_{\text{mean}}^2}{\sigma_{N, \text{mean}}^2}} \right) = \\
 &= \frac{M}{2 \times (M-1)} \times Q \left(\sqrt{M \times \text{SNR}_{\text{el.}}} \right)
 \end{aligned}$$

Η ποσότητα $\sigma_{\text{peak}, \text{psd}} = \sigma_{N, \text{peak}} \times q / (T_{\text{slot}})^{0.5}$ είναι η τετραγωνική ρίζα της κανονικοποιημένης φασματικής πυκνότητας της ηλεκτρικής ισχύος του θορύβου σε $(A^2/\text{Hz})^{0.5}$.

Ο ρυθμός σφαλμάτων bits σε συνάρτηση του SNR εκτιμήθηκε και για τα σχήματα πολλαπλών φερόντων. Προηγουμένως, αναφέρθηκε ότι τα σχήματα ACO-OFDM και Flip-OFDM έχουν τις ίδιες επιδόσεις όσον αφορά το απαιτούμενο SNR για συγκεκριμένες τιμές BER ($P_{e, \text{ACO-OFDM}} = P_{e, \text{Flip-OFDM}}$). Καθένα υποφέρειν διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας Q-PSK με ταυτόχρονη εφαρμογή κωδικοποίησης gray. Με βάση τις υποθέσεις που έχουν ήδη αναφερθεί, χωρίς κάποια άλλη συνιστώσα θορύβου εκτός από το θόρυβο βολής του ίδιου του σήματος, το BER για 4-QAM που είναι ίδιο με το Q-PSK, θα είναι [157]

$$\begin{aligned}
 P_{e, \text{ACO-OFDM}} &= \frac{4}{\log_2(M)} \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \times Q \left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \times \frac{E_{\text{sym}}}{\sigma_{n, \text{psd}}^2}} \right)^{M=4} = \\
 &= Q \left(\sqrt{\frac{E_{\text{sym}}}{\sigma_{n, \text{psd}}^2}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{\int_0^\infty |X(f)|^2 df}{\sigma_{n, \text{psd}}^2}} \right) \quad (3.27)
 \end{aligned}$$

όπου $(\sigma_{n,psd})^2$ αντιπροσωπεύει τη φασματική πυκνότητα ηλεκτρικής ισχύος του θορύβου βολής που οφείλεται στο ίδιο το σήμα (από όλα τα υποφέροντα), σε W/Hz, ενώ ο αριθμητής $|X(f)|^2$ είναι η φασματική πυκνότητα ενέργειας του (ηλεκτρικού) σήματος στο δέκτη σε J/Hz [163]. Προφανώς, το ολοκλήρωμα στην (3.27) αντιπροσωπεύει την ενέργεια του OFDM συμβόλου (E_{sym}). Σύμφωνα με την [165] και με βάση την απόδειξη στην παράγραφο Π.3 του παραρτήματος, η μέση οπτική ισχύς ενός ACO-OFDM σήματος (P_{mean}) σχετίζεται με την ηλεκτρική ισχύ ($P_{mean sq. elec., ACO}$) του ίδιου του ACO-OFDM σήματος μέσω της εξίσωσης:

$$P_{mean} = \sqrt{\frac{P_{mean sq. elec., ACO}}{\pi}} \quad (3.28)$$

Από τις (3.27) και (3.28), ο ρυθμός σφαλμάτων bits των ACO-OFDM και Flip-OFDM μπορούν να εκφραστούν σα συνάρτηση του ηλεκτρικού SNR όπως έγινε και με τα άλλα σχήματα διαμόρφωσης. Το πρώτο βήμα είναι η τροποποίηση του αριθμητή της (3.27) σε ισοδύναμο επίπεδο ισχύος. Θεωρώντας όλα τα υποφέροντα, συμπεριλαμβάνοντας ακόμα και τα άρτια υποφέροντα που δεν φέρουν χρήσιμα δεδομένα, κάθε υποφέρον έχει και κάποιο αντίστοιχο επίπεδο ενέργειας που αντιπροσωπεύεται από την ποσότητα $E_{sym,subc.i}$. Καθώς το σήμα περνά μέσα από το κανάλι, καθένα υποφέρον i θα υποστεί την επίδραση από κάποια αντίστοιχη απόκριση συχνότητας $H_i(f)$. Σε μία τέτοια περίπτωση, η ενέργεια στην πλευρά του δέκτη για το υποφέρον i θα είναι $E_{sym,subc.i} \times |H_i(f)|^2$. Επιπροσθέτως, αν αυτή η ποσότητα πολλαπλασιαστεί με την απόσταση διαδοχικών υποφερόντων Δf , η ηλεκτρική ισχύς για το υποφέρον i μπορεί να υπολογισθεί. Το άθροισμα αυτών των γινομένων δίνει την ηλεκτρική ισχύ του λαμβανόμενου ACO-OFDM $x_{elec.ACO}(t)$, δηλαδή $P_{mean sq. elec., ACO} = E[(x_{elec.ACO}(t))^2]$, σε μονάδες A^2 θεωρώντας τη ως μία τιμή κανονικοποιημένης ισχύος. Ο πολλαπλασιασμός του παρονομαστή της (3.27) $(\sigma_{n,psd})^2$ επί Δf έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτρική ισχύ του θορύβου βολής $(\sigma_{sh.,mean})^2$ εκφρασμένη σε A^2 σαν κανονικοποιημένη ισχύ, δηλαδή $(\sigma_{sh.,mean})^2 = q \times G^2 \times F \times \Re \times P_{mean} \times BW_{el}$, όπου BW_{el} είναι το εύρος ζώνης του δέκτη, το οποίο για το σχήμα ACO-OFDM είναι περίπου ίσο με $BW_{el} \approx 2 \times N_{us} / T_{use. symb. dur.} = 2 \times N_{us} \times \Delta f$ καθώς αξιοποιούνται τα μισά υποφέροντα, θεωρώντας ταυτόχρονα μηδενικό κυκλικό πρόθεμα ($T_{cp} = 0$) σε ένα κανάλι χωρίς διάχυση. Στον τύπο της διακύμανσης $(\sigma_{sh.,mean})^2$ χρησιμοποιείται η P_{mean} καθώς ο θόρυβος είναι μία στοχαστική διεργασία με μέση τιμή μηδέν και η ισχύς της (διεργασίας του θορύβου) είναι η μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής που αντιπροσωπεύει τις μέσες τιμές ισχύος καθεμίας από τις πραγματοποιήσεις της διεργασίας (του θορύβου) [163]. Υπό αυτές τις συνθήκες, το ηλεκτρικό SNR θα οριστεί ως $SNR_{el.} = (G \times \Re \times P_{mean})^2 / (\sigma_{sh.,mean})^2$ και ο ρυθμός σφαλμάτων bits των ACO-OFDM και Flip-OFDM σα συνάρτηση του SNR θα είναι με τη βοήθεια της (3.28)

$$\begin{aligned} P_{e,ACO-OFDM} &= Q \left(\sqrt{\frac{\int_0^\infty |X(f)|^2 df}{\sigma_{n,psd}^2}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N_{sub}-1} E_{sym,subc.i} \times |H_i(f)|^2 \times \Delta f}{\sigma_{n,psd}^2 \times \Delta f}} \right) = \\ &= Q \left(\sqrt{\frac{E[x_{elec.ACO}^2(t)]}{\sigma_{sh.,mean}^2}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{(G \times \Re \times P_{mean} \times \sqrt{\pi})^2}{q \times G^2 \times F \times \Re \times P_{mean} \times BW_{el.}}} \right) = (3.29) \\ &= Q \left(\sqrt{\pi \times SNR_{el.}} \right) \end{aligned}$$

Θεωρήθηκε ότι η μέση οπτική ισχύς ενός ACO-OFDM σήματος (P_{mean}) είναι η λαμβανόμενη τιμή ισχύος και $E[(x_{elec.ACO}(t))^2]$ είναι η ηλεκτρική ισχύς του σήματος. Από την (3.28) εννοήθηκε ότι $G = 1$, $\mathfrak{R} = 1$ A/W και ορθότερα θα έπρεπε να γραφεί ότι $(G \times \mathfrak{R} \times P_{mean})^2 = P_{mean sq. elec., ACO} / \pi$.

Από τους αναλυτικούς τύπους που προέκυψαν για κανάλια χωρίς ISI και υπό την επίδραση μόνο του θορύβου βολής ως συνιστώσα θορύβου στο δέκτη, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι καλύτερες επιδόσεις επιτυγχάνονται από το 4-PPM. Αυτό σημαίνει ότι με το 4-PPM, ο ίδιος ρυθμός σφαλμάτων bits μπορεί να επιτευχθεί για χαμηλότερες τιμές του SNR από αυτές που απαιτούνται για τα άλλα σχήματα διαμόρφωσης. Ανάμεσα στο OOK με NRZ παλμούς και στα ACO-OFDM, Flip-OFDM, οι εκδοχές σημάτων με πολλαπλές φέρουσες έχουν λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις σε SNR. Κάτι που πρέπει να τονιστεί είναι ότι η μικρότερη τιμή SNR για το 4-PPM ισχύει όταν το εύρος ζώνης του δέκτη είναι επαρκές, επειδή το εύρος ζώνης του 4-PPM είναι σχεδόν διπλάσιο του εύρους ζώνης του OOK με NRZ παλμούς και σχεδόν διπλάσιο των ACO και Flip-OFDM.

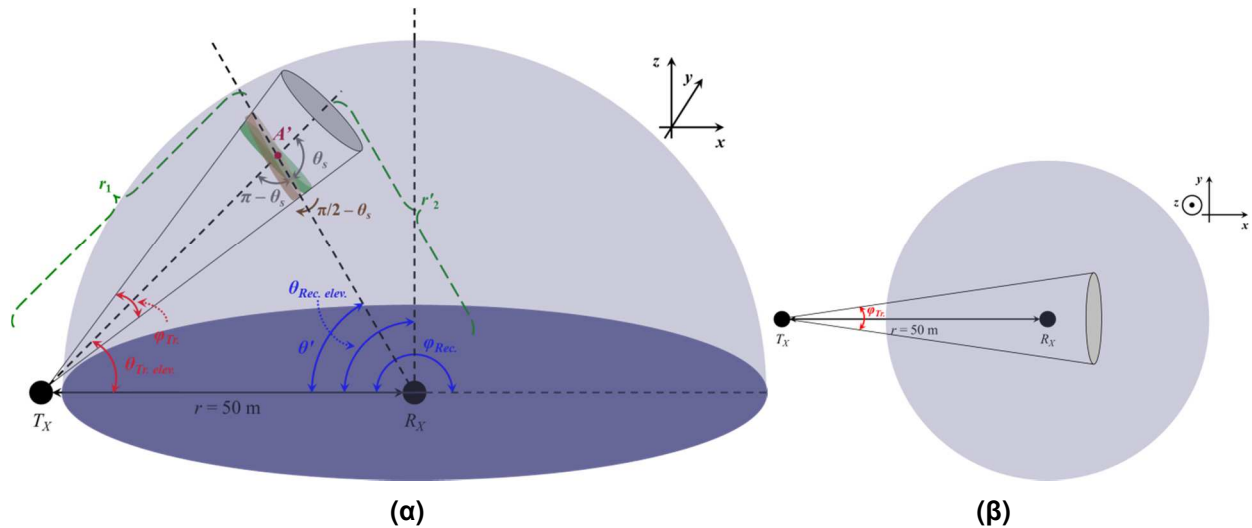
3.2.4 Αριθμητικά αποτελέσματα για το κανάλι

3.2.4.1 Εκτιμήσεις κρουστικών αποκρίσεων, αποκρίσεων συχνότητας και απωλειών καναλιών με εφαρμογή του μοντέλου μονής σκέδασης

Με βάση την περιγραφή του εδαφίου 3.2.2, αρχικά θα δοθούν εκτιμήσεις των απωλειών και των κρουστικών αποκρίσεων εφαρμόζοντας το μοντέλο της μονής σκέδασης. Θεωρήθηκε μία γεωμετρία ζεύξης όπου ο πομπός ήταν τέλεια προσανατολισμένος με το δέκτη. Από την άλλη πλευρά της ζεύξης, ο δέκτης θεωρήθηκε ότι μπορούσε να λάβει φωτόνια από όλες τις κατευθύνσεις έχοντας FOV ίσο με 180° και, όπως είναι αναμενόμενο, γωνία ανύψωσης 90° . Πρόκειται για ένα θεωρητικό σενάριο, όπου από τη μία μετριάζονται οι απώλειες επειδή ο δέκτης έχει τη δυνατότητα να μη χάσει φωτόνια επειδή ο κοινός όγκος με την δέσμη του πομπού είναι ιδιαίτερα ευρύς, αλλά από την άλλη εισέρχεται ένας περιορισμός στο εύρος ζώνης [14] επειδή είναι πιθανό να φθάσουν στο δέκτη φωτόνια μετά από μία σκέδαση που συνέβη σε αρκετά μακρινή απόσταση, διότι η σκέδαση σίγουρα θα έχει συμβεί μέσα στον κοινό όγκο. Ένα τέτοιο σενάριο θα είχε εφαρμογή σε ένα περιβάλλον όπου οι απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης είναι χαμηλές, και πιο συγκεκριμένα της τάξης των kbit/s, και ταυτόχρονα ο δέκτης υπό οποιαδήποτε διεύθυνση είναι τέλεια ευθυγραμμισμένος, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη να χρησιμοποιηθούν πολλαπλοί φωτοφωρατές με τον καθένα να καλύπτει διαφορετικές περιοχές στο χώρο που «βλέπει» ο δέκτης. Η τελευταία λύση θα αύξανε την πολυπλοκότητα και το κόστος, ενώ δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι στο φάσμα των μεταδόσεων είναι ελαχιστοποιημένος ο θόρυβος περιβάλλοντος και το οπτικό φίλτράρισμα μπορεί να απομονώσει θόρυβο υποβάθρου από γειτονικές μπάντες. Άρα, ένας δέκτης με πολύ μεγάλο FOV δεν επιβαρύνεται σημαντικά από θόρυβο λόγω της ακτινοβολίας του ηλίου στην περιοχή των 265 nm. Άλλο επιχείρημα που δικαιολογεί τη θεώρηση δέκτη με πολύ ευρύ FOV είναι ότι έχει ήδη κατασκευαστεί συγκεντρωτής (concentrator) με αζιμούθιο 360° και γωνίες ανύψωσης μεταξύ -20° και 60° [166]. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα της μεγάλης γωνίας θέασης είναι οι πιθανές παρεμβολές και η ανάγκη αντιμετώπισής τους σε ένα δικτυακό περιβάλλον όπου πολλαπλοί πομποί μπορεί να εκπέμπουν ταυτόχρονα προς το δέκτη.

Επιστρέφοντας στις συνθήκες οι οποίες θεωρήθηκαν ως είσοδοι στο μοντέλο μονής σκέδασης, για FOV ίσο με 180° , από την (3.4) φαίνεται ότι $dG_r = \cos(\xi)$. Η γωνία ανύψωσης και απόκλισης της δέσμης του πομπού τέθηκαν 45° και 10° , αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη τέθηκε ίση με 50 μέτρα και το μήκος κύματος εκπομπής 265 nm. Για τις ανάγκες της εξεταζόμενου σεναρίου, το Σχήμα 3.12

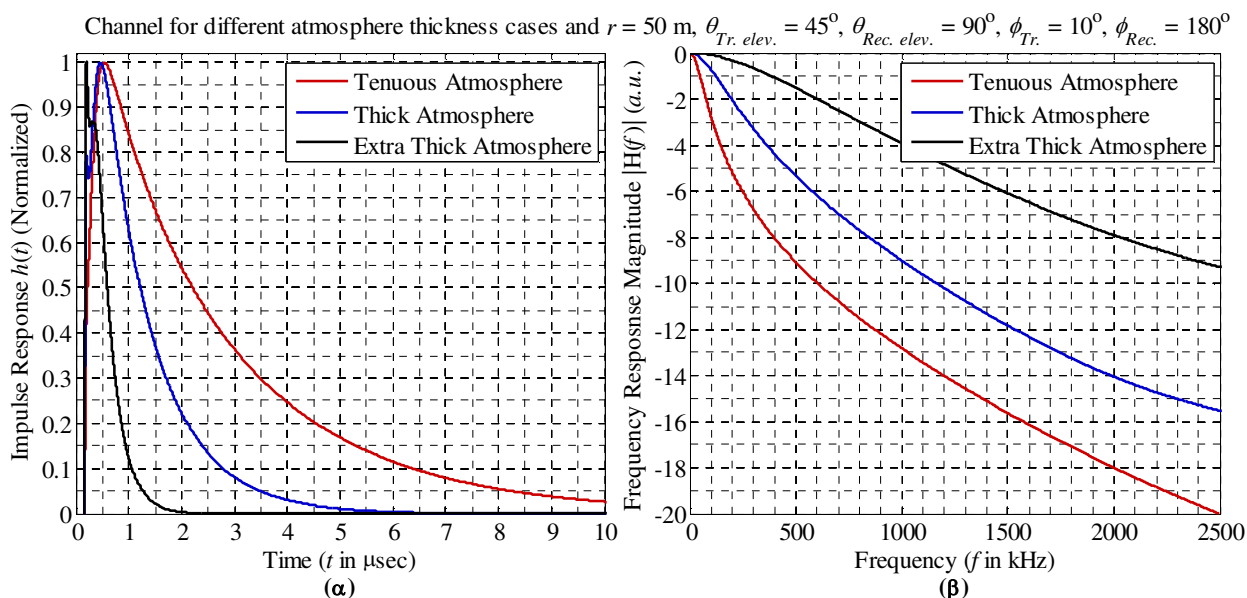
τροποποιείται στο Σχήμα 3.20(α). Το Σχήμα 3.20(β) αποτελεί κάτοψη του προηγούμενου σχήματος. Εξαιτίας της μεθόδου μονής σκέδασης που υιοθετήθηκε, ένα φωτόνιο θα καλύψει απόσταση r_1 από την πηγή προτού σκεδαστεί κατά μία γωνία θ_s σε σχέση με τον τρέχοντα άξονα διάδοσης, ώστε να κινηθεί προς το δέκτη. Η ευθεία που συνδέει το κέντρο σκέδασης με το δέκτη και η ευθεία που συνδέει πομπό και δέκτη σχηματίζουν γωνία θ' . Από απλή γεωμετρία προκύπτει ότι $\theta_s = \theta_{Tr. elev.} + \theta'$. Η απόσταση από το σημείο σκέδασης ως το φωτοφωρατή είναι r'_2 . Επιπλέον, προκύπτει ότι για $dG_r = \cos(\xi)$, $\xi = \theta_{Rec. elev.} - \theta'$, ενώ στην (3.7) οι όγκοι dV προκύπτουν από τους λεπτούς δίσκους (καφέ χρώματος) με ύψος Δx και με επιφάνεια ίση με $A_r/\cos(\pi/2 - \theta_s)$ όπου A_r η επιφάνεια του λεπτού (πράσινου) δίσκου που είναι κάθετος στον άξονα της δέσμης.



Σχήμα 3.20. (α) Απλοποιημένη απεικόνιση της ζεύξης χωρίς οπτική επαφή με έμφαση στην περιγραφή του μοντέλου μονής σκέδασης για FOV = 180°. (β) Κάτοψη της ζεύξης.

Για την περίπτωση αραιής ατμόσφαιρας (tenuous atmosphere), ο συντελεστής σκέδασης Mie και ο συντελεστής απορρόφησης αντλήθηκαν από την αναφορά [149] μετά από εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής για την περίπτωση των 265 nm. Ο συντελεστής σκέδασης Mie εκτιμήθηκε περίπου ίσος με 0.280 km^{-1} , ενώ η εκτίμηση του συντελεστή απορρόφησης ήταν κοντά στην τιμή 0.709 km^{-1} . Ο συντελεστής σκέδασης Rayleigh εκτιμήθηκε για μία τυπική ατμόσφαιρα (1013.25 mb, 15°C) χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της αναφοράς [133], απ' όπου προέκυψε η τιμή 0.247 km^{-1} . Ο παράγοντας αποπόλωσης ρ από τη συνάρτηση φάσης στην (3.1) εκτιμήθηκε περίπου 3.429×10^{-2} με βάση τιμές των πινάκων στην αναφορά [133] για το μήκος κύματος που εξετάζουμε. Οι τιμές που εφαρμόστηκαν για τις παραμέτρους g και f της συνάρτησης φάσης στην (3.2) ήταν 0.72 και 0.5 [145], αντίστοιχα.

Μετά την αριθμητική επίλυση του ολοκληρώματος της (3.7), η κρουστική απόκριση του καναλιού που προέκυψε για την περίπτωση καθαρής ατμόσφαιρας φαίνεται στο Σχήμα 3.21(α) και αναπαρίσταται από την καμπύλη κόκκινου χρώματος. Το αντίστοιχο μέτρο της απόκρισης συχνότητας που αποτελεί το μετασχηματισμό Fourier της κρουστικής απόκρισης απεικονίζεται με την κόκκινη καμπύλη στο Σχήμα 3.21(β). Γι' αυτή τη γεωμετρία πομπού και δέκτη, οι απώλειες εκτιμήθηκαν περίπου ίσες με 100.05 dB/cm^2 χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επιφάνεια του φωτοφωρατή (κανονικοποιημένες απώλειες ως προς την επιφάνεια του φωτοφωρατή). Θεωρώντας ένα φωτοπολλαπλασιαστή με τις ιδιότητες του PMT R7154 της Hamamatsu [167], ο οποίος έχει ενεργό επιφάνεια $8 \times 24 \text{ mm}^2$, οι απώλειες σαν απόλυτη τιμή γίνονται ίσες με 97.22 dB. Από την καμπύλη του μέτρου της απόκρισης συχνότητας, το εύρος ζώνης στα 3 dB του καναλιού εκτιμήθηκε στα 107.17 kHz θεωρώντας το κανάλι σα φίλτρο βασικής ζώνης. Ένα πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει είναι η δυνατότητα υποστήριξης χαμηλών ρυθμών της τάξης των δεκάδων kbit/s όσον αφορά το εύρος ζώνης.



Σχήμα 3.21. (α) Κρουστικές αποκρίσεις και (β) μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας για τρία περιβάλλοντα σκέδασης στα 265 nm.

Η προηγούμενη συμπεριφορά αλλάζει για μία πυκνότερη ατμόσφαιρα. Η διάδοση σε ένα πυκνότερο μέσο με ισχυρότερη δραστηριότητα σκέδασης έχει ως αποτέλεσμα αυξημένα επίπεδα λαμβανόμενης οπτικής ισχύος αρκεί οι αποστάσεις να είναι σχετικά μικρές [150], [168], καθώς η σκέδαση λόγω των μορίων και των μικροσωματιδίων υπερισχύει της απορρόφησης που είναι επίσης αυξημένη. Εκτός από την προβλεπόμενη βελτίωση στο κομμάτι των απωλειών, αξίζει να διερευνηθεί το πώς τροποποιείται η μορφή της κρουστικής απόκρισης με την αλλαγή των χαρακτηριστικών σκέδασης του ασύρματου μέσου. Για ένα πυκνό και για ένα ιδιαίτερα πυκνό ασύρματο μέσο, εκτός από τους συντελεστές σκέδασης Rayleigh, Mie και απορρόφησης, οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων μένουν ως έχουν. Ακολουθώντας την αναφορά [150], για την πυκνή ατμόσφαιρα, οι συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie και ο συντελεστής απορρόφησης τέθηκαν ίσοι με 0.292 km^{-1} , 1.431 km^{-1} , 1.531 km^{-1} , αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών για την ιδιαίτερα πυκνή ατμόσφαιρα ήταν 1.912 km^{-1} , 7.648 km^{-1} και 1.684 km^{-1} . Η αριθμητική επίλυση του ολοκληρώματος της σχέσης (3.7) έδωσε τη μπλε και τη μαύρη καμπύλη κρουστικής απόκρισης για την πυκνή και την πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, αντίστοιχα, στο Σχήμα 3.21(α). Οι δύο κανονικοποιημένες ως προς τις μέγιστες τιμές τους καμπύλες είναι στενότερες από την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε για την αραιή ατμόσφαιρα. Η συμπεριφορά στο πεδίο των συχνοτήτων είναι η αντίστροφη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.21(β). Για την απόκριση συχνότητας του καναλιού σε πυκνή ατμόσφαιρα που αναπαρίσταται από την μπλε καμπύλη στο Σχήμα 3.21(β), προέκυψε εύρος ζώνης καναλιού 275.31 kHz περίπου. Για την πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, η απόκριση συχνότητας που αντιστοιχεί στη μαύρη καμπύλη έδωσε εύρος ζώνης στα 3 dB το οποίο ήταν 809.31 kHz περίπου. Οι απώλειες υπολογίστηκαν κατά προσέγγιση ίσες με 98.39 dB/cm^2 και 94.21 dB/cm^2 για την πυκνή και την πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, αντίστοιχα. Φαίνεται ότι οι μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή στο τμήμα της UV-C μπάντας μεταξύ 200 nm και 280 nm ευνοούνται σε ένα περιβάλλον με έντονες σκεδάσεις, υπό την προϋπόθεση, βέβαια, οι αποστάσεις να παραμείνουν μικρές. Καθώς το πλήθος των κέντρων σκέδασης (είτε πρόκειται για μόρια είτε για μικροσωματίδια) αυξάνονται, ο μηχανισμός της σκέδασης υπερισχύει της απορρόφησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περισσότερα φωτόνια να φθάνουν στο δέκτη παρά την έλλειψη οπτικής επαφής, έχοντας ως αποτέλεσμα τη λήψη υψηλότερων επιπέδων ισχύος για ίδια ισχύ εκπομπής. Συνοπτικά, ο Πίνακας 3.2 περιλαμβάνει τους συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης που χρησιμοποιήθηκαν για τις τρεις

περιπτώσεις καναλιών, καθώς και τις εκτιμήσεις του εύρους ζώνης και των απωλειών που προέκυψαν από το μοντέλο μονής σκέδασης.

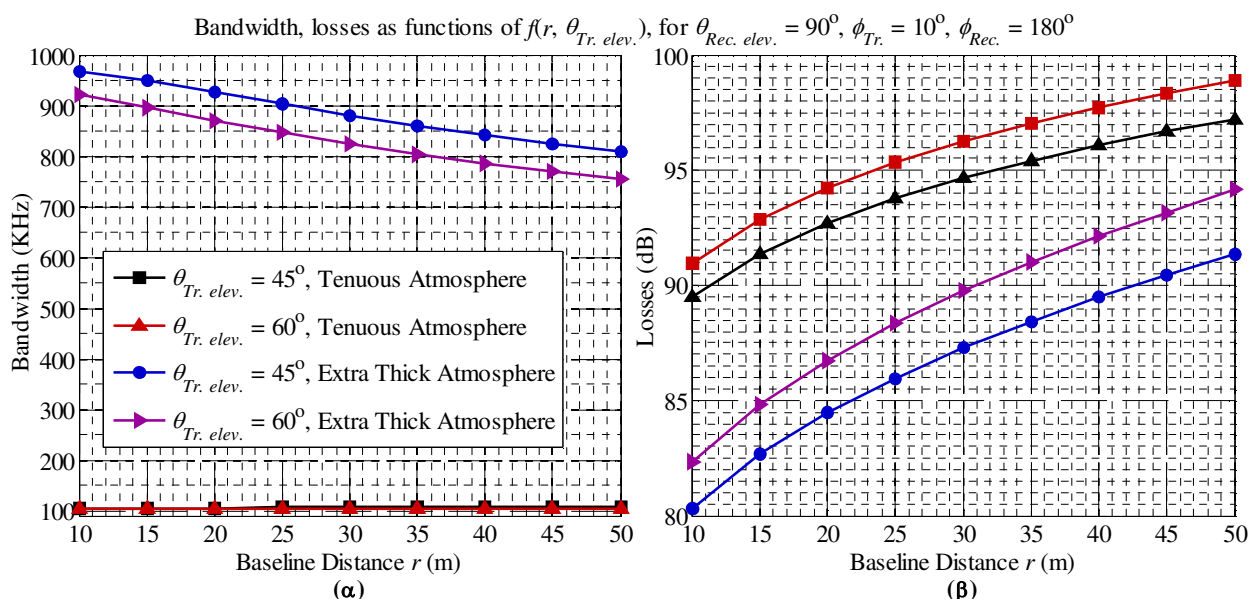
Πίνακας 3.2. Συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie και απορρόφησης, καθώς και εκτιμήσεις του εύρους ζώνης και των απωλειών για τις τρεις περιπτώσεις ατμόσφαιρας που εξετάστηκαν για ζεύξη με $r = 50$ m, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$, $\varphi_{Tr.} = 10^\circ$, $\varphi_{Rec.} = 180^\circ$.

Ατμόσφαιρα	$k_{s, Ray}$ (km^{-1})	$k_{s, Mie}$ (km^{-1})	k_{abs} (km^{-1})	Εύρος ζώνης (kHz)	Απώλειες (dB/cm^2)
Αραιή	0.247	0.280	0.709	107.17	100.05
Πυκνή	0.292	1.431	1.531	275.31	98.39
Πολύ πυκνή	1.912	7.648	1.684	809.31	94.21

Η επιλογή των 50 μέτρων επελέγη για διάφορους λόγους. Αποστάσεις εκατοντάδων μέτρων θα επέβαλλαν τεράστιες απώλειες που θα έκαναν τις μεταδόσεις ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθούν διατηρώντας ταυτόχρονα σε ικανοποιητικά επίπεδα τις επιδόσεις και σε εύλογα επίπεδα την εκπεμπόμενη οπτική ισχύ για διάφορες γωνίες ανύψωσης του πομπού και του δέκτη. Επιπλέον, η προσέγγιση μονής σκέδασης που θεωρήθηκε για την εκτίμηση των απωλειών και του εύρους ζώνης της καθεμίας εκδοχής καναλιού αρχίζει να δίνει αναξιόπιστα αποτελέσματα με την αύξηση των αποστάσεων [147]. Σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων πρέπει να υιοθετηθεί η προσέγγιση των πολλαπλών σκεδάσεων για την εκτίμηση των ιδιοτήτων του καναλιού. Οι μεγαλύτερες αποστάσεις, πχ πάνω από 200 μέτρα, επιβάλλουν και την ανάγκη θεώρησης των διαταραχών (turbulence) του ασύρματου μέσου [169], οι οποίες δε λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα μελέτη. Άρα, η επιλογή της κάλυψης των 50 μέτρων έδωσε ένα κανάλι με περιορισμένο εύρος ζώνης λόγω της ευρείας γωνίας θέασης, χωρίς οι απώλειες, ωστόσο, να είναι υπερβολικές. Όσον αφορά την πυκνότητα του ασύρματου μέσου, τονίζεται ότι το μοντέλο μονής σκέδασης αποτελεί το πλέον απαισιόδοξο σενάριο (worst-case scenario) ειδικά για τις περιπτώσεις που το μέσο γίνεται πυκνό, καθώς ένα μέσο με υψηλότερους συντελεστές σκέδασης θα αύξανε την πιθανότητα καθένα φωτόνιο να υποστεί πολλαπλές σκεδάσεις και όχι μόνο μία. Αυτό θα αύξανε την πιθανότητα το φωτόνιο να αφιχθεί επιτυχώς στο δέκτη. Παρόλα αυτά, για αραιές ατμόσφαιρες και για μεσαίες αποστάσεις από 50 ως 100 μέτρα, τα αποτελέσματα του μοντέλου καναλιού μονής σκέδασης δεν αποκλίνουν σημαντικά από αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής Monte Carlo [150]. Μένοντας στην περίπτωση του αραιού μέσου, σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των μοντέλων για τις εμβέλειες που αναφέρθηκαν εμφανίζονται για πολύ μεγάλες γωνίες ανύψωσης τόσο του πομπού όσο και του δέκτη [150], [155].

Όσον αφορά τις περιπτώσεις των μικρών δικτύων (clusters) που αποτελούνται από μικρό πλήθος κόμβων που θα εξεταστούν πιο κάτω, γίνεται η υπόθεση ότι καθένας κόμβος μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε μέσα στην περιοχή που καλύπτεται από το μικρό ασύρματο δίκτυο μέσα σε μία ακτίνα 50 μέτρων. Κάθε ζεύξη μεταξύ ενός κόμβου-πομπού και του κεντρικού κόμβου-δέκτη θεωρείται ως ένα κανάλι του οποίου οι ιδιότητες μπορούν να εκτιμηθούν με την εφαρμογή του μοντέλου μονής σκέδασης. Υποθέτοντας τέλεια ευθυγράμμιση μεταξύ ενός πομπού και του δέκτη (co-planar topology), εκτιμήθηκαν το εύρος ζώνης και οι απώλειες του οπτικού καναλιού για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο του δικτύου όπου βρίσκεται ο δέκτης. Ως φωτοφωρατής θεωρήθηκε και πάλι ο PMT R7154 της Hamamatsu [167]. Οι εκτιμήσεις για το εύρος ζώνης φαίνονται στο Σχήμα 3.22(α) για τα σενάρια αραιής και πολύ πυκνής ατμόσφαιρας όπως εξετάστηκαν ως τώρα, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των συντελεστών που περιέχει ο Πίνακας 3.2 για τα δύο περιβάλλοντα. Οι εκτιμήσεις προέκυψαν για γωνίες ανύψωσης του πομπού 45° και 60° . Από τα διαγράμματα

φαίνεται ότι η μεγάλη τιμή για το FOV περιορίζει σημαντικά το εύρος ζώνης για κάθε κανάλι μέσα σε ένα εύρος μεταξύ 103 και 108 kHz για αραιή ατμόσφαιρα και για αποστάσεις μέχρι 50 μέτρα. Αυτό το καθεστώς αλλάζει σε ένα πολύ πυκνό μέσο, όπου το εύρος ζώνης μειώνεται με την απόσταση, αλλά με αργό ρυθμό δε, ενώ ταυτόχρονα, οι εκτιμώμενες τιμές του εύρους ζώνης είναι περίπου 8 φορές μεγαλύτερες από τις τιμές εύρους ζώνης για το αραιό μέσο για τα αντίστοιχα μήκη των ζεύξεων. Οι απώλειες για τις δύο γωνίες ανύψωσης και τα δύο περιβάλλοντα σκέδασης ακολουθούν την αναμενόμενη συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, από το Σχήμα 3.22(β), απομονώνοντας καθένα περιβάλλον (αραιό ή πυκνό), οι απώλειες αυξάνονται με την αλλαγή της γωνίας ανύψωσης και με την απόσταση. Σχετικά με τις κλίσεις των καμπυλών, η βελτίωση στις απώλειες που εμφανίζεται στην περίπτωση της πολύ πυκνής ατμόσφαιρας, σταδιακά μειώνεται με την αύξηση της απόστασης, δηλαδή καθώς αυξάνεται η απόσταση, το κέρδος από τη μείωση στις απώλειες σταδιακά εξαλείφεται. Αυτό είναι αναμενόμενο [150] καθώς με την αύξηση της απόστασης αρχίζει να υπερισχύει η αρνητική επίδραση της απορρόφησης στο πυκνότερο μέσο. Η αλλαγή παρατηρείται και για τις δύο γωνίες ανύψωσης του πομπού.



Σχήμα 3.22. (α) Οπτικό εύρος ζώνης και (β) απώλειες σε συνάρτηση της απόστασης για γωνίες ανύψωσης του πομπού 45° και 60° , γωνία απόκλισης της δέσμης του πομπού 10° , FOV του δέκτη 180° (γωνία ανύψωσης του δέκτη 90°), για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.

3.2.4.2 Εκτιμήσεις απωλειών καναλιών με εφαρμογή του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων – συγκριτική μελέτη των θεωρητικών μοντέλων

Μένοντας σε ζεύξεις σημείου προς σημείο, εκτιμήθηκαν οι απώλειες καναλιών με τη μέθοδο Monte Carlo στην οποία προβλέπονται πολλαπλές σκεδάσεις ανά φωτόνιο. Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίστηκε σε όσα αναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.2.2.2. Αρχικά, η γεωμετρία της ζεύξης που θεωρήθηκε ήταν ίδια με αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12, όπου πομπός και δέκτης ήταν τέλεια προσανατολισμένοι μεταξύ τους και ομοεπίπεδοι. Μέσω των αριθμητικών αποτελεσμάτων, σε αυτή την παράγραφο σκοπός είναι να δοθεί μία αναμενόμενη συμπεριφορά, όσον αφορά τις απώλειες των καναλιών χωρίς οπτική επαφή και υπό διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί των απωλειών αφορούσαν τις περιπτώσεις μετάδοσης υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας και υπό την ύπαρξη ομίχλης μέσα στο ασύρματο μέσο.

Σχετικά με την επιλογή των ιδιοτήτων του ασύρματου μέσου, από πειραματικές μετρήσεις έχουν αναπτυχθεί αντιπροσωπευτικά μοντέλα αερολυμάτων, όπως το αστικό,

το αγροτικό, το παραθαλάσσιο, το τροποσφαιρικό [170]. Εδώ, η βαρύτητα δόθηκε αποκλειστικά στο αγροτικό και στο αστικό μοντέλο. Το μοντέλο αγροτικών αερολυμάτων αντιπροσωπεύει ένα περιβάλλον μικροσωματιδίων όπου δεν υπάρχουν πηγές άλλων αερολυμάτων προερχόμενα από κάποια αστική ή βιομηχανική πηγή. Τα μικροσωματίδια αυτού του μοντέλου αποτελούνται κατά 70% από κάποια υδατοδιαλυτή ουσία (πχ θειικό ασβέστιο – CaSO_4 , θειική αμμωνία – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ και άλλα οργανικά μείγματα) και κατά 30% από μικροσωματίδια τύπου σκόνης. Από την άλλη, σε αστικές περιοχές, μικροσωματίδια που προέρχονται από καύσεις και από βιομηχανικές δραστηριότητες προστίθενται σε αυτά του αγροτικού μοντέλου δημιουργώντας μία μίξη αγροτικών αερολυμάτων και αερολυμάτων που σχετίζονται με τον άνθρακα. Τα αερολύματα τύπου αιθάλης (soot-like aerosols) θεωρούνται ότι έχουν ίδια κατανομή μεγεθών όπως τα δύο συστατικά του αγροτικού μοντέλου [170]. Σε αναλογία, το 20% των αερολυμάτων του αστικού μοντέλου είναι τύπου αιθάλης και το υπόλοιπο 80% είναι τα αερολύματα του αγροτικού μοντέλου. Όπως και για το αγροτικό μοντέλο, έτσι και για το αστικό μοντέλο, για κάθε μήκος κύματος ορίζεται ένας σύνθετος δείκτης διάθλασης μέσω της ποσόστωσης των συστατικών του κάθε μοντέλου.

Οι κατανομές μεγέθους των μικροσωματιδίων για τα διάφορα μοντέλα αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα αντιπροσωπεύονται ικανοποιητικά από μία λογαριθμο-κανονική (lognormal) κατανομή ή από άθροισμα δύο τέτοιων κατανομών [170]. Εδώ τονίζεται ότι τα μικροσωματίδια θεωρούνται σφαιρικά και αυτή η θεώρηση είναι ικανοποιητική, παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα δεν ισχύει [170]. Άρα, οι κατανομές μεγέθους αφορούν τις ακτίνες των αερολυμάτων. Για το αστικό και το αγροτικό μοντέλο, η κατανομή μεγέθους των αερολυμάτων είναι άθροισμα δύο κατανομών. Η μία κατανομή αντιπροσωπεύει τα μεγαλύτερα μικροσωματίδια και η δεύτερη τα μικρότερα. Για καθένα από τους δύο όρους της κατανομής μεγεθών και για καθένα μοντέλο, υπάρχουν κάποιες παράμετροι που τις χαρακτηρίζουν και αυτές είναι η «επικρατούσα» (mode)* τιμή ακτίνας (r_i) των μικροσωματιδίων της κατανομής, η πυκνότητα των μικροσωματιδίων (N_i) και η τυπική απόκλιση (σ_i) των ακτίνων των μικροσωματιδίων, με $i = 1, 2$. Το άθροισμα των δύο lognormal κατανομών φαίνεται στη σχέση (3.30) που ακολουθεί

$$n(r) = \sum_{i=1}^2 \frac{N_i}{\log_e(10) \times r \times \sigma_i \times \sqrt{2\pi}} \times \exp \left\{ -\frac{[\log_{10}(r) - \log_{10}(r_i)]^2}{2 \times \sigma_i^2} \right\} \quad (3.30)$$

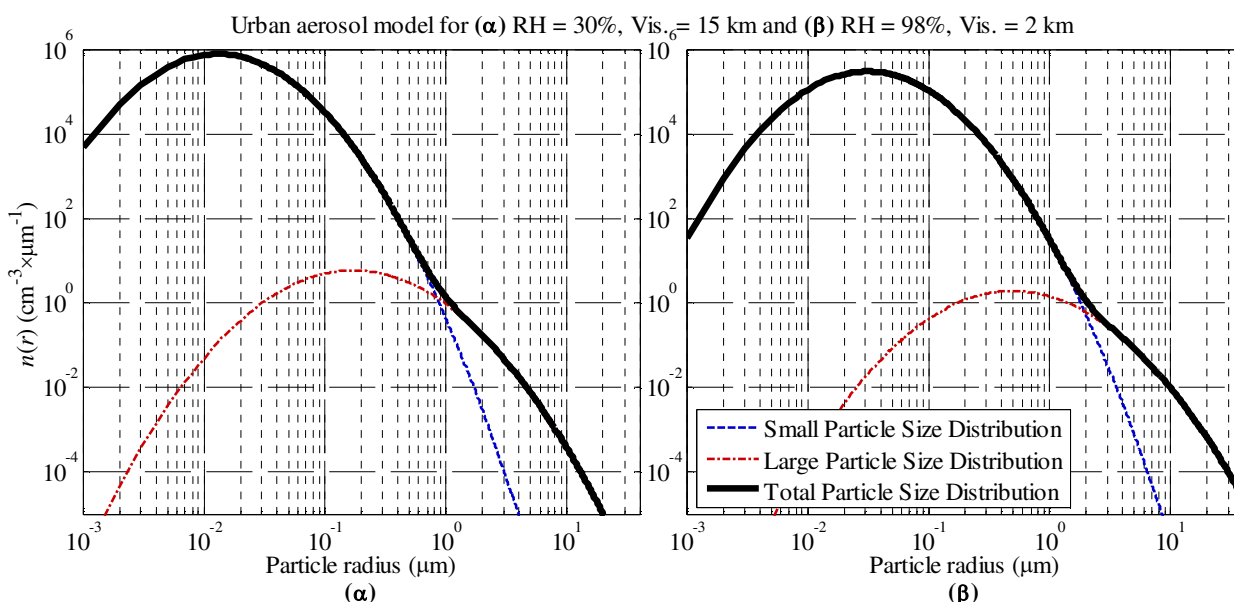
Με την αλλαγή της σχετικής υγρασίας (Relative Humidity – RH), οι ακτίνες r_i και οι πυκνότητες N_i μεταβάλλονται, ενώ η τυπική απόκλιση θεωρείται ότι παραμένει σταθερή [170]. Πχ αύξηση της σχετικής υγρασίας προκαλεί αύξηση των διαστάσεων των μικροσωματιδίων λόγω συμπύκνωσης νερού πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια. Εκτός από την αλλαγή του μεγέθους προκύπτει και αλλαγή της σύνθεσης των σωματιδίων μέσω μεταβολής του δείκτη διάθλασης των συστατικών που τα αποτελούν και κατ' επέκταση του δείκτη διάθλασης που αντιπροσωπεύει καθεμία από τις δύο κατανομές (effective refractive index). Αυτό, όμως, σημαίνει ότι θα μεταβληθεί αντιστοίχως η επίδραση των μικροσωματιδίων στο διαδιδόμενο φως όσον αφορά τη σκέδαση και την απορρόφηση.

Πίνακες με:

* Η mode τιμή είναι η συχνότερα εμφανιζόμενη τιμή μίας τυχαίας μεταβλητής. Είναι η τιμή για την οποία εμφανίζει μέγιστο η συνάρτηση πιθανότητας μάζας ή η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, αν η κατανομή είναι διακριτή ή συνεχής, αντίστοιχα. Ωστόσο, από τη σχέση (3.30), η r_i ως mode τιμή δεν είναι η επικρατούσα τιμή της τυχαίας μεταβλητής των μεγεθών των ακτίνων, αλλά η επικρατούσα τιμή προκύπτει από την r_i , η οποία είναι και η γνωστή ποσότητα. Η σχέση που δίνει τη mode τιμή της κατανομής δίνεται λίγο πιο κάτω.

- ⇒ τους δείκτες διάθλασης για καθένα συστατικό των μικρών και μεγάλων σωματιδίων κάθε κατανομής μεγεθών ανά μοντέλο και ανά μήκος κύματος,
- ⇒ τα μεγέθη των ακτίνων r_i και των τυπικών αποκλίσεων σ_i ανά κατανομή μεγεθών και ανά μοντέλο για διάφορες τιμές υγρασίας,
- ⇒ τις τιμές πυκνοτήτων μικροσωματιδίων για διάφορες τιμές ορατότητας και σχετικής υγρασίας ανά κατανομή και ανά μοντέλο αερολυμάτων

μεταφέρθηκαν σε ψηφιακή μορφή από την αναφορά [170]. Επιλέγοντας συγκεκριμένο μήκος κύματος, από τους πίνακες ανασύρονταν οι σχετικές τιμές των δεικτών διάθλασης για τα διάφορα συστατικά των μικροσωματιδίων. Μέσω των ποσοστώσεων, υπολογιζόταν ο δείκτης διάθλασης ανά κατανομή του εκάστοτε μοντέλου για ατμόσφαιρα με μηδενική σχετική υγρασία. Πχ για το αστικό μοντέλο, για το μήκος κύματος επιλογής υπολογιζόταν ο δείκτης διάθλασης $n_{urb} = 0.2 \times n_{soot} + 0.8 \times (0.7 \times n_{ws} + 0.3 \times n_d)$ και για τις δύο κατανομές του αθροίσματος για μεγάλα και μικρά μικροσωματίδια, με n_{ws} το δείκτη διάθλασης των υδατοδιαλυτών ουσιών, n_d το δείκτη διάθλασης των μικροσωματιδίων τύπου σκόνης και n_{soot} το δείκτη διάθλασης για τα αερολύματα τύπου αιθάλης. Ανάλογα με το μοντέλο επιλογής και κάποια τιμή σχετικής υγρασίας που επιλεγόταν, ανασύρονταν οι κατάλληλες τιμές r_i , σ_i . Από μαθηματικό τύπο για τον υπολογισμό των δεικτών διάθλασης λόγω της μη μηδενικής σχετικής υγρασίας [170] υπολογιζόταν οι νέες τιμές των δεικτών διάθλασης των μικροσωματιδίων της κατανομής. Ο σχετικός τύπος που έδινε το δείκτη διάθλασης υπό καθεστώς μη μηδενικής σχετικής υγρασίας ήταν $n_w + (n_{urb} - n_w) \times (r_{i,0}/r_{i,RH})^3$, όπου n_w είναι ο δείκτης διάθλασης του νερού για το μήκος κύματος που επιλέχθηκε, $r_{i,0}$ και $r_{i,RH}$ ήταν οι mode τιμές των ακτίνων των σωματιδίων καθεμίας κατανομής με μηδενική και μη μηδενική υγρασία. Επομένως, προέκυπταν δύο δείκτες διάθλασης για τις δύο κατανομές του μοντέλου. Ανάλογα με το μοντέλο που επιλεγόταν και σε συνδυασμό με τις τιμές σχετικής υγρασίας (για την οποία έγιναν οι προηγούμενοι υπολογισμοί) και ορατότητας, ανασύρονταν οι τιμές (ολικών) πυκνοτήτων των σωματιδίων των δύο κατανομών που περιγράφουν το μοντέλο.



Σχήμα 3.23. Κατανομή μεγεθών μικροσωματιδίων αστικού μοντέλου αερολυμάτων σε $\text{cm}^{-3} \times \mu\text{m}^{-1}$ για σχετική υγρασία και ορατότητα (α) 30%, 15 km και (β) 98%, 2 km, αντίστοιχα.

Για την τελική κατανομή μεγεθών των μικροσωματιδίων του μοντέλου, θα προστεθούν οι δύο λογαριθμο-κανονικές συναρτήσεις και θα προκύψει η τελική συνάρτηση που περιγράφει την κατανομή των μεγεθών για διακριτό πλήθος ακτίνων μικροσωματιδίων. Οι κατανομές αυτές δίνονται σε τιμές $\text{cm}^{-3} \times \mu\text{m}^{-1}$, συνδέοντας όγκο και μέγεθος ακτίνων σωματιδίων. Όσον αφορά το δείκτη διάθλασης που αντιπροσωπεύει την τελική

κατανομή (που είναι το άθροισμα των δύο λογαριθμο-κανονικών συναρτήσεων) προκύπτει από στάθμιση των δεικτών διάθλασης με χρήση κατάλληλων βαρών [171]. Για παράδειγμα, για σχετική υγρασία $RH = 30\%$ και ορατότητα $Vis. = 15 \text{ km}$, δηλαδή για καθαρή ατμόσφαιρα, η κατανομή μεγεθών (των ακτίνων των αερολυμάτων) για τη συγκεκριμένη σύνθεση αραιής ατμόσφαιρας δίνεται στο Σχήμα 3.23(α) ως η παχύτερη καμπύλη με μαύρο χρώμα. Αυτό το παράδειγμα θα χρησιμοποιηθεί και στις προσομοιώσεις. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε μικρόμετρα και αφορά τις ακτίνες των αερολυμάτων. Πίσω από την καμπύλη φαίνονται οι δύο όροι του αθροίσματος, δηλαδή οι κατανομές μεγέθους των μικρών και των μεγάλων αερολυμάτων. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες που τέθηκαν προέκυψε η μεσαία ομαδοποιημένη στήλη που περιλαμβάνει ο Πίνακας 3.3 στον οποίο φαίνονται οι mode τιμές των ακτίνων, οι τυπικές αποκλίσεις των μικροσωματιδίων, οι δείκτες διάθλασης και οι πυκνότητες των σωματιδίων καθεμίας κατανομής για μήκος κύματος στα 265 nm. Παρατηρώντας τις mode τιμές, αυτές δε συμπίπτουν με τις ακτίνες στον οριζόντιο άξονα για τον οποίο επιτυγχάνεται μέγιστο για την εκάστοτε συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Από τις ιδιότητες της λογαριθμο-κανονικής κατανομής και από την παραγωγή κάθε όρου της (3.30) και την εξίσωσή του με το μηδέν, η mode τιμή της τυχαίας μεταβλητής των ακτίνων για καθεμία κατανομή είναι ίση με $\exp(\log_{10}(r_i) \times \log_e(10) - (\log_e(10) \times \sigma_i)^2) = 10^{\log_{10}(r_i) - \sigma_i^2 \times \log_e(10)}$ με $i = 1, 2$ για τις δύο κατανομές μεγεθών. Από τη μεσαία στήλη που περιλαμβάνει ο Πίνακας 3.3, οι μέγιστες τιμές στο Σχήμα 3.23(α) αντιστοιχούν σε ακτίνες 13.17 nm και 172.90 nm στον οριζόντιο άξονα για την κατανομή των μικρών και μεγάλων αερολυμάτων, αντίστοιχα. Ένα δεύτερο παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 3.23(β) για $RH = 98\%$ και $Vis. = 2 \text{ km}$. Οι άξονες είναι όμοιοι με αυτούς του πρώτου παραδείγματος. Τα χαρακτηριστικά των κατανομών δίνονται στην τρίτη ομαδοποιημένη στήλη του ίδιου πίνακα. Με την αύξηση της υγρασίας και τη μείωση της ορατότητας, φαίνεται η ολίσθηση των κορυφών των κατανομών προς μεγαλύτερα μεγέθη ακτίνων των μικροσωματιδίων λόγω της αύξησης των mode τιμών των ακτίνων (r_i) από την υγρασία. Ταυτόχρονα, οι κορυφές μειώνονται λόγω μείωσης των συγκεντρώσεων. Ολοκληρώνοντας την καμπύλη της τελικής κατανομής μεγεθών μικροσωματιδίων σε καθένα από τα δύο σχήματα (Σχήμα 3.23(α) και (β)), προκύπτει η ολική πυκνότητα της ατμόσφαιρας σε αερολύματα ($N_1 + N_2$ ανά μοντέλο) για καθένα από τα δύο παραδείγματα. Ο Πίνακας 3.3 περιλαμβάνει στη δεξιά στήλη τις τιμές των παραμέτρων των κατανομών για το δεύτερο παράδειγμα. Αυτό που μπορεί εύκολα να δει κανείς, είναι ότι η αύξηση της σχετικής υγρασίας προκαλεί την αλλαγή του δείκτη διάθλασης των αερολυμάτων. Οι τιμές του πραγματικού μέρους του δείκτη διάθλασης για τα μικρά και τα μεγάλα μικροσωματίδια προσεγγίζουν την τιμή του πραγματικού μέρους του δείκτη διάθλασης του νερού για τα 265 nm (~ 1.357), όπως είναι αναμενόμενο.

Πίνακας 3.3. Παράμετροι αστικού μοντέλου αερολυμάτων παραδείγματος 1 και 2 από το Σχήμα 3.23(α) και (β). Οι δείκτες διάθλασης προέκυψαν για μήκος κύματος ίσο με 265 nm.

Παράμετροι αστικού μοντέλου αερολυμάτων	Παράδειγμα 1 (Σχήμα 3.23(α))	Παράδειγμα 2 (Σχήμα 3.23(β))
Σχετική Υγρασία	30%	98%
Ορατότητα	15 km	2 km
Ακτίνα (mode) <u>μικρών</u> μικροσωματιδίων (r_1)	25.2152 nm	59.96 nm
Τυπική απόκλιση <u>μικρών</u> μικροσωματιδίων (σ_1)	350 nm	350 nm
Δείκτης διάθλασης <u>μικρών</u> μικροσωματιδίων (n_1)	1.5514 + 0.10665i	1.371 + 7.931 × 10 ⁻³ i
Ολική πυκνότητα <u>μικρών</u> μικροσωματιδίων (N_1)	~28430.99 cm ⁻³	~26535.53 cm ⁻³
Ακτίνα (mode) <u>μεγάλων</u> μικροσωματιδίων (r_2)	403.8415 nm	1169.1 nm

Τυπ. απόκλιση <u>μεγάλων</u> μικροσωματιδίων (σ_2)	400 nm	400 nm
Δείκτης διάθλασης <u>μεγάλων</u> μικροσωματιδίων (n_2)	1.5508 + 0.10633i	1.365 + 4.383×10 ⁻³ i
Ολική πυκνότητα <u>μεγάλων</u> μικροσωματιδίων (N_2)	~3.56 cm ⁻³	~3.32 cm ⁻³

Για καθεμία ακτίνα μικροσωματιδίων με την αντίστοιχη πυκνότητα (από τη συνάρτηση της κατανομής) και για τον τελικό δείκτη διάθλασης που περιγράφει το μοντέλο, εκτελούνται οι υπολογισμοί της σκέδασης Mie [172] ώστε να εκτιμηθούν αρχικά οι αποδοτικότητες απόσβεσης (Q_{ext}), σκέδασης (Q_{scat}), απορρόφησης (Q_{abs}), οπισθοσκέδασης (Q_{back}) και ο παράγοντας ασυμμετρίας (g). Εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι αποδοτικότητες σκέδασης και απορρόφησης, καθώς και ο παράγοντας ασυμμετρίας. Για καθεμία τιμή αποδοτικότητας είτε σκέδασης είτε απορρόφησης, υπολογίστηκε το εμβαδόν διατομής (cross-section) για καθεμία ακτίνα (r) της κατανομής που έχει ληφθεί υπόψη ($\pi r^2 \times Q_{scat}$, $\pi r^2 \times Q_{abs}$). Από την τιμή της πυκνότητας που αντιστοιχεί σε καθεμία τιμή της κατανομής υπολογίστηκαν οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης ανά τιμή ακτίνας. Όμοια, για καθεμία τιμή ακτίνας προέκυψε και μία συνάρτηση φάσης για όλες τις γωνίες στο διάστημα $[0, \pi]$. Στη συνέχεια, γινόταν η κατάλληλη στάθμιση μέσω αριθμητικής επίλυσης ολοκληρωμάτων, ώστε να προκύψουν οι τελικοί συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης, ο παράγοντας ασυμμετρίας και η συνάρτηση φάσης που περιγράφουν τη σκέδαση Mie [134]. Πιο συγκεκριμένα, η αλληλεπίδραση μεταξύ μικροσωματιδίων θεωρείται αμελητέα (η απόσταση μεταξύ των κέντρων των μικροσωματιδίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3 ακτίνες) [134], οπότε η συνεισφορά των μεμονωμένων μικροσωματιδίων με συγκεκριμένες ακτίνες θα προκύψει από ένα σταθμισμένο άθροισμα. Είναι προφανές ότι οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης θα προέκυπταν από συνεχή κατανομή, αλλά οι ακτίνες ήταν πεπερασμένες σε πλήθος δημιουργώντας πρακτικά μία διακριτή κατανομή. Σχετικά με τους συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης, τον παράγοντα ασυμμετρίας και τη συνάρτηση φάσης που περιγράφουν την κατανομή μεγεθών των ακτίνων των μικροσωματιδίων του μοντέλου που έχει επιλεγεί, αν η κατανομή των μεγεθών των ακτίνων περιγράφεται από μία συνάρτηση $n(r)$ με $n(r)dr$ το πλήθος των μικροσωματιδίων ανά μονάδα όγκου που έχουν ακτίνες μεταξύ r και $r+dr$, θεωρητικά θα έπρεπε να υπολογιστούν τα ακόλουθα ολοκληρώματα, αντίστοιχα [134]:

$$\begin{aligned}
 k_{abs,Mie} &= \int_{r_1}^{r_2} n(r) \times \sigma_{abs}(r) dr & k_{s,Mie} &= \int_{r_1}^{r_2} n(r) \times \sigma_s(r) dr \\
 g &= \frac{1}{k_{s,Mie}} \int_{r_1}^{r_2} n(r) \times \sigma_s(r) \times g'(r) dr & & (3.31) \\
 p_{Mie}(\cos(\theta)) &= \frac{1}{k_{s,Mie}} \int_{r_1}^{r_2} n(r) \times \sigma_s(r) \times p'(\cos(\theta), r) dr
 \end{aligned}$$

όπου r_1 , r_2 είναι το κάτω και το άνω όριο της κατανομής των μεγεθών των ακτίνων των μικροσωματιδίων, $\sigma_{abs}(r)$, $\sigma_s(r)$, $g'(r)$, $p'(\cos(\theta), r)$ είναι τα εμβαδά των διατομών απορρόφησης και σκέδασης, ο παράγοντας ασυμμετρίας και η συνάρτηση φάσης για ένα μικροσωματίδιο ακτίνας r , αντίστοιχα. Η ποσότητα $n(r) \times \sigma_s(r) \times dr$ δίνει το συντελεστή σκέδασης για τα μικροσωματίδια ακτίνας r . Ωστόσο, για πεπερασμένο πλήθος τιμών ακτίνων, τα ολοκληρώματα λύθηκαν αριθμητικά. Σ' αυτή την ενότητα δε χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση φάσης όπως προέκυψε από τις εξισώσεις για τη σκέδαση Mie, από τις οποίες υπολογιζόταν, αλλά ο παράγοντας ασυμμετρίας g που εκτιμήθηκε από την (3.31) εισήχθη στη συνάρτηση Henyey-Greenstein (3.2) και αυτή χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

Όσον αφορά τη σκέδαση Rayleigh, οι συντελεστές σκέδασης υπολογίστηκαν απευθείας με τη βοήθεια της αναφοράς [133], η (3.1) αποτέλεσε τη συνάρτηση φάσης και οι συντελεστές απορρόφησης προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των μορίων

του όζοντος και των υδρατμών (λαμβάνονται υπόψη μόρια νερού συγκεκριμένης πυκνότητας και μεγέθους). Τα δύο μόρια έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην περιοχή της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας. Και για τις δύο συνιστώσες, είναι γνωστές οι συγκεντρώσεις τους στην ατμόσφαιρα. Για το μεν όζον, η απαιτούμενη διατομή απορρόφησης προέκυψε από πίνακες [173]. Για τους δε υδρατμούς, η διατομή απορρόφησης προέκυψε εφαρμόζοντας τη θεωρία Mie με ακτίνα μορίου-μικροσωματιδίου 0.3 nm [134]*. Ο συντελεστής απορρόφησης που αφορά τα μόρια της ατμόσφαιρας, προέκυψε από το άθροισμα των συντελεστών για το όζον και το νερό. Ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης του μέσου προέκυψε από το άθροισμα των συντελεστών απορρόφησης λόγω σκέδασης Mie και λόγω σκέδασης Rayleigh.

Σε μία προσπάθεια προσέγγισης όσο το δυνατό ρεαλιστικών συνθηκών μετάδοσης, για την περίπτωση καθαρής ατμόσφαιρας, χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες του μοντέλου αστικών αερολυμάτων για να υπολογιστούν εκτιμήσεις των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης, του παράγοντα ασυμμετρίας (g) καθώς και της συνάρτησης φάσης εφαρμόζοντας τη θεωρία για τη σκέδαση Mie για μήκος κύματος εκπομπής 265 nm. Επαναλαμβάνεται ότι σε αυτή την ομάδα προσομοιώσεων δε χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση φάσης που αφορά τα μικροσωματίδια όπως προέκυψε από τις εξισώσεις της θεωρίας Mie. Για σχετική υγρασία και ορατότητα 30% και 15 km, αντίστοιχα, από όλη τη διαδικασία που περιγράφηκε, ο συντελεστής σκέδασης Mie που εκτιμήθηκε ήταν ελαφρώς μεγαλύτερος από 0.271 km^{-1} . Ο συντελεστής σκέδασης Rayleigh για το μήκος κύματος που θεωρήθηκε, για θερμοκρασία περιβάλλοντος 27°C και για ατμοσφαιρική πίεση 1013.25 mb, ήταν περίπου 0.237 km^{-1} όπως εκτιμήθηκε από την αναλυτική έκφραση. Ο συντελεστής απορρόφησης λόγω των υδρατμών στην ατμόσφαιρα προέκυψε κοντά σε μία τιμή 0.0017 km^{-1} , ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής λόγω των μορίων του όζοντος υπολογίστηκε περίπου 0.588 km^{-1} . Ο σχετικός συντελεστής απορρόφησης λόγω της επίδρασης των μικροσωματιδίων, για τις συγκεκριμένες τιμές υγρασίας και ορατότητας, από τις σχετικές εξισώσεις της Mie, εκτιμήθηκε περίπου 0.164 km^{-1} . Από το άθροισμα των προηγούμενων συντελεστών προέκυψε ένας ολικός συντελεστής απορρόφησης περίπου 0.754 km^{-1} και αυτός χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Αυτές οι τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με αυτές που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία [149]. Επιπροσθέτως, ο παράγοντας ασυμμετρίας εκτιμήθηκε κοντά στην τιμή 0.74.

Περνώντας στην περίπτωση πυκνής ατμόσφαιρας, αυτή θεωρήθηκε ως το αποτέλεσμα της εμφάνισης ομίχλης. Ένας γενικά αποδεκτός ορισμός για την ομίχλη είναι «σταγονίδια νερού αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα κοντά στην επιφάνεια της γης που προκαλούν μείωση της ορατότητας κάτω από 1 km» [174]. Εννοείται ότι υπάρχουν τύποι ομίχλης που σχετίζονται με διαβαθμίσεις ορατότητας, πχ αχλύς, καταχνιά, έντονη ομίχλη [175], αλλά δεν θα επεκταθούμε. Για την ανάπτυξη ομίχλης απαιτούνται πολύ υψηλή σχετική υγρασία και πυρήνες συμπύκνωσης (condensation nuclei) στους οποίους θα συμπυκνωθούν υδρατμοί δημιουργώντας σταγονίδια νερού οδηγώντας σε καθεστώς ομίχλης. Οι πυρήνες συμπύκνωσης είναι υδρόφιλα μικροσωματίδια με μέγεθος μεταξύ 100 nm και 1 μm . Ανάλογα με τη διαδικασία σχηματισμού ομίχλης, συνήθως συναντώνται στη φύση περιπτώσεις ομίχλης από ακτινοβόληση (radiation fog) και από κίνηση αέριων μαζών (advection fog) [176]. Η ομίχλη από ακτινοβόληση σχετίζεται με την ακτινοβολία θερμότητας από το έδαφος, ενώ ο αέρας πάνω από το έδαφος είναι αρκετά ψυχρός. Συνήθως εμφανίζεται το βράδυ. Η ομίχλη με κίνηση

* Με βάση το μήκος κύματος επιλογής, θεωρώντας τα μόρια ως σφαίρες και για μέγεθος ακτίνας του μορίου ίσο με 0.3 nm εκτελούνταν οι υπολογισμοί για τη σκέδαση Mie ώστε να προκύψει ένας συντελεστής σκέδασης και απορρόφησης για το νερό. Καθότι ο συντελεστής προστίθεται στον αντίστοιχο συντελεστή που προέκυψε για το όζον. Ωστόσο, μόνο οι συντελεστές απορρόφησης διατηρήθηκαν διότι ο συντελεστής σκέδασης προέκυψε από αναλυτικό τύπο, όπως αναφέρθηκε στο κείμενο.

αέριων μαζών σχηματίζεται όταν ζεστός υγρός αέρας κινείται πάνω από νερό ή χερσαίο έδαφος που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Για την περιγραφή του τύπου της ομίχλης έχουν αναπτυχθεί σχετικά μοντέλα, αντίστοιχα με το αγροτικό και το αστικό που περιγράφηκαν προηγουμένως. Για την περιγραφή του μεγέθους των σταγονιδίων έχουν χρησιμοποιηθεί τροποποιημένες γάμμα κατανομές. Από τις σχετικές κατανομές, για έντονη ομίχλη από κίνηση αέριων μαζών έχει προκύψει mode τιμή ακτίνας σταγονιδίων ίση με 10 μm , ενώ η τιμή 8 μm εμφανίζεται στη βιβλιογραφία για τον ίδιο τύπο ομίχλης αλλά σε λιγότερο πυκνή εκδοχή. Στην πυκνότητα σταγονιδίων έχει αποδοθεί τιμή 20 σταγονίδια ανά cm^3 (είτε πρόκειται για πυκνή είτε για λιγότερο πυκνή εκδοχή ομίχλης). Για την ομίχλη από ακτινοβολή, στην έντονη εκδοχή της, η mode τιμή της ακτίνας των σταγονιδίων είναι ίση με 4 μm , ενώ 100 σταγονίδια ανά cm^3 είναι η πυκνότητα των μικροσωματιδίων ομίχλης. Για την πιο ασθενή εκδοχή του ίδιου τύπου ομίχλης, 2 μm και 200 σταγονίδια ανά cm^3 είναι η mode ακτίνα και η πυκνότητα, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι ενδεικτικές. Για παρεμφερή μοντέλα ομίχλης έχουν προκύψει παρόμοιες τιμές [170]. Από πειράματα που έχουν γίνει στο παρελθόν έχουν επιβεβαιωθεί το εύρος των τιμών ακτίνων και των συγκεντρώσεων των σταγονιδίων [170]. Σε αυτά τα μοντέλα ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης των σταγονιδίων είναι αυτός του καθαρού νερού, παρά το γεγονός ότι τα σταγονίδια έχουν προκύψει από πυρήνες συμπύκνωσης. Ο δείκτης διάθλασης των τελευταίων θεωρείται αμελητέος μετά το σχηματισμό σταγονιδίων σε υγρή μορφή. Γενικότερα, η επίδραση του πυρήνα στις ιδιότητες του σχηματισμένου σταγονιδίου θεωρείται αμελητέα [175]. Στην παράγραφο Π.4 δίνονται πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τα μεγέθη των σταγονιδίων και τις συναρτήσεις φάσης για τις εκδοχές ομίχλης που μόλις περιγράφηκαν οι οποίες δε θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα υποενότητα, αλλά θα συσχετιστούν με υπολογισμούς και αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν σε επόμενες παραγράφους.

Όταν προστέθηκε ομίχλη στις προσομοιώσεις, η συγκέντρωση σταγονιδίων τέθηκε σε τιμή $N_{Drop. Dens.} = 50$ σταγονίδια ανά cm^3 (50 dr./ cm^3 σε συντομία) για όλες τις τιμές ακτίνων σταγονιδίων που εξετάστηκαν. Σε καθεμία εκδοχή ομίχλης που εξετάστηκε, όλα τα σταγονίδια είχαν την ίδια ακτίνα. Η θεωρία της σκέδασης Mie εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης. Παρά το γεγονός ότι όπως αναφέρθηκε υπάρχουν σχετικές κατανομές μεγεθών των μικροσωματιδίων νερού σε καθεστώς ομίχλης, δε χρησιμοποιήθηκαν τέτοιες κατανομές ώστε να φανεί αποκλειστικά η επίδραση της αλλαγής του μεγέθους των σωματιδίων. Επιπλέον, στα πειράματα που ακολούθησαν, η ακριβής σύνθεση του υγρού της μηχανής που παρήγαγε ομίχλη δεν ήταν γνωστή. Άγνωστο ήταν και το ακριβές μέγεθος των μικροσωματιδίων που παράγονταν. Επομένως, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς την ενσωμάτωση κάποιας κατανομής μεγέθους για τα σταγονίδια ομίχλης, λόγω έλλειψης των απαραίτητων τιμών των παραμέτρων.

Η λογική που εφαρμόστηκε ήταν να προστεθούν οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης που υπολογίστηκαν για τα σταγονίδια ομίχλης (για καθεμία περίπτωση ακτίνας που εξετάστηκε) στους ήδη υπολογισμένους αντίστοιχους συντελεστές καθαρής ατμόσφαιρας [168], δηλαδή για το συντελεστή σκέδασης του μέσου θα ισχύει $k'_s = k_{s,Ray} + k_{s,Mie} + k_{s,Fog,D}$, όπου $k_{s,Fog,D}$ είναι ο συντελεστής σκέδασης που προέκυψε για την περίπτωση ομίχλης με σταγονίδια ακτίνας r_D και συγκέντρωσης $N_{Drop. Dens.}$. Όμοια προκύπτει και ο τελικός συντελεστής απορρόφησης (k'_{abs}). Αυτός ο τρόπος ακολουθήθηκε επειδή με την εμφάνιση ομίχλης τροποποιείται η σύσταση των πυρήνων συμπύκνωσης μετά τον σχηματισμό σταγονιδίων και υπερσχύει η επίδραση του νερού, όπως ήδη αναφέρθηκε. Από τη μία, εισάγεται ένα είδος μικροσωματιδίου με το δικό του μιγαδικό δείκτη διάθλασης και πιθανόν κάποια κατανομή και ακολουθούν οι

* Εδώ υποθέσαμε ότι όλα τα σταγονίδια είχαν την ίδια ακτίνα σε καθεμία περίπτωση ομίχλης που εξετάστηκε.

υπολογισμοί Mie γι' αυτό τον τύπο μικροσωματιδίου. Ωστόσο, δεν κανονικοποιούνται οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης και οι υπόλοιπες οπτικές ιδιότητες με βάρη αναλογίας το λόγο του όγκου που καταλαμβάνει μέσα στο μέσο ο τύπος σωματιδίου που προστέθηκε προς τον όγκο που καταλαμβάνουν τα μικροσωματίδια συνολικά (mixing ratios). Επομένως, δε δημιουργείται μία μίξη ουσιών διαφορετικών δεικτών διάθλασης γεννώντας ένα νέο μοντέλο όπως το αστικό ή το αγροτικό [171] με την προσθήκη ενός ή περισσότερων τύπων σωματιδίων. Ταυτόχρονα, η εισαγωγή τεχνητής ομίχλης που πραγματοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία έγινε σε ένα περιβάλλον καθαρής ατμόσφαιρας δικαιολογώντας αυτό τον τρόπο αντιμετώπισης, δηλαδή την πρόσθεση των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης. Ωστόσο, η τελική συνάρτηση φάσης που αφορά τη σκέδαση θα σταθμιστεί και από την συνάρτηση φάσης που προέκυψε λόγω ομίχλης. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση (3.6) θα τροποποιηθεί σε μία μορφή η οποία θα συμπεριλαμβάνει και τη συνάρτηση σκέδασης λόγω της ομίχλης που είναι πρακτικά μία περίπτωση σκέδασης Mie λόγω του μεγέθους των σταγονιδίων που είναι μεγαλύτερα από το μήκος κύματος. Δηλαδή, η τελική συνάρτηση φάσης θα είναι

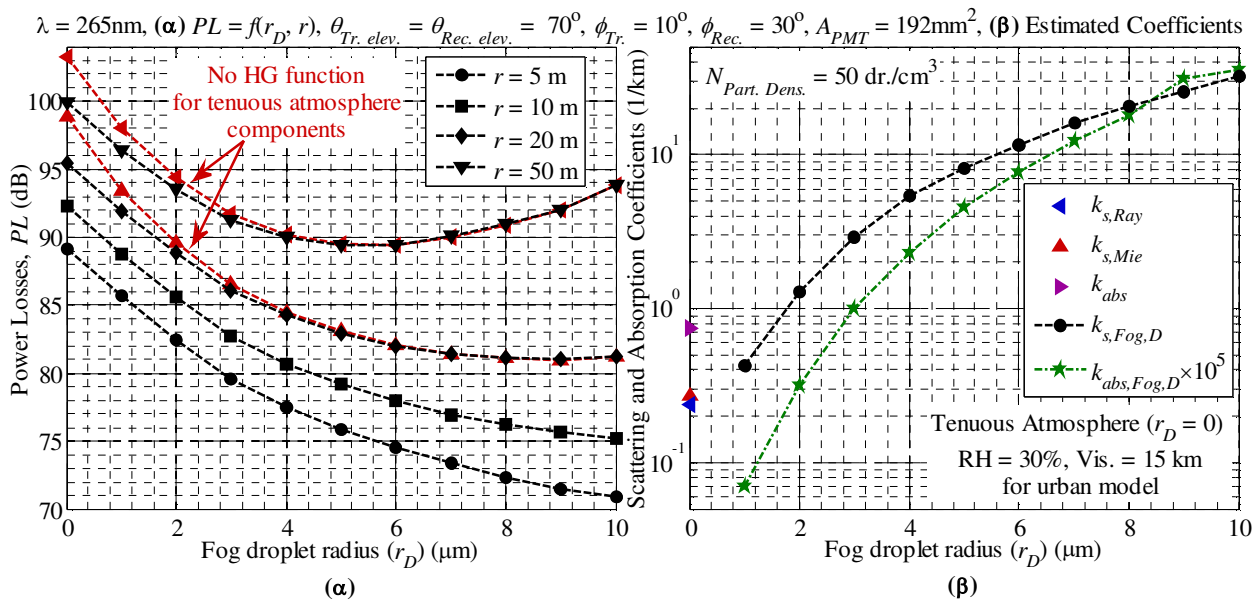
$$P'(\cos(\theta)) = \frac{k_{s, Ray}}{k'_s} \times p_{Ray}(\cos(\theta)) + \frac{k_{s, Mie}}{k'_s} \times p_{Mie}(\cos(\theta)) + \frac{k_{s, Fog, D}}{k'_s} \times p_{Fog, D}(\cos(\theta)) \quad (3.32)$$

όπου $p_{Fog, D}(\cos(\theta))$ η συνάρτηση Henyey-Greenstein με τον κατάλληλο παράγοντα ασυμμετρίας (g) που προέκυψε από τις εξισώσεις της Mie για την περίπτωση ακτίνας r_D . $P'(\cos(\theta))$ θα είναι η νέα συνάρτηση φάσης που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής από την οποία θα προκύψουν τυχαίες τιμές γωνιών σκέδασης ως προς την κατεύθυνση που έχει το εκάστοτε φωτόνιο σε κάποια θέση. Επαναλαμβάνεται ότι η πρόσθεση των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης δίνοντας νέες τιμές k'_s και k'_a , αλλά σταθμίζοντας ταυτόχρονα και τις συναρτήσεις φάσεις, δικαιολογείται από τη θεωρούμενη πρόσθεση στο μέσο των σταγονιδίων ομίχλης και όχι από τη φυσική εμφάνιση ομίχλης, αλλά και από το γεγονός ότι η στατιστική της σκέδασης περιγράφεται από αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής με την ομίχλη να αποτελεί περίπτωση Mie σκέδασης.

Η γωνία ανύψωσης τόσο του πομπού όσο και του δέκτη τέθηκε ίση με $\theta_{Tr. elev.} = \theta_{Rec. elev.} = 70^\circ$. Η γωνία απόκλισης της δέσμης τέθηκε $\varphi_{Tr.} = 10^\circ$ και το FOV του δέκτη ορίστηκε ίσο με $\varphi_{Rec.} = 30^\circ$. Η επιφάνεια του PMT τέθηκε ίση με 192 mm^2 (ίση με αυτή του PMT R7154 [167]) και θεωρήθηκε κυκλική. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών απεικονίζονται στο Σχήμα 3.24(α). Φαίνεται ότι για τις συνθήκες που τέθηκαν για τις υψηλές γωνίες ανύψωσης, για μικρές αποστάσεις 5, 10 και 20 μέτρων, η αυξανόμενη ακτίνα των σταγονιδίων ομίχλης, δηλαδή η πύκνωση του μέσου, μέχρι μία τιμή $r_D = 10 \mu\text{m}$ [170] θα προκαλέσει μείωση των απωλειών με μία οριακή μεταστροφή να φαίνεται μετά από ακτίνα $r_D = 9 \mu\text{m}$ για τα 20 μέτρα. Για τη μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης των 50 μέτρων, μετά από μία κρίσιμη τιμή για την ακτίνα των σταγονιδίων που στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν $r_D = 6 \mu\text{m}$, ο αρχικός επωφελής συμβιβασμός υπέρ της σκέδασης και ενάντια της απορρόφησης αντιστρέφεται εις βάρος της σκέδασης εξαιτίας των μεγαλύτερων αποστάσεων που πρέπει να καλύψουν τα φωτόνια για να φθάσουν στο δέκτη και της αύξησης του συντελεστή απόσβεσης του μέσου (k_e). Στο Σχήμα 3.24(β), φαίνονται οι συντελεστές σκέδασης Mie αποκλειστικά λόγω της ομίχλης για τη συγκέντρωση σταγονιδίων που ορίστηκε για καθεμία περίπτωση ακτίνας σταγονιδίων που εξετάστηκε. Βοηθητικά, δίνονται και οι τιμές των συντελεστών σκέδασης Rayleigh ($k_{s, Ray}$), Mie ($k_{s, Mie}$), απορρόφησης (k_{abs}) του μέσου όπως εκτιμήθηκαν από την εφαρμογή του αστικού μοντέλου αερολυμάτων και από τους σχετικούς αναλυτικούς τύπους. Αυτό που είναι εύκολο να δει κανείς είναι ότι η αύξηση της ακτίνας των σταγονιδίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή σκέδασης. Παρατηρώντας την σχέση (3.32) φαίνεται καθαρά ότι αυτή η αύξηση του $k_{s, Fog, D}$ προκαλεί ανάδειξη των

χαρακτηριστικών της ομίχλης κατά τη σκέδαση, βάσει του τρόπου με τον οποίο σταθμίζεται η συνάρτηση φάσης. Αυτό σημαίνει ότι με τη στάθμιση θα είναι σημαντικότερη η συνεισφορά στις σκεδάσεις από την ομίχλη και ο τρίτος όρος της (3.32) θα είναι ο ισχυρότερος. Από την άλλη, οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης που αφορούν τις εκδοχές ομίχλης ($k_{abs,Fog,D}$) ενσωματώθηκαν στο Σχήμα 3.24(β) και όλες οι τιμές είναι πολλαπλασιασμένες επί 10^5 καθώς είναι τάξεις μεγέθους μικρότερες από τους αντίστοιχους συντελεστές σκέδασης [170]. Για παράδειγμα, για $r_D = 3 \mu\text{m}$, ο συντελεστής απορρόφησης λόγω των σταγονιδίων προέκυψε περίπου $9.97 \times 10^{-6} \text{ km}^{-1}$ και στο διάγραμμα φαίνεται τιμή 9.97×10^{-1} . Η συμπεριφορά των συντελεστών απορρόφησης είναι ίδια με αυτή των συντελεστών σκέδασης, δηλαδή αυξητική με την αύξηση της ακτίνας. Ωστόσο, η επίδρασή τους είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή των συντελεστών σκέδασης, καθώς αύξηση των ακτίνων των σταγονιδίων σημαίνει αύξηση και των αντίστοιχων συντελεστών απόσβεσης κυρίως, όμως, λόγω της αύξησης των συντελεστών σκέδασης. Σχολιασμός των καμπυλών με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 3.24(α) θα γίνει στην ενότητα 3.2.5.5. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει μετά από μία τροποποίηση της συνάρτησης φάσης για τη σκέδαση Mie που αφορούσε τα μικροσωματίδια υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα, δε χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση Henyey-Greenstein, αλλά η συνάρτηση φάσης που προέκυψε από την τέταρτη εξίσωση στην (3.31) για τη σκέδαση Mie λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες που τέθηκαν για το αστικό μοντέλο ($RH = 30\%$, $Vis. = 15 \text{ km}$).

Επομένως, για σχετικά μικρές αποστάσεις, στην πειραματική διαδικασία που θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα, σε γενικές γραμμές αυτό που αναμένεται είναι μία μείωση απωλειών.



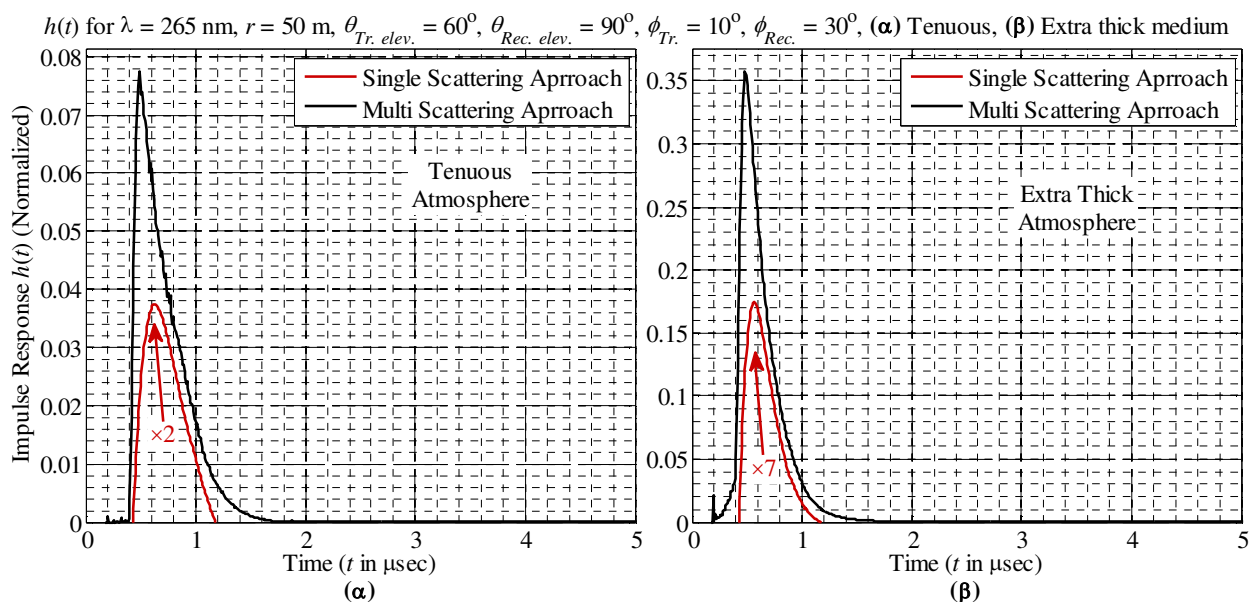
Σχήμα 3.24. (α) Θεωρητική εκτίμηση των απωλειών ισχύος (Power Losses – PL) για διαφορετικές αποστάσεις κάλυψης και για διαφορετικές ακτίνες σταγονιδίων ομίχλης ξεκινώντας από συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας (ακτίνας σταγονιδίων ομίχλης ίση με 0) μέχρι πολύ πυκνή ατμόσφαιρα (ακτίνα σταγονιδίων ίση με $10 \mu\text{m}$). (β) Εκτιμήσεις των συντελεστών σκέδασης Rayleigh ($k_{s,Ray}$), Mie ($k_{s,Mie}$), απορρόφησης (k_{abs}) του μέσου εφαρμόζοντας το αστικό μοντέλο για καθεστώς αραιής ατμόσφαιρας με $RH = 30\%$, $Vis. = 15 \text{ km}$ και οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης αποκλειστικά λόγω της ομίχλης με συγκέντρωση 50 σταγονιδίων ανά cm^3 .

Προτού κλείσει αυτή η υποενότητα, τίθεται το θέμα της συγκριτικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κρουστικής απόκρισης και της απόκρισης συχνότητας του καναλιού. Είναι αναμενόμενο ότι το μοντέλο μονής σκέδασης θα αρχίσει να δίνει ανεπαρκή αποτελέσματα με την αύξηση της απόστασης και με την εντονότερη σκέδαση σε ένα πυκνότερο περιβάλλον. Η

απεικόνιση θα γίνει μέσω αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για συγκεκριμένα παραδείγματα. Μένοντας στα 265 nm, η γωνία ανύψωσης του πομπού τέθηκε ίση με $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$ και του δέκτη $\theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$, η γωνία απόκλισης της δέσμης του πομπού διατηρήθηκε σε τιμή $\varphi_{Tr.} = 10^\circ$, όπως και το FOV του δέκτη $\varphi_{Rec.} = 30^\circ$. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο μονής σκέδασης της υποενότητας 3.2.2.1 και το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων της υποενότητας 3.2.2.2 και την περίπτωση αραιής και πολύ πυκνής ατμόσφαιρας με τις τιμές των συντελεστών που αναφέρει ο Πίνακας 3.2, προέκυψαν οι κανονικοποιημένες κρουστικές αποκρίσεις οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 3.25(α) και στο Σχήμα 3.25(β) για απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ίση με 50 μέτρα για τις δύο περιπτώσεις ατμόσφαιρας, αντίστοιχα. Αναφέροντας «κανονικοποιημένη κρουστική απόκριση» εννοείται ότι το άθροισμα των τιμών της κρουστικής απόκρισης που προέκυψε από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων έχει τεθεί ίσο με το λόγο των απωλειών που εκτιμήθηκαν από το μοντέλο μονής σκέδασης προς αυτές που προέκυψαν από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων. Δεν πρόκειται για το ολοκλήρωμα στο χρόνο αλλά για το απλό άθροισμα τιμών. Αυτός ο τρόπος απεικόνισης είναι δίκαιος διότι δείχνει και τη σχέση λαμβανόμενης ισχύος για τις δύο περιπτώσεις μοντέλων αν ένας πομπός θεωρηθεί ότι έχει εκπέμψει την ίδια ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση αραιής ατμόσφαιρας (Σχήμα 3.25(α)), από το μοντέλο μονής σκέδασης προέκυψε κανάλι με απώλειες περίπου 104.63 dB ενώ για την περίπτωση του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων προέκυψαν απώλειες 98.85 dB κατά προσέγγιση. Αυτό σημαίνει ότι το άθροισμα των τιμών της κρουστικής απόκρισης όπως προέκυψε από τις πολλαπλές σκεδάσεις θα είναι κάτι λιγότερο από 4 λόγω της διαφοράς κατά 5.78 dB των δύο τιμών απωλειών. Το άθροισμα των τιμών της κρουστικής απόκρισης για το μοντέλο μονής σκέδασης τέθηκε σε τιμή 2 ώστε οι δύο γραφικές να έχουν συγκρίσιμο μέγεθος. Για την αποφυγή λανθασμένης απεικόνισης, η περίοδος δειγματοληψίας για τις δύο κυματομορφές είναι ίδια. Παρατηρούμε ότι ο διαφορετικός τρόπος υπολογισμού των απωλειών για τα δύο μοντέλα έδωσε μικρότερες απώλειες για το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων, αλλά αυτό που πρέπει να παρατηρήσει κανείς είναι η παρόμοια μορφή των συναρτήσεων κρουστικής απόκρισης. Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση των πολλαπλών σκεδάσεων δεν είναι σημαντική στο αραιό μέσο για τέτοιες αποστάσεις και γι' αυτές τις γωνίες ανύψωσης που τέθηκαν. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η ολίσθηση από την αρχή των αξόνων οφείλεται στην αρχική «θεωρούμενη» καθυστέρηση άφιξης των φωτονίων στο δέκτη για το μοντέλο μονής σκέδασης ή στην καθυστέρηση της εν δυνάμει άφιξης των φωτονίων στο δέκτη για το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων.

Για την περίπτωση του πολύ πυκνού καναλιού (Σχήμα 3.25(β)) το άθροισμα των τιμών της κρουστικής απόκρισης από το μοντέλο μονής σκέδασης τέθηκε σε τιμή 7, ενώ το άθροισμα της απόκρισης από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων τέθηκε ίσο με μία τιμή περίπου 13.71, που αντιστοιχεί σε μία διαφορά 11.37 dB, καθώς οι απώλειες από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων εκτιμήθηκαν περίπου 91.23 dB, ενώ από το μοντέλο μονής σκέδασης οι απώλειες ήταν περίπου 102.60 dB. Εδώ παρατηρούμε ότι υπάρχει ομοιότητα των κρουστικών αποκρίσεων από το δεξί μέρος τους, αλλά από την αριστερή πλευρά υπάρχει ένα μικρό τμήμα της κρουστικής απόκρισης από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων που απουσιάζει από την κρουστική απόκριση του μοντέλου μονής σκέδασης. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μία επίδραση των πολλαπλών σκεδάσεων η οποία θα προκαλέσει μία διεύρυνση της κρουστικής απόκρισης στο πολύ πυκνό κανάλι. Αυτό το τμήμα της κρουστικής απόκρισης θα προκύψει από σκεδάσεις φωτονίων μεγαλύτερης τάξης που θα οδηγήσουν αυτά τα φωτόνια εντός του FOV του δέκτη με μικρότερη καθυστέρηση από τα φωτόνια που θα διέλθουν από τον κοινό όγκο που σχηματίζεται από τη γωνία απόκλισης της δέσμης του πομπού και το FOV του δέκτη. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες θα είναι μικρότερες με το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων και αυτό επιβεβαιώνεται από το ότι η διαφορά των δύο

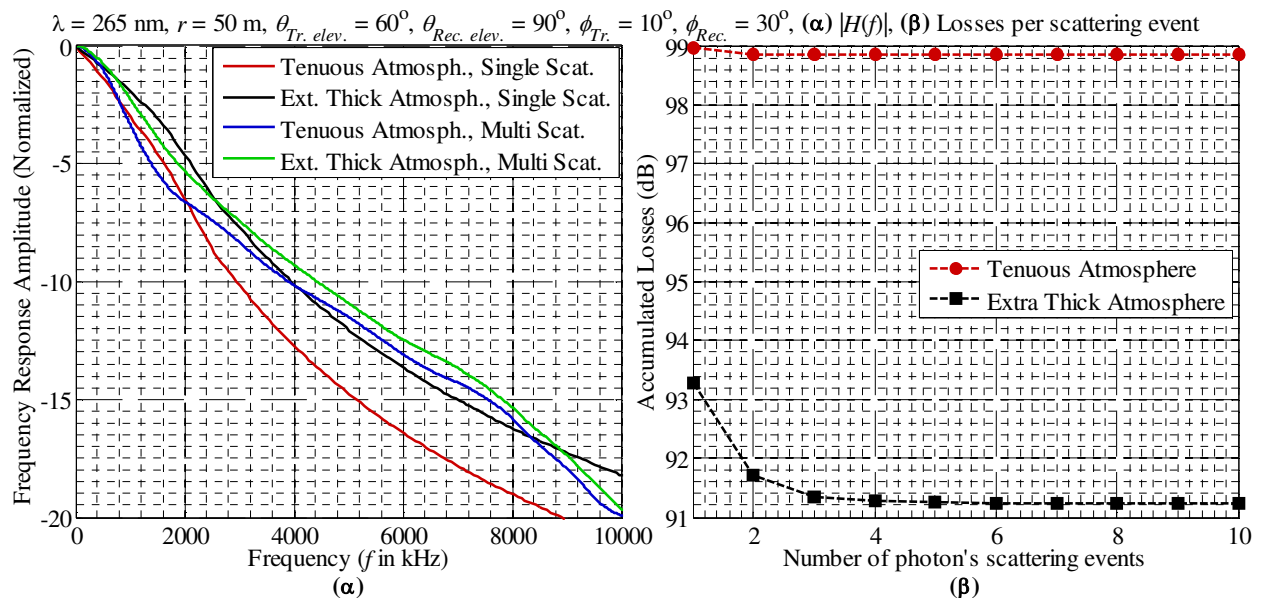
μοντέλων από το αραιό στο πυκνό κανάλι δεν παραμένει 5.78 dB, αλλά αυξάνεται στα 11.37 dB, όπως αναφέρθηκε.



Σχήμα 3.25. Κανονικοποιημένες κρουστικές αποκρίσεις των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 50 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μόνης σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για (α) αραιή και (β) πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.

Ταυτόχρονα, η μικρή διεύρυνση της κρουστικής επίδρασης θα έχει επίδραση στην απόκριση συχνότητας του καναλιού. Τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας για τις δύο περιπτώσεις ατμόσφαιρας και για τα δύο μοντέλα καναλιών φαίνονται στο Σχήμα 3.26(α). Από το μοντέλο μόνης σκέδασης, το εύρος ζώνης του καναλιού στα 3 dB υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας προέκυψε περίπου 1011 kHz, ενώ για πολύ πυκνή ατμόσφαιρα εκτιμήθηκε κοντά στα 1466 kHz. Από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων, οι αντίστοιχες τιμές εύρους ζώνης ήταν περίπου 929 kHz και 1222 kHz, για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, αντίστοιχα. Η μικρή πτώση του εύρους ζώνης για την περίπτωση του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων σε σχέση με το αποτέλεσμα από το μοντέλο μόνης σκέδασης δικαιολογείται από τη μορφή της κρουστικής απόκρισης. Επιπλέον, με το συγκεκριμένο FOV του δέκτη, επιβεβαιώνεται ότι το κανάλι περιορίζεται από τις απώλειες και όχι από το εύρος ζώνης, κάτι που ήταν αναμενόμενο. Η μόνη διαφορά που υπεισέρχεται με το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων είναι ότι για τη μέση απόσταση των 50 μέτρων πέφτει το εύρος ζώνης του πυκνού καναλιού λόγω των προσθέτων σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο. Επομένως, πρόσθετες σκεδάσεις στο συγκεκριμένο παράδειγμα σημαίνει πρόσθετες εκτιμήσεις πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης με μεγαλύτερη ή μικρότερη καθυστέρηση, δηλαδή μείωση του εύρους ζώνης, αλλά ακόμα μεγαλύτερη μείωση των απωλειών. Η επίδραση των δυνατών σκεδάσεων ανά φωτόνιο στις τελικές απώλειες φαίνεται στο Σχήμα 3.26(β). Εδώ το πλήθος των δυνατών σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο είναι μέχρι 16, αλλά απεικονίζονται μέχρι 10 και για τις δύο περιπτώσεις καναλιών βάσει του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων. Λόγω της στατιστικής του μοντέλου, ένα φωτόνιο μπορεί να υποστεί ακόμη και μία μόνο σκέδαση, παρά το όριο των 16 που τέθηκε. Αυτό που υπολογίστηκε ήταν οι σωρευμένες απώλειες μετά από κάθε «γεγονός» σκέδασης του αλγορίθμου για τα φωτόνια που προσομοιώθηκαν. Σαφέστερα, μετά το βήμα των δεύτερων σκεδάσεων, το σήμα, δηλαδή οι πιθανότητες επιτυχούς άφιξης των φωτονίων ή όμοια η αντίστροφη τιμή των απωλειών, που υπολογιζόταν στο δέκτη μετά την πρώτη σκέδαση θα προστεθεί στο άθροισμα των πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης από τις δεύτερες σκεδάσεις και θα υπολογιστεί η μέση τιμή ως προς το πλήθος των φωτονίων που εξέπεμψε ο πομπός ανεξάρτητα αν κάποια από τα φωτόνια δεν επιβίωσαν από την

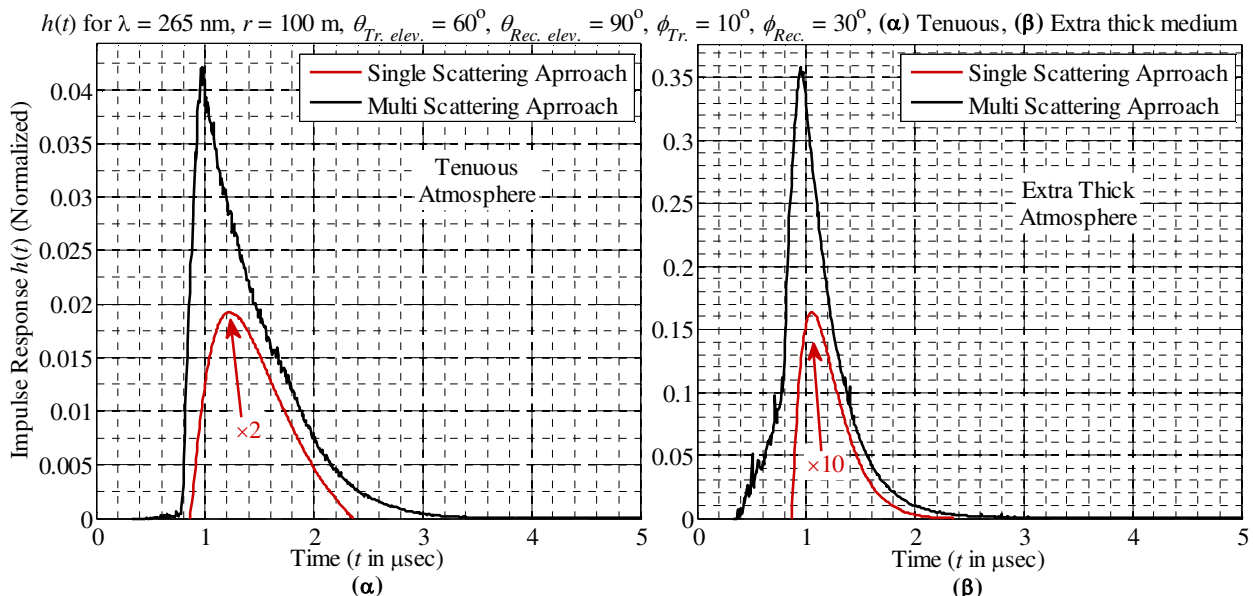
πρώτη σκέδαση ή η πιθανότητα επιβίωσής τους ήταν μηδενική σε αυτό το βήμα διότι βρέθηκαν εκτός του FOV παρά το ότι επιβίωσαν. Η αντίστροφη αυτής της μέσης τιμής είναι οι απώλειες του καναλιού μετά από το πολύ δύο σκεδάσεις για καθένα φωτόνιο. Έπειτα, τα αθροίσματα των πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης από τις πρώτες και τις δεύτερες σκεδάσεις θα προστεθούν στις πιθανότητες επιτυχούς άφιξης από τις τρίτες σκεδάσεις και θα ληφθεί μία μέση τιμή όμοια με πριν κοκ [155]. Τελικά, μετά τη 16η θεωρούμενη σκέδαση θα προκύψουν οι εκτιμούμενες απώλειες του καναλιού. Καθώς αυξάνονται τα γεγονότα σκέδασης είναι αναμενόμενο ότι θα πέφτουν οι απώλειες μέχρι κάποια τιμή πλήθους σκεδάσεων από την οποία και μετά δε θα υπάρχει επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτό θα συμβεί επειδή όσα φωτόνια κι αν έχουν επιβιώσει δε θα συνεισφέρουν στο τελικό άθροισμα των πιθανοτήτων διότι από τις μετακινήσεις τους θα έχουν υποβαθμιστεί σημαντικά οι πιθανότητες επιβίωσης τους. Για την μεν αραιή ατμόσφαιρα, η επίδραση των δεύτερων σκεδάσεων των φωτονίων είναι ελάχιστη σε σχέση με αυτή των αρχικών σκεδάσεων. Από την τρίτη σκέδαση η μείωση των απωλειών είναι αμελητέα δίνοντας την τελική τιμή απωλειών των 98.85 dB. Άρα για το αραιό κανάλι, δύο σκεδάσεις ή ακόμα και μία αρκεί για την εκτίμηση της κρουστικής απόκρισης. Επαναλαμβάνεται ότι σε σχέση με το μοντέλο μονής σκέδασης, η διαφορά στις απώλειες έχει να κάνει με τη γεωμετρία του κοινού όγκου που σχηματίζεται από την γωνία απόκλισης της δέσμης του πομπού και από το FOV του δέκτη. Από την άλλη, για την πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, φαίνεται ότι μέχρι και το 5ο γεγονός σκέδασης για όσα φωτόνια έχουν επιβιώσει, η επίδραση στις απώλειες είναι σημαντική. Αυτό σημαίνει ότι πολύ λίγα φωτόνια θα επιβιώσουν για να υποστούν πάνω από 6 σκεδάσεις. Το κέρδος των πολλαπλών σκεδάσεων αντισταθμίζεται ελαφρώς από την πτώση του εύρους ζώνης (Σχήμα 3.26(α)) λόγω της διεύρυνσης της κρουστικής απόκρισης. Ωστόσο, αυτή η πτώση δεν έχει τελικά κάποια σημαντική αρνητική επίδραση, καθώς τα σήματα που θα μεταδοθούν είναι κατά τάξεις μεγέθους μικρότερου ρυθμού, ώστε να είναι δυνατή η μετάδοσή τους με λογικά επίπεδα ισχύος.



Σχήμα 3.26. (α) Μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 50 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Όλες οι αποκρίσεις συχνότητας έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη τιμή τους. (β) Σωρευτικές απώλειες συναρτήσεως του πλήθους των σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο βάσει του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.

Διατηρώντας όλες τις γεωμετρικές παραμέτρους ως έχουν και αυξάνοντας την απόσταση στα 100 μέτρα, εκτιμήθηκε η επίδραση των πολλαπλών σκεδάσεων καθώς και τα όρια των μοντέλων, ιδίως αυτού της μονής σκέδασης. Για την αραιή ατμόσφαιρα,

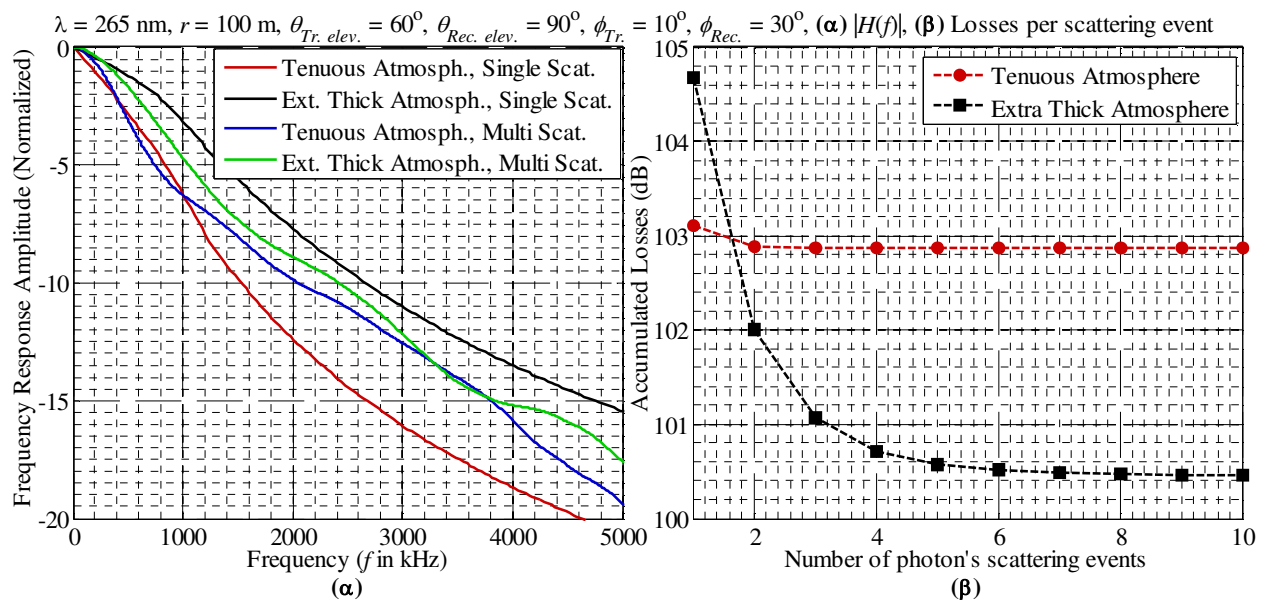
οι κρουστικές αποκρίσεις που προέκυψαν απεικονίζονται στο Σχήμα 3.27(α). Η κρουστική απόκριση από το μοντέλο μονής σκέδασης αθροίζει σε μία τιμή ίση με 2, ενώ η κρουστική απόκριση από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων αθροίζει σε μία τιμή περίπου ίση με 3.81. Αυτή η τιμή δικαιολογείται από το ότι οι απώλειες από το μοντέλο μονής σκέδασης εκτιμήθηκαν κοντά στα 108.68 dB, ενώ οι απώλειες από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων ήταν περίπου 102.88 dB, δηλαδή και πάλι περίπου 5.80 dB όπως και στα 50 μέτρα. Αυτό είναι μία ένδειξη ότι παρά το διαφορετικό τρόπο υπολογισμού των απωλειών από τα δύο μοντέλα, η σταθερή διαφορά σε decibel (και ο σταθερός λόγος σε δεκαδικές τιμές) σημαίνει ότι αυτό που επικρατεί συντριπτικά κατά την εκτίμηση των απωλειών είναι η πρώτη σκέδαση, με τη δεύτερη σκέδαση να έχει πολύ μικρότερη επίδραση και για τα 100 μέτρα σε καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας. Η παρόμοια μορφή των καμπυλών στο Σχήμα 3.27(α) ενισχύει το επιχείρημα. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες και γεωμετρικές παραμέτρους, απαιτείται μία αύξηση του μήκους της ζεύξης ώστε να εμφανιστούν κρουστικές αποκρίσεις πιο διευρυμένες σε σχέση με αυτές της μονής σκέδασης κυρίως από τη αριστερή πλευρά, που αφορούν πιθανότητες επιτυχούς άφιξης από μετακινήσεις φωτονίων με πολλαπλά βήματα Δs βάσει της παραγράφου 3.2.2.2. Περνώντας στην πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, η επίδραση του περιβάλλοντος εντονότερων σκεδάσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.27(β), όπου δίνονται οι καμπύλες των κρουστικών αποκρίσεων από τα δύο μοντέλα. Η κρουστική απόκριση από το μοντέλο μονής σκέδασης ορίσθηκε να αθροίζει σε τιμή 10 για εποπτικούς λόγους, ενώ οι τιμές της κρουστικής απόκρισης από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων αθροίζουν σε μία τιμή περίπου 23.44 που αντιστοιχεί στη διαφορά κατά 13.70 dB των απωλειών από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων (100.45 dB) σε σχέση με τις απώλειες από το μοντέλο μονής σκέδασης (114.15 dB). Υπενθυμίζεται ότι σε όλα τα σχήματα όπου απεικονίζονται κρουστικές αποκρίσεις και από τα δύο μοντέλα, αυτές είναι ευθυγραμμισμένες χρονικά. Στο Σχήμα 3.27(β), φαίνεται η διεύρυνση της απόκρισης από την αριστερή πλευρά που είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης των πολλαπλών σκεδάσεων που λείπουν όταν λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο μία μόνο σκέδαση στο κοινό όγκο που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.2.2.1.



Σχήμα 3.27. Κανονικοποιημένες κρουστικές αποκρίσεις των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 100 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για (α) αραιή και (β) πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.

Τα μέτρα των αντίστοιχων αποκρίσεων συχνότητας φαίνονται ομαδοποιημένα στο Σχήμα 3.28(α) για τα δύο μοντέλα στα δύο περιβάλλοντα όπου προσομοιώθηκαν οι μεταδόσεις φωτονίων. Για την περίπτωση αραιής ατμόσφαιρας, η ελαφρώς διαφορετική

μορφή της κρουστικής απόκρισης από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων με τη μικρή χρονική διεύρυνση σε σχέση με αυτή από το μοντέλο μονής σκέδασης έδωσε εύρος ζώνης λίγο μικρότερο σε σχέση με αυτό από την απόκριση συχνότητας όπως προέκυψε από το απλούστερο μοντέλο μονής σκέδασης. Συγκριτικά, το εύρος ζώνης από το μοντέλο μονής σκέδασης εκτιμήθηκε κοντά στα 529.73 kHz, ενώ το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων οδήγησε σε μέτρο της απόκρισης συχνότητας με εύρος στα 3 dB κοντά στα 490.39 dB. Όσον αφορά την πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, η διευρυμένη κρουστική απόκριση από το μοντέλο μονής σκέδασης είχε ως αποτέλεσμα εύρος ζώνης στο πεδίο των συχνοτήτων κοντά στα 723.56 kHz σε σχέση με τα 971.59 kHz από το μοντέλο μονής σκέδασης. Το περιβάλλον εντονότερων σκεδάσεων όχι μόνο οδήγησε σε μικρότερες απώλειες ακόμα και στα 100 μέτρα για τη ζεύξη με τις γωνίες ανύψωσης που θεωρήθηκαν, αλλά είχε θετική επίδραση και στο εύρος ζώνης μειώνοντας το χρονικό εύρος των κρουστικών αποκρίσεων στο πυκνό μέσο σε σχέση με το αραιό που σημαίνει χρονική συσσώρευση πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης φωτονίων στο δέκτη με παρόμοιες τιμές καθυστερήσεων.



Σχήμα 3.28. (α) Μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 100 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Όλες οι αποκρίσεις συχνότητας έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη τιμή τους. (β) Σωρευτικές απώλειες συναρτήσεως του πλήθους των σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο βάσει του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα.

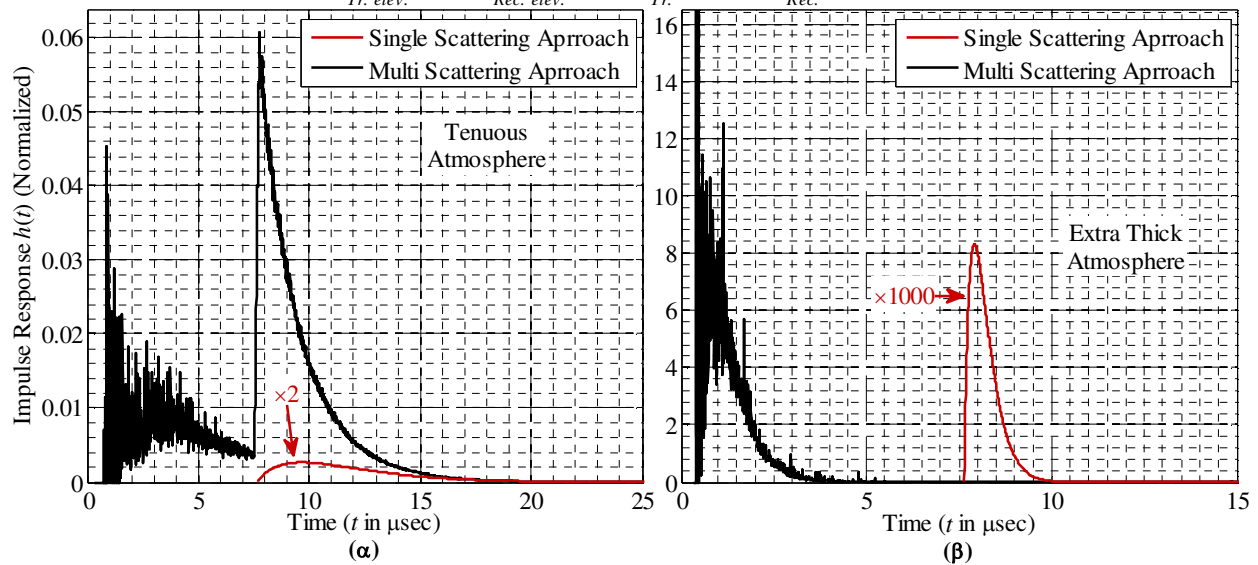
Απομονώνοντας την επίδραση των πολλαπλών σκεδάσεων στη συσσώρευση των απωλειών χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η παράμετρος του χρόνου, η επίδραση μέχρι και 10 σκεδάσεων ανά φωτόνιο για αραιό και πολύ πυκνό μέσο από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.28(β). Όπως και πριν, στην αραιή ατμόσφαιρα οι πολλαπλές σκεδάσεις δεν οδηγούν σε σημαντική μείωση των απωλειών, καθώς μετά τις δεύτερες σκεδάσεις (για όσα φωτόνια αυτές πραγματοποιηθούν), οι απώλειες συγκλίνουν πολύ κοντά στην τελική τιμή των 102.88 dB. Η μεταβολή από την πρώτη στη δεύτερη σκέδαση είναι περίπου 0.22 dB, που επιβεβαιώνει τον ισχυρισμό της συντριπτικής συμβολής στις απώλειες της πρώτης σκέδασης μέσα σε αραιό μέσο. Αντίθετα, υπό καθεστώς πολύ πυκνής ατμόσφαιρας στα 100 μέτρα, φαίνεται ότι απαιτούνται 8 σκεδάσεις για να θεωρηθεί ότι έχει επιτευχθεί η σύγκλιση των απωλειών κοντά στα 100.45 dB. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η τιμή των απωλειών από μία μόνο σκέδαση στο πολύ πυκνό μέσο ήταν μεγαλύτερη από τις απώλειες μετά από μία σκέδαση στο αραιό μέσο. Ωστόσο η συμπεριφορά αυτή ανατρέπεται μετά από τη δεύτερη σκέδαση. Αυτή η ανατροπή δεν εμφανίστηκε στο μοντέλο μονής σκέδασης,

όπου οι απώλειες στην αραιή ατμόσφαιρα ήταν μικρότερες από αυτές στο πολύ πυκνό μέσο. Ο Πίνακας 3.4 περιλαμβάνει συγκεντρωτικά τις τιμές των απωλειών και του εύρους ζώνης για τα συγκεκριμένα παραδείγματα.

Στις συναρτήσεις κρουστικής απόκρισης που προέκυψαν απευθείας από τις πολλαπλές σκεδάσεις δεν εφαρμόστηκε κάποια συνάρτηση με κατάλληλη προσαρμογή κάποιων παραμέτρων, πχ όπως τα παραμετρικά μοντέλα για τις κρουστικές αποκρίσεις [149], [177]. Η εφαρμογή τους θα οδηγούσε σε ομαλότερες καμπύλες για τις αντίστοιχες αποκρίσεις συχνότητας. Ωστόσο, σε κάποια ακραία σενάρια, θα χρειαζόνταν σοβαρές τροποποιήσεις των θεωρούμενων παραμετρικών μοντέλων, όπως οι συναρτήσεις γάμμα που έχουν ήδη προταθεί [149], και ταυτόχρονα θα αποτύγχανε πλήρως το μοντέλο μονής σκέδασης. Για παράδειγμα, θεωρούμε ότι το μήκος κύματος παραμένει 265 nm. Τα περιβάλλοντα σκέδασης είναι τα δύο που εξετάστηκαν ήδη. Οι τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: $\theta_{Tr. elev.} = 90^\circ$, $\theta_{rec. elev.} = 90^\circ$, $\varphi_{Tr.} = 0.171^\circ$, $\varphi_{Rec.} = 10^\circ$. Η γωνία απόκλισης της δέσμης του πομπού αντιστοιχεί σε περίπου 3 mrad. Μία τέτοια γωνία απόκλισης είναι κοντά σε αυτή ενός ND:YAG laser σαν αυτά που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πειραματικές διερευνήσεις καναλιών [153]. Τα διαγράμματα των κρουστικών αποκρίσεων που προέκυψαν φαίνονται στο Σχήμα 3.29(α) για το αραιό κανάλι και στο Σχήμα 3.29(β) για την περίπτωση πολύ πυκνής ατμόσφαιρας. Για την αραιή ατμόσφαιρα (Σχήμα 3.29(α)), το άθροισμα των τιμών της κρουστικής απόκρισης από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων ήταν περίπου 20.19, ενώ για το μοντέλο μονής σκέδασης το άθροισμα των τιμών τέθηκε σε τιμή 2. Οι απώλειες από το μοντέλο μονής σκέδασης εκτιμήθηκαν κοντά στα 137.28 dB. Από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων, οι απώλειες ήταν περίπου 124.23 dB, δηλαδή περίπου 13 dB ή όμοια 20 φορές μικρότερες. Ταυτόχρονα, παρά το γεγονός ότι κατά το «σβήσιμο» από τη δεξιά πλευρά των δύο κρουστικών αποκρίσεων, οι δύο κυματομορφές μοιάζουν, στο αρχικό κομμάτι από αριστερά, οι μηδενικές τιμές από το μοντέλο μονής σκέδασης αντικαθίστανται από την παρουσία μη μηδενικών πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης φωτονίων που έχουν υποστεί δύο ή περισσότερες σκεδάσεις [155]. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για πιθανότητες επιτυχούς άφιξης φωτονίων που έφθασαν με μικρότερη καθυστέρηση εντός του FOV μέσω των μετακινήσεων τους, σε σχέση με άλλα φωτόνια που υπέστησαν μία σκέδαση μέσα στον κοινό όγκο και βρέθηκαν απευθείας εντός του FOV. Η επίδραση των πολλαπλών σκεδάσεων έγινε εντονότερη και για την αραιή ατμόσφαιρα λόγω των μεγάλων γωνιών ανύψωσης και της μικρής γωνίας απόκλισης της δέσμης του πομπού. Ο κοινός όγκος από τη γωνία απόκλισης και το FOV δημιουργείται σε τέτοιο ύψος για το οποίο οι σκεδάσεις πρώτης τάξης θα δώσουν τιμές πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης με μικρότερη τιμή σε σχέση με πολλά φωτόνια που θα υποστούν περισσότερες σκεδάσεις και θα βρεθούν σε μικρότερο ύψος εντός του FOV του δέκτη. Δηλαδή, αρχίζει να μειώνεται η πιθανότητα με μία μόνο σκέδαση και μετακίνηση να βρεθεί ένα φωτόνιο εντός του FOV για να μετρηθεί και να καταγραφεί η πιθανότητα επιτυχούς άφιξης του. Επομένως, η κρουστική απόκριση έχει δύο τμήματα που επιδρούν σημαντικά, ενώ οι απώλειες είναι σημαντικά μειωμένες σε σχέση με το μοντέλο μονής σκέδασης. Από την άλλη στο Σχήμα 3.29(β), η αστοχία του μοντέλου μονής σκέδασης είναι απελπιστική. Οι απώλειες από το μοντέλο μονής σκέδασης εκτιμήθηκαν κοντά σε μία τιμή 241.24 dB, ενώ οι αντίστοιχες απώλειες από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων εκτιμήθηκαν κοντά στα 120.22 dB, δηλαδή καλύτερα από την περίπτωση της αραιής ατμόσφαιρας όταν χρησιμοποιήθηκε το ίδιο μοντέλο. Το άθροισμα των τιμών της κρουστικής απόκρισης έχει διαιρεθεί με 10^9 για την περίπτωση των πολλαπλών σκεδάσεων (δεν αναφέρεται στο σχήμα), ενώ το άθροισμα των σημείων της κρουστικής απόκρισης από το μοντέλο μονής σκέδασης κανονικοποιήθηκε στην τιμή 1000. Αυτή η κρουστική απόκριση θα βρισκόταν κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη της κρουστικής απόκρισης από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων και δε θα φαινόταν αν δε γινόταν αυτή η

κανονικοποίηση. Επιπλέον, δεδομένης της χρονικής ευθυγράμμισης των κρουστικών αποκρίσεων, το σημαντικότερο τμήμα της απόκρισης για την περίπτωση του πολύ πυκνού καναλιού αφορά την πιθανότητα επιτυχούς άφιξης φωτονίων που έχουν υποστεί περισσότερες από δύο σκεδάσεις. Άρα, σε αυτό το παράδειγμα μεγάλων γωνιών ανύψωσης και ιδιαίτερα στενής γωνίας απόκλισης της δέσμης, για την ικανοποιητική μοντελοποίηση του καναλιού απαιτείται ένα μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων, αν δεχθούμε ότι ποσότητα ενέργειας μπορεί λόγω σκέδασης να φύγει εκτός της αρχικής δέσμης και μέσω νέας σκέδασης να κατευθυνθεί εντός του FOV του δέκτη. Ήταν αναμενόμενο σε ένα περιβάλλον εντονότερων σκεδάσεων ότι τέτοιες μετακινήσεις φωτονίων θα συνέβαιναν σε οξύτερο βαθμό, κάνοντας πολύ σημαντική την επίδραση των σκεδάσεων μεγαλύτερης τάξης με τη μείωση του μήκους των βημάτων Δs αλλά και την ταυτόχρονη αύξηση του συντελεστή απόσβεσης (k_e), λόγω της αύξησης των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης.

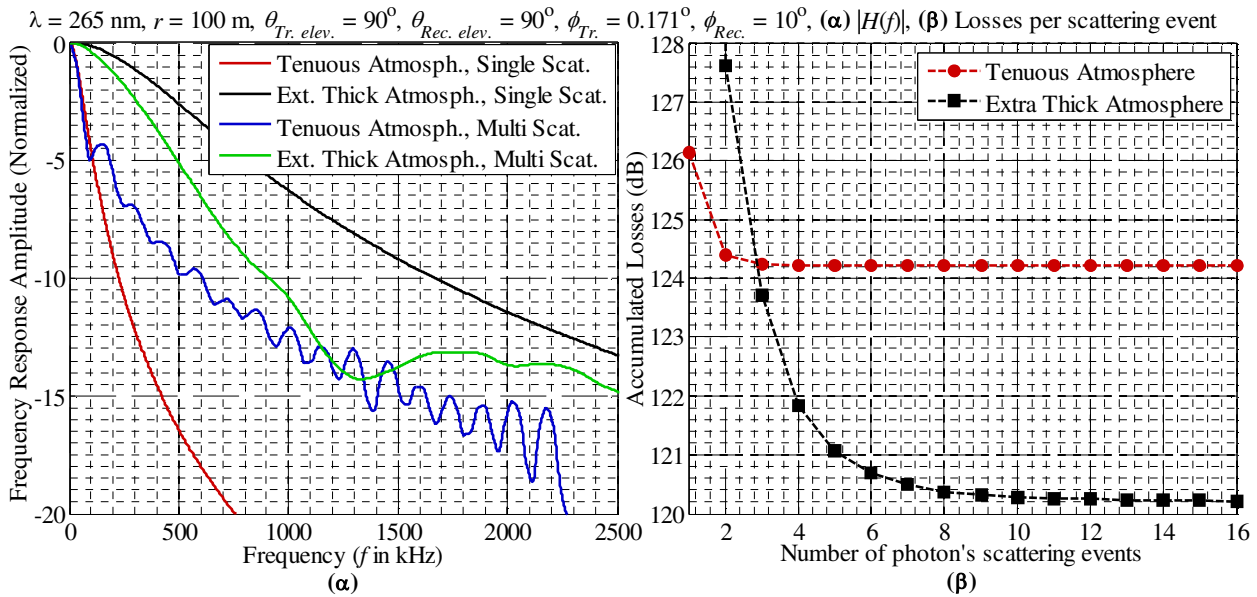
$h(t)$ for $\lambda = 265$ nm, $r = 100$ m, $\theta_{Tr. elev.} = 90^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$, $\phi_{Tr.} = 0.171^\circ$, $\phi_{Rec.} = 10^\circ$, (α) Tenuous, (β) Extra thick medium



Σχήμα 3.29. Κανονικοποιημένες κρουστικές αποκρίσεις των καναλιών για απόσταση 100 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για (α) αραιή και (β) πολύ πυκνή ατμόσφαιρα με πολύ στενή γωνία απόκλισης της δέσμης ($\phi_{Tr.}$) και ακραίες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη.

Μένοντας στο ίδιο παράδειγμα και παρατηρώντας τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας για αραιό και πυκνό μέσο από τα δύο μοντέλα, στην περίπτωση της αραιής ατμόσφαιρας, παρά το γεγονός ότι τα δύο μοντέλα έδωσαν παραπλήσιες τιμές εύρους ζώνης (72.62 kHz από το μοντέλο μονής σκέδασης, 60.85 kHz από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων), οι αποκρίσεις αλλάζουν στις μεγαλύτερες συχνότητες ως προς την κλίση τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.30(α). Η σύγκριση είναι δύσκολη επειδή κατά πρώτον έχει αλλάξει πλήρως η μορφή της κρουστικής απόκρισης με το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων και κατά δεύτερον δεν έχει εφαρμοσθεί κάποιο προσαρμοστικό μοντέλο για την εξαγωγή κυματομορφής που θα είναι προσαρμοσμένη στην κρουστική απόκριση από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων. Στην περίπτωση πολύ πυκνής ατμόσφαιρας, η μείωση των απωλειών που εκτιμήθηκε με το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων δεν εξασφαλίζει αύξηση του εύρους ζώνης σε σχέση με το μοντέλο μονής σκέδασης, σύμφωνα με το Σχήμα 3.30(α). Από το μοντέλο μονής σκέδασης προέκυψε εύρος ζώνης 555.54 kHz ενώ από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων το εύρος ζώνης ήταν μειωμένο κατά περισσότερα από 200 kHz, και πιο συγκεκριμένα εκτιμήθηκε κοντά στα 347.70 kHz, καθώς οι πρόσθετες σκεδάσεις έδωσαν κρουστική απόκριση μεγαλύτερου εύρους, παρά το ότι οι μη μηδενικές τιμές με το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων εμφανίζονται νωρίτερα. Όπως είναι γνωστό, αυτή η

ολίσθηση της κρουστικής απόκρισης δεν έχει επίδραση στο μέτρο της απόκρισης συχνότητας, αλλά μόνο στη φάση της.



Σχήμα 3.30. (α) Μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας των καναλιών στα 265 nm για απόσταση 100 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη όπως προέκυψαν από τα μοντέλα μονής σκέδασης και πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Όλες οι αποκρίσεις συχνότητας έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη τιμή τους. (β) Σωρευτικές απώλειες συναρτήσεως του πλήθους των σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο βάσει του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων για αραιή και πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Και στα δύο σχήματα θεωρήθηκε πολύ στενή γωνία απόκλισης της δέσμης ($\phi_{Tr.}$) και ακραίες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη.

Για τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας μέσων ανεξάρτητα από το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί, το εύρος ζώνης αποκτά δευτερεύουσα σημασία σε ένα σενάριο με πολύ υψηλές γωνίες ανύψωσης και στενή δέσμη στον πομπό. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ιδιαίτερα υψηλές απώλειες (πάνω από 100 dB) αποτελούν τον κύριο παράγοντα που θα προκαλούσε περιορισμούς σε μία ζεύξη με εφαρμογή εύλογων επιπέδων ισχύος. Μένοντας στο μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων και βάσει του παραδείγματος που δόθηκε, από το διάγραμμα των συσσωρευμένων απωλειών συναρτήσεως του πλήθους των δυνατών σκεδάσεων που μπορεί να υποστεί κάθε φωτόνιο φαίνεται ότι και για την περίπτωση που επικρατεί καθεστώς αραιής ατμόσφαιρας, οι δεύτερες σκεδάσεις των φωτονίων έχουν σημαντική επίδραση σύμφωνα με το Σχήμα 3.30(β). Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι από την πρώτη στη δεύτερη σκέδαση οι απώλειες μειώνονται από μία τιμή λίγο πάνω από 126 dB σε μία τιμή περίπου 124.39 dB. Δηλαδή, το άθροισμα των πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης αποκλειστικά από τις σκεδάσεις δεύτερης τάξης (πριν την πρόσθεση με τις αντίστοιχες πιθανότητες από την πρώτη σκέδαση) είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το άθροισμα αποκλειστικά από τις πρώτες σκεδάσεις. Ταυτόχρονα, φαίνεται ότι ακόμα και για το αραιό μέσο απαιτούνται τουλάχιστον τρεις σκεδάσεις για να επέλθει σύγκλιση στην τελική τιμή των απωλειών. Ακόμα πιο έντονες είναι οι μεταβολές για τις πρώτες σκεδάσεις σε πολύ πυκνό μέσο. Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες μετά την πρώτη σκέδαση εκτιμήθηκαν πάνω από 218 dB αλλά δε φαίνονται στο Σχήμα 3.30(β), ενώ μετά τη δεύτερη σκέδαση οι απώλειες πέφτουν στις 127.61 dB. Η αλλαγή αυτή δείχνει ότι η επίδραση της πρώτης σκέδασης είναι αμελητέα σε σχέση με αυτή του αποτελέσματος της δεύτερης, επιβεβαιώνοντας έμμεσα τη μορφή που έχει η κρουστική απόκριση στο Σχήμα 3.29(β) από το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων, όπου απουσιάζει το τμήμα που αφορά τις πρώτες σκεδάσεις. Αυτό που έχει ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η επίδραση της τρίτης σκέδασης. Οι συνολικές απώλειες μετά την τρίτη σκέδαση ήταν κοντά στα 123.72 dB. Αυτή η τιμή είναι 3.89 dB μικρότερη από τις συνολικές απώλειες μετά της δεύτερη σκέδαση, δηλαδή το άθροισμα των

πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης από την τρίτη σκέδαση των φωτονίων που έχουν ήδη επιβιώσει ως αυτό το σημείο είναι οριακά μεγαλύτερο από το άθροισμα των πιθανοτήτων επιτυχούς άφιξης από τις προηγούμενες δύο σκεδάσεις. Γι' αυτό κι όταν προστεθούν οι πιθανότητες επιτυχούς άφιξης από την τρίτη σκέδαση σε αυτές των προηγούμενων δύο, οι απώλειες μειώνονται κατά περισσότερο από 3 dB. Άρα, η επίδραση της τρίτης σκέδασης είναι εξίσου σημαντική με αυτή της δεύτερης. Σε αυτό το ακραίο σενάριο, η σύγκλιση σε μία τελική μορφή απωλειών προκύπτει μετά τη 10η σκέδαση. Οι εκτιμήσεις των απωλειών και του εύρους ζώνης γι' αυτό και για τα προηγούμενα δύο παραδείγματα, για τα δύο μοντέλα στις συνθήκες που θεωρήθηκαν, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.4. Συγκεντρωτικός πίνακας για απώλειες και εύρος ζώνης των καναλιών των τριών ζεύξεων, για τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας του μέσου σε σκεδαστές όπως εκτιμήθηκαν από τα δύο θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν από το Σχήμα 3.25 ως και το Σχήμα 3.30.

$\lambda = 265 \text{ nm}$		Αραιή ατμόσφαιρα		Πολύ πυκνή ατμόσφαιρα	
$A_{PMT} = 192 \text{ mm}^2$		Μοντέλο		Μοντέλο	
Γεωμετρικές ιδιότητες ζεύξης	Ιδιότητα	μονής σκέδασης	πολλαπλών σκεδάσεων	μονής σκέδασης	πολλαπλών σκεδάσεων
$\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ, \theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$ $\varphi_{Tr.} = 10^\circ, \varphi_{Rec.} = 30^\circ$ $r = 50 \text{ m}$	Απώλειες (dB)	104.63	98.85	102.60	91.23
	Εύρος ζώνης (kHz)	1011	929	1466	1222
$\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ, \theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$ $\varphi_{Tr.} = 10^\circ, \varphi_{Rec.} = 30^\circ$ $r = 100 \text{ m}$	Απώλειες (dB)	108.68	102.88	114.15	100.45
	Εύρος ζώνης (kHz)	529.73	490.34	971.59	723.56
$\theta_{Tr. elev.} = 90^\circ, \theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$ $\varphi_{Tr.} = 0.171^\circ, \varphi_{Rec.} = 10^\circ$ $r = 100 \text{ m}$	Απώλειες (dB)	137.28	124.23	241.24	120.22
	Εύρος ζώνης (kHz)	72.62	60.85	555.54	347.70

Όπως φάνηκε, παρά τις διαφορές των εκτιμώμενων απωλειών από τα δύο μοντέλα, σε καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας και για συχνά εμφανιζόμενες τιμές γωνιών ανύψωσης και αποστάσεων, η συμπεριφορά είναι παρόμοια. Δεδομένου ότι το εύρος ζώνης είναι μία παράμετρος που δεν έχει σημαντική επίδραση για τις τιμές FOV που δοκιμάστηκαν λόγω του ότι οι εξεταζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων είναι κατά πολύ μικρότεροι, αυτό σημαίνει ότι ένα σενάριο με απαιτήσεις σε αξιοπιστία ενδεχομένως να επιβάλλει την υιοθέτηση ενός μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων. Από την άλλη, ταχύτατες υλοποιήσεις μοντέλων μονής σκέδασης δίνουν μία πρώτη εικόνα των απωλειών, παρά το ότι μπορεί να παρουσιάζουν μία απαισιόδοξη τάση όσον αφορά τις απώλειες και να υποτιμούν την επίδραση των σκεδάσεων οδηγώντας σε ελαφρώς στενότερες κρουστικές αποκρίσεις [149]. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, βελτιώσεις των τελευταίων ετών στα μοντέλα μονής σκέδασης μπορούν να δώσουν παραπλήσιες επιδόσεις με τα μοντέλα πολλαπλών σκεδάσεων [149]. Τα τελευταία μοντέλα έχουν εξεταστεί για συντελεστές παρόμοιους με αυτούς που έχουν θεωρηθεί εδώ για καθαρή ατμόσφαιρα. Θεωρώντας ένα πυκνότερο μέσο, θα πρέπει να ενσωματωθεί και η επίδραση των πολλαπλών σκεδάσεων, δίνοντας ένα πλεονέκτημα στα μοντέλα τύπου Monte Carlo.

3.2.5 Αριθμητικά αποτελέσματα για το τηλεπικοινωνιακό σύστημα

3.2.5.1 Λεπτομέρειες σεναρίου ζεύξης σημείου-προς-σημείου

Οι επιδόσεις των σχημάτων διαμόρφωσης εκτιμήθηκαν μέσω του υπολογισμού του BER σε συνάρτηση είτε της εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος είτε του (ηλεκτρικού) SNR στο δέκτη. Η επιλογή διερεύνησης τόσο των απαιτήσεων σε εκπεμπόμενη ισχύ όσο και σε SNR για συγκεκριμένες τιμές BER δικαιολογείται από το γεγονός ότι η πυκνότητα

μορίων και μικροσωματιδίων στο μέσο έχει ληφθεί υπόψη ως κρίσιμος παράγοντας επίδρασης στις επιδόσεις. Χαμηλότερες απώλειες στην ισχύ οφειλόμενες σε ένα πυκνότερο μέσο θα επιβάλλουν μικρότερα επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος για εξεταζόμενες τιμές BER. Επομένως, η εκτίμηση αποκλειστικά του SNR δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκής για την πλήρη περιγραφή και την ερμηνεία των επιδόσεων.

Η πλευρά της εκπομπής αναπαρίσταται από την γωνία απόκλισης και από τη συνάρτηση κέρδους της [152]. Όσον αφορά τη δομή του οπτικού δέκτη, ένα φίλτρο με απόδοση (transmittance) ίση με 0,15 θεωρήθηκε μπροστά από τον PMT. Η αποκρισιμότητα στη φωτοκάθοδο του PMT τέθηκε $\mathfrak{R} = 0.06 \text{ AW}$ για τα 265 nm, ενώ το κέρδος του τέθηκε ίσο με $G = 10^6$. Με 9 στάδια ενίσχυσης, όπως ο R7154 της Hamamatsu [167] του οποίου τα χαρακτηριστικά θεωρήθηκαν στις προσομοιώσεις, από την (3.20) $\delta = (G)^{1/9} \approx 4.642$. Από την (3.21), ο παράγοντας excess noise factor θα είναι $F \approx 1.275$. Στην άνοδο του PMT, εφαρμόζεται ολοκλήρωση στη διάρκεια του bit ή της θυρίδας λόγω του ότι θεωρήθηκε η καταμέτρηση φωτονίων για τα παλμικά σχήματα. Η λογική του φιλτραρίσματος integrate-and-dump εφαρμόστηκε για όλα τα παλμικά σχήματα και για τα κατάλληλα χρονικά διαστήματα ανάλογα με το παλμικό σχήμα διαμόρφωσης. Για σχήματα πολλαπλών φερόντων, εφαρμόστηκε η συμβατική διαδικασία δειγματοληψίας στο πεδίο του χρόνου. Σε καθεμία περίπτωση, οι συνιστώσες θορύβου που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο του δέκτη ήταν ο θερμικός θόρυβος, ο θόρυβος βολής που οφειλόταν στο ίδιο το σήμα αλλά και στην ακτινοβολία από το περιβάλλον και ο θόρυβος που οφειλόταν στο ρεύμα σκότους του PMT. Όλες οι διακυμάνσεις του θορύβου για τα παλμικά σχήματα εκτιμήθηκαν σε επίπεδο φωτοηλεκτρονίων. Συνοπτικά, από την (3.22) και από την [161], οι διακυμάνσεις τους εκφρασμένες σε τετραγωνική τιμή φωτοηλεκτρονίων ήταν οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} \sigma_{th}^2 &= \frac{2 \times k_B \times T_K \times NF_{th}}{q^2 \times R_L} \times T & \sigma_{sh,sig}^2 &= \frac{G^2 \times F \times \mathfrak{R} \times P_{sig}}{q} \times T \\ \sigma_{sh,bg}^2 &= \frac{G^2 \times F \times \mathfrak{R} \times P_{bg}}{q} \times T & \sigma_{sh,dark}^2 &= \frac{I_{dark}}{q} \times T \end{aligned} \quad (3.33)$$

Η P_{sig} αφορά κάποιο λαμβανόμενο επίπεδο ισχύος από το φωτοφωρατή, ενώ P_{bg} είναι η οπτική ισχύς του θορύβου του περιβάλλοντος που δίνεται από τη σχέση $P_{bg} = N_n \times h \times f_c$ [178], όπου N_n είναι ο ρυθμός άφιξης φωτονίων από το περιβάλλον μετά το πέρασμα από το οπτικό φίλτρο. Εδώ τέθηκε η υψηλότερη τιμή που μετρήθηκε στην [179], δηλαδή $N_n = 14500 \text{ ph/sec}$. I_{dark} είναι το ρεύμα σκότους στην άνοδο και τέθηκε ίσο με 5.5 nA, μία τιμή μεταξύ της τυπικής και της μέγιστης που δίνονται στα datasheet του PMT R7154 [167]. Η θερμοκρασία θεωρήθηκε 27°C. Η αντίσταση φόρτου τέθηκε ίση με $R_L = 10 \text{ K}\Omega$. Η παράμετρος NF_{th} είναι η εικόνα θορύβου του ηλεκτρικού ενισχυτή που ακολουθεί τον φωτοφωρατή. Εδώ τέθηκε $NF_{th} = 10 \text{ dB}$.

Εδώ τονίζεται ότι οι χρόνοι ανόδου* (rise time) και ο χρόνος διέλευσης† (transit time) του PMT είναι της τάξης των nsec που αντιστοιχεί σε εύρος ζώνης της τάξης των MHz. Αυτό το εύρος ζώνης είναι σημαντικά υψηλότερο από το εύρος ζώνης των οπτικών καναλιών με FOV 180° που θα πραγματευτούμε. Επομένως, το εύρος ζώνης του PMT δε λήφθηκε υπόψη στις προσομοιώσεις.

* Ο χρόνος ανόδου είναι ο χρόνος που απαιτείται για τον παλμό εξόδου (ηλεκτρικό παλμό) να φθάσει από το 10% στο 90% του πλάτους που αντιστοιχεί στην κορυφή του όταν φωτιστεί ολόκληρη η φωτοκάθοδος από ένα οπτικό παλμό που ακολουθεί συνάρτηση δέλτα.

† Ο χρόνος διέλευσης ενός ηλεκτρονίου είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της άφιξης ενός οπτικού παλμού που ακολουθεί συνάρτηση δέλτα στην είσοδο του «σωλήνα» του PMT και του χρόνου όπου η έξοδος της ανόδου φθάνει στο πλάτος που αντιστοιχεί στην κορυφή του παλμού. Υποτίθεται ότι αρχικά έχει φωτιστεί όλη η επιφάνεια της φωτοκάθόδου.

Μετά την άνοδο του PMT, μεταχειριζόμαστε όλα τα σήματα ως φωτοηλεκτρόνια. Όλες οι συνιστώσες θορύβου θεωρούνται Gaussian διεργασίες. Όταν θεωρηθεί η κβαντική φύση του φωτός, η υπόθεση ότι ο θόρυβος που εισάγεται από όλη τη διάταξη του PMT είναι Gaussian είναι κάπως καταχρηστική, καθώς τα φωτοηλεκτρόνια αντιπροσωπεύουν διακριτές ποσότητες, ενώ η Gaussian είναι συνεχής κατανομή και τα επίπεδα λαμβανόμενης ισχύος είναι χαμηλά. Αν μέναμε μετά την φωτοκάθοδο του PMT, από την (3.16), η τυχαία μεταβλητή του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων ακριβώς μετά την φωτοκάθοδο που θα μετρηθούν μέσα σε ένα χρονικό διάστημα τ ακολουθεί κατανομή Poisson. Στην παράγραφο Π.5 απεικονίζονται διάφορα παραδείγματα της συνάρτησης πιθανότητας μάζας και στα ίδια διαγράμματα απεικονίζονται αντίστοιχα οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας Gaussian κατανομών για τις ίδιες μέσες τιμές και διακυμάνσεις, όπου φαίνεται ότι οι συναρτήσεις απέχουν μεταξύ τους και η σύγκλιση των δύο κατανομών αρχίζει να εμφανίζεται, όπως είναι αναμενόμενο, μόνο μετά την αύξηση της μέσης τιμής των κατανομών, δηλαδή με την αύξηση του επιπέδου της λαμβανόμενης ισχύος. Ωστόσο, για τα παλμικά σήματα, ισχύει ότι οι ρυθμοί είναι μικροί και οι χρόνοι ολοκλήρωσης σχετικά μεγάλοι, αλλά και πάλι πρέπει να αρχίσει να αυξάνεται το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος για να αποτελεί καλή προσέγγιση για το θόρυβο η Gaussian κατανομή. Δεν πρέπει να ξεχνάμε, όμως, ότι μετά την άνοδο του PMT, η Gaussian κατανομή περιγράφει το μέσο πλήθος φωτοηλεκτρονίων και τη διακύμανσή τους που παράγεται από το ενοποιημένο αποτέλεσμα της αλληλουχίας των φωτοηλεκτρονίων της καθόδου του PMT και του μεταβαλλόμενου κέρδους του PMT. Αυτή η αλληλουχία αναμφίβολα δεν οδηγεί τελικά σε πλήθος φωτοηλεκτρονίων που ακολουθούν Poisson κατανομή. Η υπόθεση Gaussian κατανομής θα δώσει απαισιόδοξα αποτελέσματα όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενη παράγραφο.

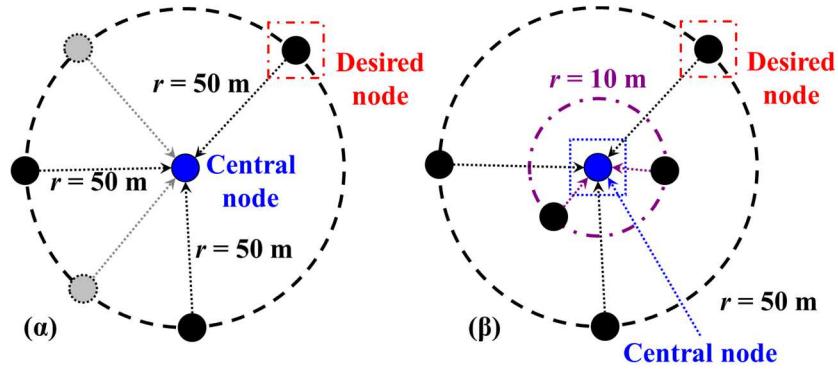
Όλα τα σήματα μεταδίδονται με την ίδια μέση οπτική ισχύ. Ο ρυθμός των bits θεωρήθηκε ίδιος για όλα τα σχήματα διαμόρφωσης και ίσος με 10 kbit/s, ένας ρυθμός αρκετός για τη μετάδοση φωνής και δεδομένων από ένα δίκτυο αισθητήρων. Δεν εφαρμόστηκε κάποιο σχήμα κωδικοποίησης καναλιού. Υψηλότεροι ρυθμοί θα απαιτούσαν και υψηλότερα επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος. Πρόσθετος παράγοντας που δεν επιτρέπει την αύξηση του ρυθμού είναι ο χρόνος αδράνειας (dead time) του PMT κατά τη διάρκεια του οποίου, ο δέκτης «αδυνατεί» να ανιχνεύει φωτόνια μετά από το τελευταίο ανιχνευμένο φωτόνιο. Στη διάρκεια αυτού του χρόνου ο δέκτης είναι σε κατάσταση «επαναφοράς» (reset) και φωτόνια που θα είχαν ανιχνευθεί σε αντίθετη περίπτωση τελικά χάνονται [180]. Όσον αφορά τα σήματα πολλαπλών φερόντων, η καταχρηστική θεώρηση φωτοηλεκτρονίων δεν προκαλεί κάποια μεταβολή στη συμβατική αντιμετώπιση των σημάτων. Επιπλέον, για τον περιορισμό του θορύβου στο ηλεκτρικό επίπεδο, γίνεται φιλτράρισμα με εύρος ζώνης ίσο με το διπλάσιο πλήθος των υποφερόντων που χρησιμοποιούνται στο ACO-OFDM σχήμα πολλαπλασιασμένο επί την απόσταση των υποφερόντων ($2 \times N_{US} \times \Delta f$).

3.2.5.2 Λεπτομέρειες δικτυακού σεναρίου

Στην περίπτωση της πολλαπλής πρόσβασης όπου ένα μικρό πλήθος κόμβων δημιουργούν ένα μικρό δίκτυο (cluster), ένα κόμβος αναλαμβάνει το ρόλο του κεντρικού σταθμού και οι υπόλοιποι έχουν μία απευθείας ζεύξη με τον κεντρικό κόμβο. Υποτίθεται ότι έχει επιτευχθεί συγχρονισμός στο δίκτυο. Η μέγιστη απόσταση μέσα στο δίκτυο τέθηκε ίση με 50 μέτρα. Τρεις τοπολογίες εξετάστηκαν. Στην πρώτη, τρεις κόμβοι τέθηκαν σε ίση απόσταση 50 μέτρων από τον κεντρικό κόμβο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.31(α). Η δεύτερη τοπολογία ήταν η πρώτη με την προσθήκη δύο ακόμα κόμβων στα 50 μέτρα, όπως φαίνεται και πάλι στο Σχήμα 3.31(α). Στην τρίτη περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 3.31(β), τρεις κόμβοι διατηρήθηκαν σε απόσταση 50 μέτρων από τον κεντρικό κόμβο και δύο κόμβοι τέθηκαν σε απόσταση 10 μέτρων από τον κεντρικό κόμβο. Ο επιθυμητός κόμβος βρίσκεται σε όλα τα σεναρία στο

κέντρο ενός δίσκου με ακτίνα 50 μέτρων. Οι τοπολογίες επιλέχθηκαν ώστε να εξεταστεί αφενός η επίδραση των ιδιοτήτων του ασύρματου μέσου στις επιδόσεις σημάτων που είναι κωδικοποιημένα με βάση ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (CDMA) και αφετέρου η επίδραση του μήκους των ακολουθιών των chips στα απαιτούμενα επίπεδα ισχύος εκπομπής για την επίτευξη συγκεκριμένων επιδόσεων. Σ' αυτό το πλαίσιο, η μελέτη βασίστηκε στην απλή CDMA κωδικοποίηση σε ηλεκτρικό επίπεδο και όχι σε κάποια ανώτερη εκδοχή κωδικοποίησης όπως οι Οπτικοί Ορθογώνιοι Κώδικες (Optical Orthogonal Codes – OOCs) [181]. Η κωδικοποιημένη κατά CDMA πληροφορία στο ηλεκτρικό επίπεδο διαμορφώνει την φωτεινή ένταση του οπτικού φέροντος για μετάδοση προς τον κεντρικό κόμβο κατά την ανοδική ροή κίνησης (uplink). Η «ταυτότητα» κάθε κόμβου είναι ίδια με την κωδική ακολουθία που χρησιμοποιεί για την κωδικοποίηση των δεδομένων, ενώ ο κεντρικός κόμβος γνωρίζει πότε ξεκινά η κωδική ακολουθία ενός λαμβανόμενου σήματος. Στην πρώτη τοπολογία, όπου θεωρήθηκαν 4 κόμβοι στο μικρό δίκτυο, χρησιμοποιήθηκαν ορθογώνιοι Walsh κώδικες των 4 chips, υιοθετώντας ένα σχήμα άμεσης ακολουθίας διάχυτου φάσματος (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS) [163]. Οι τρεις από τους κόμβους μεταδίδουν προς στον κεντρικό, όπως ήδη αναφέρθηκε. Τα δύο περιβάλλοντα για τα οποία εξετάστηκαν οι μεταδόσεις των σημάτων είναι αυτά της αραιής και της πολύ πυκνής ατμόσφαιρας που εξετάστηκαν στην υποενότητα 3.2.4. Ο Πίνακας 3.2 περιλαμβάνει τους σχετικούς συντελεστές σκέδασης Rayleigh, Mie και απορρόφησης περιέχονται για τα δύο περιβάλλοντα.

Ο επιθυμητός κόμβος του οποίου οι μεταδόσεις θα αξιολογηθούν κωδικοποιεί τα δεδομένα του με την ακολουθία "0101". Ο κεντρικός κόμβος γνωρίζει ακριβώς την ακολουθία των chips καθενός κόμβου, τις απώλειες που υπέστη το επιθυμητό σήμα, την απόδοση του φίλτρου, το μέσο επίπεδο ισχύος με το οποίο μεταδόθηκε το επιθυμητό σήμα, την αποκρισιμότητα του PMT, το κέρδος του PMT και τη διάρκεια του chip για το εκάστοτε παλμικό σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε ως βάση πριν την κωδικοποίηση. Ο δέκτης εκτελεί τη λειτουργία Integrate-and-dump φιλτραρίσματος του ηλεκτρικού σήματος σε επίπεδο chip. Δηλαδή γίνεται καταμέτρηση φωτοηλεκτρονίων σε επίπεδο chip για το συνολικό σήμα που περιλαμβάνει το άθροισμα του λαμβανόμενου επιθυμητού κωδικοποιημένου σήματος και των λαμβανόμενων κωδικοποιημένων σημάτων που αποτελούν παρεμβολές στο πρώτο στο ηλεκτρικό επίπεδο. Αυτή η θεώρηση είναι ορθή εφόσον ο χρόνος συμφωνίας (coherence time) του φωτός είναι πολύ μικρότερος από τη διάρκεια το chip που είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης [182], που γενικά ισχύει, καθώς οι πηγές που θεωρήθηκαν είναι LEDs και οι LEDs έχουν μεγάλο εύρος γραμμής. Όσον αφορά το θόρυβο, οι συνιστώσες που λαμβάνονται υπόψη είναι ο θερμικός θόρυβος του δέκτη, ο θόρυβος σκότους του PMT, με τις ίδιες ιδιότητες για τις δύο συνιστώσες όπως και στη ζεύξη σημείου-προς-σημείο, και ο θόρυβος βολής από όλους τους κόμβους που μετέδωσαν προς τον κεντρικό, αλλά και από το περιβάλλον. Έπειτα, το ηλεκτρικό μονοπολικό σήμα (μετά το αρχικό integrate-and-dump φιλτράρισμα) μετατρέπεται σε ένα διπολικό σήμα μέσω των γνωστών στο δέκτη παραμέτρων που αναφέρθηκαν, για να ακολουθήσει η αποκωδικοποίηση και εκτίμηση του BER για την επιθυμητή ροή δεδομένων. Το αποκωδικοποιημένο επιθυμητό σήμα είναι και αυτό σε διπολική μορφή. Εξετάστηκε μόνο η ανοδική ροή κίνησης. Ο ρυθμός των δεδομένων πριν την κωδικοποίηση τέθηκε ίσος με 10 kbit/s. Όλοι οι κόμβοι που μεταδίδουν είναι ευθυγραμμισμένοι με τον κεντρικό κόμβο. Οι ίδιες κατευθυντήριες γραμμές ακολουθήθηκαν και στις άλλες δύο τοπολογίες. Η μόνη τροποποίηση στα δύο σενάρια με τους 6 συνολικά κόμβους είναι η χρήση ακολουθιών με μήκος 8 chips. Στα δύο τελευταία σενάρια η ακολουθία που ανατέθηκε στον επιθυμητό κόμβο ήταν η "01010101".



Σχήμα 3.31. Διαμορφώσεις της υποδομής που αφορούν μικρό δίκτυο με (α) 4 ή 6 κόμβους τοποθετημένοι στα 50 μέτρα από τον κεντρικό και (β) 6 κόμβους με 2 στα 10 μέτρα και 3 στα 50 μέτρα από τον κεντρικό κόμβο. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι κόμβοι που προκαλούν παρεμβολές μεταδίδουν με πιθανότητα $p_{prob.TR}$.

Τα δύο παλμικά σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση πριν την κωδικοποίηση είναι το OOK με NRZ παλμούς και το 4-PPM. Μετά την κωδικοποίηση στο ηλεκτρικό επίπεδο, τα σήματα μεταδίδονται στο ασύρματο μέσο υπό το σχήμα OOK με εφαρμογή NRZ παλμών. Σε μία τέτοια περίπτωση, μετά την κωδικοποίηση, ένας NRZ παλμός θα αντιπροσωπεύει ένα chip που αντιστοιχεί σε λογικό άσο. Οι υπόλοιποι δύο ή οι τέσσερις κόμβοι, στο πρώτο και στα άλλα δύο σενάρια, αντίστοιχα, μπορεί να μην μεταδίδουν σε όλο το διάστημα της μετάδοσης του επιθυμητού κόμβου. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε κόμβο που προκαλεί παρεμβολές ορίζεται μία πιθανότητα $p_{prob.TR}$ ταυτόχρονης μετάδοσης με τον επιθυμητό κόμβο, η οποία εκφράζεται σαν ποσοστιαία τιμή. Όταν η τιμή της $p_{prob.TR}$ για ένα κόμβο είναι μικρότερη από 100%, τότε ο κόμβος αυτός δε θα προκαλεί παρεμβολές σε όλη τη διάρκεια της μετάδοσης του επιθυμητού κόμβου. Όταν $p_{prob.TR} = 100\%$, κάθε κόμβος που προκαλεί παρεμβολές μεταδίδει ταυτόχρονα με τον επιθυμητό κόμβο. Για καθένα κόμβο που προκαλεί παρεμβολές πρέπει να ληφθεί υπόψη μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κατανομή Bernoulli. Αυτή η τυχαία μεταβλητή μπορεί να τεθεί ως k_i για τον κόμβο i που προκαλεί παρεμβολές, με $i = \{1, 2\}$ για την πρώτη και με $i = \{1, 2, 3, 4\}$ για τις επόμενες δύο τοπολογίες. Οι επιτρεπόμενες τιμές των k_i είναι 0 όταν ο i -οστός κόμβος δε μεταδίδει (με πιθανότητα $1 - p_{prob.TR}$) και 1 όταν ο i -οστός κόμβος μεταδίδει ταυτόχρονα με τον επιθυμητό (με πιθανότητα $p_{prob.TR}$), προκαλώντας παρεμβολές. Επομένως, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητα της τυχαίας μεταβλητής k_i είναι

$$f_K(k_i, p_{prob.TR}) = p_{prob.TR}^{k_i} \times (1 - p_{prob.TR})^{1-k_i}, \quad k_i = \{0, 1\} \quad (3.34)$$

Θέτοντας συγκεκριμένες τιμές BER ως στόχους επίδοσης, διερευνήθηκαν οι απαιτήσεις των επιπέδων μέσης εκπεμπόμενης ισχύος του επιθυμητού κόμβου συναρτήσει της πιθανότητας $p_{prob.TR}$ του κάθε κόμβο. Οι μεταδόσεις για ένα κόμβο που προκαλεί παρεμβολές είναι ανεξάρτητες από τις μεταδόσεις όλων των υπόλοιπων κόμβων. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο επιθυμητός κόμβος μεταδίδει, δεν υπάρχει κάποιος κανόνας που να καθορίζει πώς θα πραγματοποιούνται οι μεταδόσεις και των υπόλοιπων κόμβων. Αυτή η υπόθεση μπορεί να οδηγήσει σε ταυτόχρονες μεταδόσεις κατά διαστήματα του επιθυμητού και των υπόλοιπων κόμβων με βάση την πιθανότητα $p_{prob.TR}$. Τονίζεται ότι σε μία εκτέλεση πλήρους μετάδοσης και αξιολόγησης των επιδόσεων για τον επιθυμητό κόμβο, η $p_{prob.TR}$ έχει την ίδια τιμή για όλους τους κόμβους ανεξάρτητα από το αν μεταδίδουν ταυτόχρονα ή όχι άλλοι κόμβοι προκαλώντας πρόσθετες παρεμβολές.

Στην αραιή ατμόσφαιρα, για δέκτες με ιδιαίτερα ευρύ FOV, χρησιμοποιώντας το απλό μοντέλο μονής σκέδασης για την εκτίμηση της κρουστικής απόκρισης και της απόκρισης συχνότητας του καναλιού, στο Σχήμα 3.22(α) φάνηκε ότι το εύρος ζώνης δεν αλλάζει σημαντικά με την αυξανόμενη απόσταση. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα που θα

μεταδοθούν είτε από τον επιθυμητό είτε από άλλο κόμβο που προκαλεί παρεμβολές θα υποστούν παρόμοια επίδραση από τα κανάλια μέσα από τα οποία θα διαδοθούν όσον αφορά τη διάχυση. Επιπλέον, το εύρος ζώνης των σημάτων επαυξάνεται εξαιτίας της κωδικοποίησης. Επομένως, αναμένεται ότι το σήμα από κάθε κόμβο θα υποστεί έντονη υποβάθμιση, ανεξάρτητα από την απόσταση του κόμβου από τον κεντρικό κόμβο. Υπολειπόμενα σήματα που αλλοιώνουν το επιθυμητό σήμα θα εμφανιστούν μετά την αποκωδικοποίηση εξαιτίας της διάχυσης των καναλιών, παρά το γεγονός ότι οι Walsh κώδικες είναι ορθογώνιοι. Με λίγα λόγια, η καθετότητα των κωδικών που θα «εξαφάνιζε» τα σήματα παρεμβολής μετά την αποκωδικοποίηση με την κατάλληλη ακολουθία από chips δεν ισχύει εξαιτίας της μη ικανοποιητικής αποκωδικοποίησης των σημάτων που έχουν διαδοθεί μέσα από κανάλια με περιορισμένο εύρος ζώνης. Στην πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, το εύρος ζώνης μειώνεται με την απόσταση, σύμφωνα και πάλι με Σχήμα 3.22(α). Ωστόσο, το εύρος ζώνης κάθε καναλιού είναι σημαντικά ευρύτερο σε σχέση με αυτό των κωδικοποιημένων σημάτων, όταν οι κωδικές ακολουθίες δεν είναι πολύ μεγάλου μήκος. Η μείωση του εύρους ζώνης δε θα επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα των λαμβανόμενων σημάτων που έχουν μεταδοθεί από τους πιο απομακρυσμένους κόμβους.

Η θεώρηση της τοποθέτησης του επιθυμητού κόμβου σε απόσταση 50 μέτρων από τον κεντρικό κόμβο αποτελεί χειρίστο σενάριο όσον αφορά τις απώλειες σε ισχύ. Το επίπεδο της λαμβανόμενης οπτικής ισχύος από το δέκτη του κεντρικού κόμβου πρέπει να είναι ίδιο για όλα τα σήματα ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα near-far, σύμφωνα με το οποίο αν όλοι οι πομποί εξέπεμπαν με την ίδια ισχύ ανεξάρτητα από την απόστασή τους από τον κεντρικό κόμβο, τα σήματα που θα αντιστοιχούσαν στους πιο απομακρυσμένους πομπούς θα αντιμετώπιζαν υποβάθμιση του λόγου σήματος προς παρεμβολή (Signal-to-Interference-Ratio – SIR) στο δέκτη του κεντρικού κόμβου. Αυτό θα συνέβαινε επειδή κάποια σήματα θα λαμβάνονταν στο δέκτη με υψηλότερη ισχύ από κάποια άλλα, αυξάνοντας την παρεμβολή στα σήματα που θα λαμβάνονταν με χαμηλότερη ισχύ [183]. Καθώς οι υψηλότερες απώλειες παρατηρούνται για τον πιο απομακρυσμένο κόμβο, σύμφωνα και με το Σχήμα 3.22(β), τα ανώτατα όρια των εκπεμπόμενων επιπέδων ισχύος καθορίζονται από τον κόμβο στη μεγαλύτερη απόσταση από τον κεντρικό. Επομένως, οι απαιτήσεις σε εκπεμπόμενη ισχύ στα όρια του cluster για τον επιθυμητό κόμβο αντιστοιχούν στο άνω όριο της ισχύος που απαιτείται ώστε να επιτυγχάνεται η εκάστοτε τιμή BER που έχει τεθεί ως στόχος. Σημειώνεται ότι εφαρμόστηκε ο κανόνας οι στιγμιαίες τιμές οπτικής ισχύος κορυφής για τις μεταδόσεις όλων των κόμβων που λαμβάνονται από τον κεντρικό κόμβο πρέπει να είναι ίδιες. Πιο συγκεκριμένα, ήδη αναφέρθηκε ότι για τη μετάδοση των chips χρησιμοποιήθηκαν NRZ παλμοί. Το επίπεδο οπτικής ισχύος κορυφής που αντιστοιχεί σε chip “1” που λαμβάνει ο κεντρικός κόμβος πρέπει να είναι ίδιο για όλους τους κόμβους ανεξάρτητα από τη θέση τους, ώστε όταν γίνουν ταυτόχρονες μεταδόσεις, να μετρηθεί τελικά και η ίδια μέση ισχύς στο δέκτη του κεντρικού κόμβου όταν $p_{prob.TR} = 100\%$. Ωστόσο, όταν έχουμε πιθανότητα $p_{prob.TR} < 100\%$, με βάση τον κανόνα της ίδιας οπτικής ισχύος κορυφής, θα έχουμε μικρότερη μέση ισχύ για τα σήματα που ασκούν παρεμβολές. Δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι εφαρμόστηκε ΟΟΚ διαμόρφωση για τη μετάδοση των κωδικοποιημένων δεδομένων που είναι διαμόρφωση πλάτους, ενώ ταυτόχρονα, για τα chips που αντιστοιχούν σε “0” η οπτική ισχύς κατά την εκπομπή είναι 0.

3.2.5.3 Αριθμητικά Αποτελέσματα για τη ζεύξη σημείου-προς-σημείο

Υπό τις προϋποθέσεις και τις θεωρήσεις που τέθηκαν στις προηγούμενες ενότητες για τα σήματα και το θόρυβο, εκτιμήθηκαν οι επιδόσεις των σχημάτων διαμόρφωσης για την περίπτωση μεταδόσεων υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας με τους συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης να είναι αυτοί που περιλαμβάνει ο Πίνακας 3.2. Για την

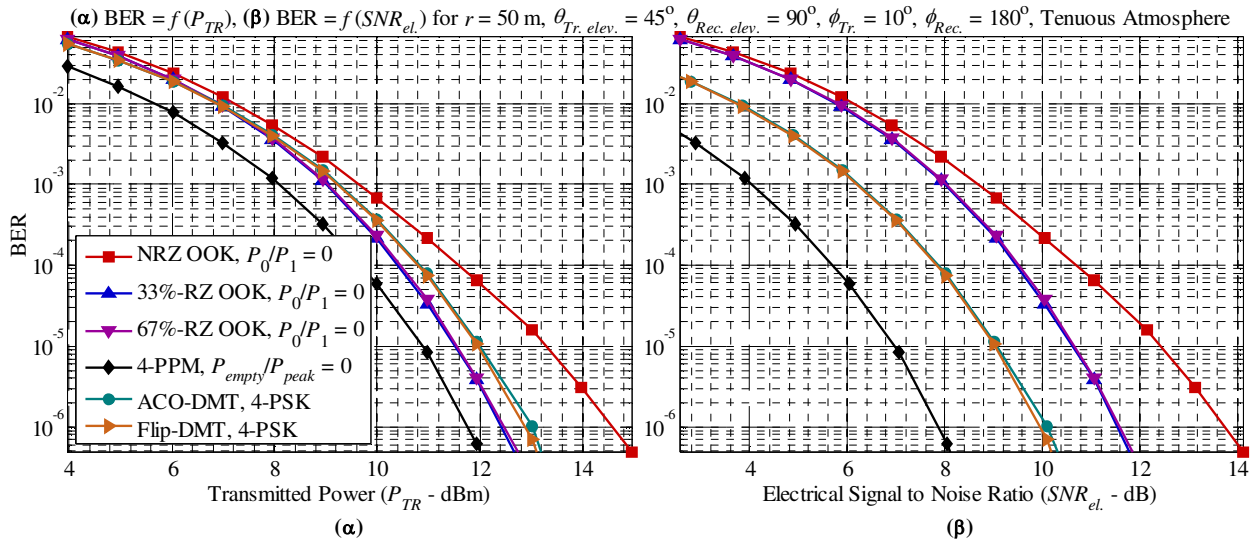
ενσωμάτωση του καναλιού εφαρμόστηκε το μοντέλο μονής σκέδασης διατηρώντας το γεωμετρικό σχηματισμό της ζεύξης πομπού και δέκτη για τον οποίο προέκυψαν η κρουστική απόκριση και η απόκριση συχνότητας που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.21. Επομένως, οι γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη παρέμειναν $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 90^\circ$, αντίστοιχα, όπως η γωνία απόκλισης της δέσμης και το FOV του δέκτη, $\varphi_{Tr.} = 10^\circ$ και $\varphi_{Rec.} = 180^\circ$. Όμοια διατηρήθηκε και το εμβαδό της επιφάνειας του PMT. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.32. Από τη μία, στο Σχήμα 3.32(α), ο ρυθμός σφαλμάτων bits (BER) απεικονίζεται σε συνάρτηση της μέσης εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος (P_{TR}). Από την άλλη, στο Σχήμα 3.32(β), ο ρυθμός σφαλμάτων bits απεικονίζεται σε συνάρτηση του ηλεκτρικού SNR στο δέκτη ($SNR_{el.}$). Με βάση τις καμπύλες στο σχήμα Σχήμα 3.32(α), φαίνεται ότι το σχήμα 4-PPM υπερτερεί των υπόλοιπων σχημάτων διαμόρφωσης ακολουθούμενο από το RZ-OOK. Αυτή η συμπεριφορά είναι σε γενικές γραμμές αναμενόμενη, καθώς το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος (του καναλιού και του δέκτη) είναι αρκετό ώστε να ευνοούνται τα παλμικά σχήματα διαμόρφωσης σε σχέση με τα σχήματα πολλαπλών φερόντων [165]. Το σήμα που έχει υποστεί τη χειρότερη επίδραση από τη μικρή διεύρυνση των παλμών που προκλήθηκε από το περιορισμένο εύρος του καναλιού (περίπου 107 kHz) είναι το NRZ-OOK. Το γεγονός ότι και οι δύο εκδοχές του RZ-OOK έχουν την ίδια επίδοση αποδίδεται στον τύπο του φιλτραρίσματος στην πλευρά του δέκτη. Το integrate-and-dump φιλτράρισμα ταιριάζει καλύτερα σε ορθογώνιους παλμούς από ότι σε άλλα σχήματα παλμών. Ωστόσο, κατανέμοντας περισσότερη ενέργεια προς το μέσο του παλμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.15 για τους RZ παλμούς, η αλληλοπαρεμβολή συμβόλων είναι μικρότερη από την περίπτωση εφαρμογής NRZ παλμών, καθώς υπάρχει «αρκετός χώρος» στο πεδίο του χρόνου ώστε οι παλμοί να διευρυνθούν. Τα κύρια πλεονεκτήματα του 4-PPM που οδήγησαν στη καλύτερη επίδοση σε σχέση με τα υπόλοιπα σχήματα διαμόρφωσης είναι κατά πρώτον η υψηλότερη ισχύς κορυφής από τα σχήματα OOK, εκτός από το RZ-OOK με FWHM στο 33% των παλμών, και κατά δεύτερον, η φώραση μέγιστης πιθανοφάνειας χωρίς τη χρήση κατωφλίου.

Ένας περιορισμός που μπορεί να εμφανιστεί είναι ο μειωμένος αριθμός που μπορεί να προκύψει για τα φωτοηλεκτρόνια που αντιστοιχούν στα χρονικά δείγματα των σημάτων πολλαπλών φερόντων λόγω των υψηλών απωλειών, ενώ για τα παλμικά σχήματα εφαρμόστηκε ολοκλήρωση σε υψηλότερης διάρκειας διαστήματα. Επομένως, η λήψη ενός πολύ ασθενούς οπτικού σήματος χαμηλού ρυθμού με ικανοποιητικές επιδόσεις μετά από διάδοση μέσα από ένα κανάλι με πολύ υψηλές απώλειες (αλλά επαρκές εύρος ζώνης) είναι ένα σενάριο στο οποίο δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα των σχημάτων πολλαπλών φερουσών ACO και Flip-OFDM στη συμβατική τους μορφή, καθώς στο πεδίο του χρόνου τα σήματα πολλαπλών φερόντων είναι αναλογικές κυματομορφές κατά την εκπομπή τους.

Στην περίπτωση απεικόνισης του BER συναρτήσει του ηλεκτρικού SNR (Σχήμα 3.32(β)), το σχήμα 4-PPM υπερτερεί και πάλι των υπολοίπων σχημάτων. Η διαφορά σε σύγκριση με το διάγραμμα στο Σχήμα 3.32(α) έχει να κάνει με τη συμπεριφορά των σχημάτων πολλαπλών φερόντων που αποδίδουν καλύτερα από τις εκδοχές του OOK με RZ παλμούς. Αυτή η μεταβολή αποδίδεται στο υποβέλτιστο integrate-and-dump φιλτράρισμα των RZ-OOK σημάτων από τη μία, και στο γεγονός ότι τα σήματα πολλαπλών φερόντων είναι θωρακισμένα ενάντια στην αλληλοπαρεμβολή συμβόλων. Επιπλέον, για την ίδια μέση οπτική ισχύ εκπομπής, τα σχήματα πολλαπλών φερόντων έχουν υψηλότερη ηλεκτρική ισχύ σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα ηλεκτρικής ισχύος για τα OOK σήματα σύμφωνα με τις (3.28), (3.29), αλλά και σύμφωνα με την ηλεκτρική ισχύ ενός NRZ-OOK σήματος η οποία είναι $E[(x_{elec.OOK}(t))^2] = P_{mean sq. Elec., OOK} = (P_1)^2/2$, και η οποία για $G = 1$, $\mathfrak{R} = 1$ A/W, σε σχέση με την μέση οπτική ισχύ είναι

$$P_{mean} = \frac{P_1}{2} = \sqrt{\frac{P_1^2}{4}} = \sqrt{\frac{1}{2} \times P_{mean\ sq.\ elec., OOK}} \quad (3.35)$$

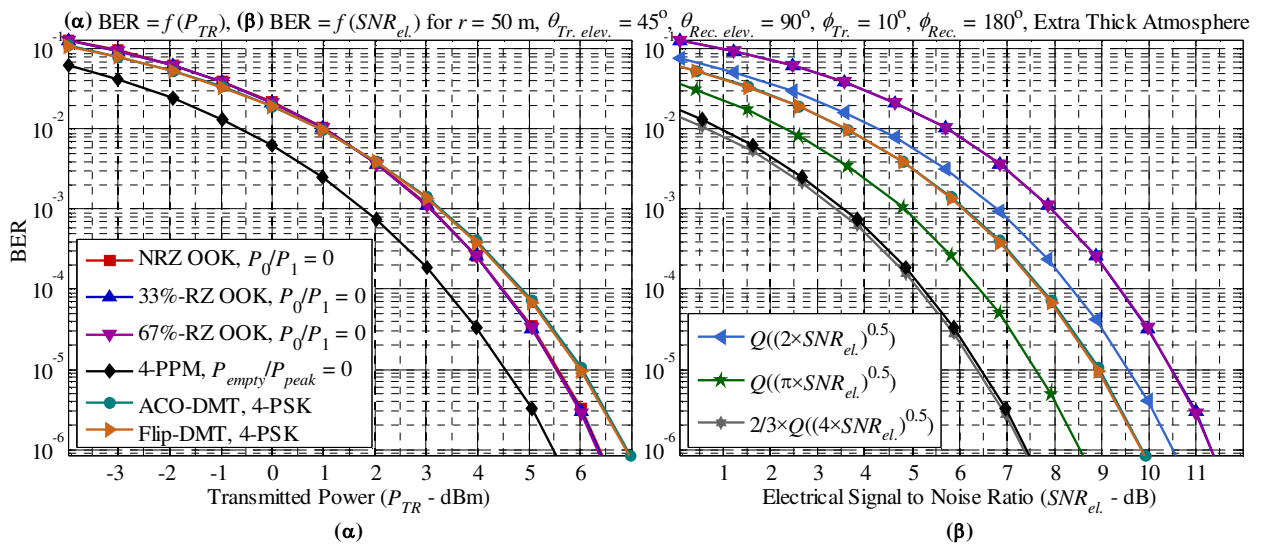
με $P_0 = 0$, όπως θεωρήθηκε στην υποενότητα 3.2.3.2.



Σχήμα 3.32. BER σαν συνάρτηση (α) της μέσης εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος (P_{TR}) και (β) του ηλεκτρικού SNR (SNR_{el}) για τα σχήματα διαμόρφωσης του υπομήντητος, θεωρώντας μεταδόσεις σε αραιή ατμόσφαιρα. Το ίδιο υπόμνημα ισχύει για τα (α) και (β).

Οι ίδιοι υπολογισμοί αλλά για την πολύ πυκνή ατμόσφαιρα φαίνονται στο Σχήμα 3.33. Η κρουστική απόκριση και η απόκριση συχνότητας του καναλιού έχουν παρουσιαστεί στο Σχήμα 3.21 της ενότητας 3.2.4.1. Στο Σχήμα 3.33(α), όπως και πριν, απεικονίζονται οι ρυθμοί σφαλμάτων bits συναρτήσει της μέσης εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος. Στην προκειμένη περίπτωση, για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το πιο πυκνό μέσο παρουσιάζει μικρότερες απώλειες και υψηλότερο εύρος ζώνης σε σχέση με το πιο αραιό μέσο υπό τη γεωμετρία της ζεύξης που θεωρήθηκε. Εδώ, το βασικό σημείο είναι ότι όλες οι καμπύλες έχουν μετατοπιστεί σε χαμηλότερα επίπεδα οπτικής ισχύος σε σχέση με αυτά στο Σχήμα 3.32(α) εξαιτίας της μείωσης των απωλειών κατά τη διάδοση. Επιπλέον, το OOK-NRZ σήμα συμπεριφέρεται το ίδιο με τις δύο εκδοχές RZ-OOK εξαιτίας της σημαντικά μικρότερης διεύρυνσης των παλμών αλλά και λόγω του υποβέλτιστου φιλτραρίσματος στο δέκτη για τους RZ παλμούς. Το 4-PPM εξακολουθεί να συμπεριφέρεται καλύτερα από τα άλλα σχήματα. Η ολίσθηση της καμπύλης του BER για το 4-PPM στο Σχήμα 3.33(α) σε σχέση με την καμπύλη στο Σχήμα 3.32(α) είναι λίγο μεγαλύτερη από την μείωση των απωλειών (5.84 dB, βάσει των τιμών που περιλαμβάνει ο Πίνακας 3.2). Αυτό υποδηλώνει ότι στην αραιή ατμόσφαιρα είχε εμφανιστεί αλληλοπαρεμβολή συμβόλων στο 4-PPM σήμα. Τα σχήματα πολλαπλών φερόντων μετατοπίστηκαν κατά την ποσότητα των decibels που αντιστοιχούν στην μείωση των απωλειών, καθώς αυτά τα σήματα προφυλάσσονται από το κυκλικό πρόθεμα και στις δύο περιπτώσεις ατμόσφαιρας. Μένοντας στα σχήματα πολλαπλών φερόντων, η διαφορά σε dB στα απαιτούμενα επίπεδα ισχύος εκπομπής για συγκεκριμένες τιμές BER είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις RZ-OOK εκδοχές δίνοντας παρεμφερείς επιδόσεις γι' αυτά τα συστήματα. Η διαφορά αυτή είναι περίπου 0.5 dB. Αυτή ήταν και η διαφορά των καμπυλών στο Σχήμα 3.32(α) αφού και στην πρώτη περίπτωση η αλληλοπαρεμβολή συμβόλων ήταν αμελητέα για τα RZ-OOK σήματα. Η πολύ μικρή διαφορά οφείλεται στο κυκλικό πρόθεμα και στο λίγο διαφορετικό τρόπο υπολογισμού του θορύβου εξαιτίας του τρόπου φιλτραρίσματος των διαφορετικών τύπων σημάτων.

Ο ρυθμός σφαλμάτων bits σε συνάρτηση του ηλεκτρικού SNR εμφανίζεται βελτιωμένος για το NRZ-OOK εξαιτίας της μειωμένης αλληλοπαρεμβολής συμβόλων στην πολύ πυκνή ατμόσφαιρα, σύμφωνα με το Σχήμα 3.33(β). Η μείωση του απαιτούμενου SNR για τις εκδοχές του RZ-OOK είναι πολύ μικρή, καθώς όπως ήδη αναφέρθηκε, αυτά τα σήματα ήταν πιο ανθεκτικά και στην αραιή ατμόσφαιρα. Η επίδραση του ευρύτερου καναλιού όσον αφορά το εύρος ζώνης φαίνεται και στη μείωση του απαιτούμενου SNR για συγκεκριμένες τιμές BER για το 4-PPM η οποία είναι μικρή αλλά όχι αμελητέα. Περνώντας στα σήματα πολλαπλών φερόντων, τα απαιτούμενα επίπεδα SNR για συγκεκριμένες τιμές BER στο πυκνό μέσο παραμένουν σχεδόν τα ίδια με αυτά στο αραιό κανάλι. Επιπροσθέτως, στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται οι αναλυτικοί μαθηματικοί τύποι που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 3.2.3.2. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός σφαλμάτων bits σε συνάρτηση του ηλεκτρικού SNR για το OOK-NRZ, που δίνεται στη (3.23), αναπαρίσταται από τη συνεχή καμπύλη με τα τρίγωνα ανοιχτού θαλασσί χρώματος. Η συνεχής καμπύλη με τους αστερίσκους αντιπροσωπεύει τη σχέση (3.29) για τα σχήματα ACO και Flip-OFDM. Η καμπύλη με τους αστερίσκους 6 κορυφών γκρι χρώματος αντιστοιχεί στη σχέση (3.26) για το M-PPM με $M = 4$. Παρά το γεγονός ότι στην πολύ πυκνή ατμόσφαιρα η αλληλοπαρεμβολή συμβόλων ελαχιστοποιείται, οι καμπύλες του BER για τα OOK, ACO και Flip-OFDM που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις διαφέρουν από αυτές που προέκυψαν από τις αναλυτικές εξισώσεις. Αυτό σημαίνει ότι εκτός από το θόρυβο βολής, υπάρχουν και οι άλλες συνιστώσες θορύβου που συνεισφέρουν στην εκτίμηση του παρονομαστή του SNR.



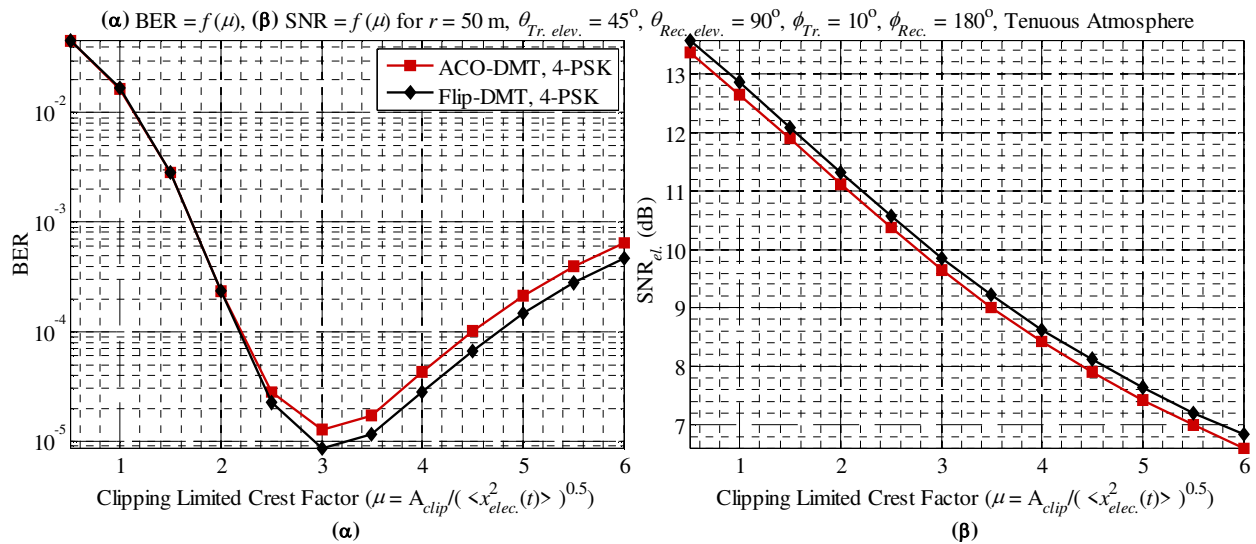
Σχήμα 3.33. BER σαν συνάρτηση (α) της μέσης εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος (P_{TR}) και (β) του ηλεκτρικού SNR (SNR_{el}) για τα σχήματα διαμόρφωσης του υπομήματος, θεωρώντας μεταδόσεις σε πολύ πυκνή ατμόσφαιρα. Το ίδιο υπόμνημα ισχύει για τα (α) και (β). Στο (β) απεικονίζονται και οι αντίστοιχοι θεωρητικοί τύποι της υποενότητας 3.2.3.2.

Στην περίπτωση υψηλού κέρδους στον PMT του δέκτη, ο θόρυβος βολής γίνεται η επικρατούσα συνιστώσα θορύβου και αυτό το γεγονός διαφοροποιεί την παρούσα μελέτη από άλλες δημοσιεύσεις όπως οι [159] και [184], στις οποίες στο συνολικό θόρυβο ενσωματώνονται μόνο συνιστώσες ανεξάρτητες από το ίδιο το σήμα με Gaussian κατανομή. Τέτοιες συνιστώσες είναι ο θερμικός θόρυβος και ο θόρυβος βολής της ακτινοβολίας από το περιβάλλον. Επιπροσθέτως, σε σχέση με την [162], στην οποία λαμβάνεται υπόψη και ο θόρυβος του ίδιου του σήματος εκτός από το θερμικό θόρυβο, υπάρχει η διαφορά ότι στην [162] δεν ακολουθείται η ενοποιημένη προσέγγιση του θορύβου κατά τη φώραση στην φωτοκάθοδο και του μεταβαλλόμενου κέρδους του PMT που ακολουθεί. Η ενοποιημένη Gaussian κατανομή οδηγεί σε πιο απαισιόδοξα αποτελέσματα από ότι στην περίπτωση που θα θεωρηθεί αρχικά Poisson κατανομή για το πλήθος των πρωτεύοντων φωτοηλεκτρονίων που μετρώνται στην κάθοδο του PMT

κατά τη διάρκεια του διαστήματος ολοκλήρωσης και έπειτα Gaussian κατανομή για το μεταβαλλόμενο κέρδος στον PMT όπως έγινε στην [162].

Όπως μπορεί να φανεί από τις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις, τα σήματα ACO και Flip-OFDM δεν προσφέρουν σημαντική βελτίωση στις επιδόσεις σε σύγκριση με τις εκδοχές του OOK. Ωστόσο, υπάρχουν μέθοδοι που μπορούν να βελτιώσουν την επίδοση των ACO και Flip-OFDM, μία από τις οποίες είναι η θετική αποκοπή (positive clipping) των κορυφών των σημάτων ACO και Flip-OFDM στο ηλεκτρικό επίπεδο, πριν διαμορφωθούν οι οπτικές πηγές στον πομπό. Εφαρμόζοντας τη θετική αποκοπή, εμφανίζεται ένας συμβιβασμός μεταξύ της έμμεσης αύξησης της οπτικής ισχύος και της εισαγωγής πρόσθετου θορύβου λόγω της αποκοπής στους αστερισμούς QAM ή PSK που έχουν φορτωθεί στα υποφέροντα. Αρχικά, πρέπει να οριστεί ένας κατάλληλος παράγοντας ώστε να εκφραστεί το επίπεδο της αποκοπής που εφαρμόζεται στο σήμα. Ένα τέτοιο μέτρο είναι ο παράγοντας περιορισμού κορυφής λόγω αποκοπής (Clipping Limited Crest Factor) που τέθηκε ως μ . Αυτός ο παράγοντας ορίζεται ως ο λόγος του μέγιστου επιτρεπόμενου πλάτους (A_{clip}) προς τη μέση τετραγωνική τιμή του ηλεκτρικού ACO ή του Flip-OFDM σήματος ($x_{elec.}(t)$) πριν την εφαρμογή της θετικής αποκοπής [67], δηλαδή $\mu = A_{clip}/\{E[x_{elec.}^2(t)]\}^{1/2} = A_{clip}/\{\langle x_{elec.}^2(t) \rangle\}^{1/2}$. Μετά την εφαρμογή της θετικής αποκοπής, η κορυφή και όλες οι τιμές του νέου σήματος μετά την αποκοπή προσαρμόστηκαν κατάλληλα στο ίδιο εύρος του σήματος (μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής) πριν την εφαρμογή της αποκοπής. Έπειτα, το σήμα πέρασε μέσω της διαμόρφωσης στο οπτικό επίπεδο. Το οπτικό σήμα που έχει προκύψει από το αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα μετά την θετική αποκοπή και την προσαρμογή στο αρχικό πλάτος έχει μεγαλύτερη μέση οπτική ισχύ από ότι το οπτικό σήμα που προέρχεται από το αρχικό σήμα πριν την εφαρμογή της αποκοπής. Με αυτό τον τρόπο, το τμήμα του πομπού αξιοποιείται πλήρως όσον αφορά το πλάτος διαμόρφωσης και τη μέση οπτική ισχύ που μπορεί να παρασχεθεί.

Επιλέγοντας ως στόχο μία αρχική τιμή BER, υπάρχουν ένα μέσο επίπεδο οπτικής ισχύος και ισοδύναμα ένα επίπεδο ηλεκτρικής ισχύος που αντιστοιχούν σε αυτή την τιμή BER. Επομένως, ο παράγοντας μ μπορεί να μεταβληθεί ώστε να καθοριστεί η βέλτιστη τιμή για την οποία η επίδοση στο δέκτη να βελτιστοποιείται. Επιστρέφοντας στο αραιό κανάλι και διατηρώντας τις τιμές για όλες τις παραμέτρους όπως ήδη τέθηκαν, προέκυψαν τα αποτελέσματα από την επίδραση της αποκοπής. Για διάφορες τιμές του μ , έγινε θετική αποκοπή των σημάτων πολλαπλών φερόντων (και προσαρμογή στο εύρος του αρχικού σήματος) και μετά ακολούθησε μετατροπή ηλεκτρικού σε οπτικό για να ακολουθήσει η διάχυτη μετάδοση. Μετά τη φώραση, εκτιμήθηκε η επίδοση του συστήματος. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.34(α). Ο ρυθμός σφαλμάτων bits σαν συνάρτηση του παράγοντα μ αποκαλύπτει το συμβιβασμό που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η τιμή του ρυθμού σφαλμάτων bits ελαχιστοποιείται για $\mu = 3$, όπως έχει αποδειχθεί για συμβατικά OFDM σήματα [67], και μπορεί να αποδειχθεί για τα ACO και Flip-OFDM ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία. Ασυμπτωτικά, καθώς ο παράγοντας μ συνεχίζει να αυξάνεται, ο ρυθμός σφαλμάτων bits θα φθάσει την τιμή στόχο του αρχικού σήματος πριν την αποκοπή. Εδώ, αυτή η τιμή στόχος για το ρυθμό σφαλμάτων bits τέθηκε ίση με 10^{-3} . Ο στόχος του 10^{-3} είναι κρίσιμος, επειδή κάτω από αυτή την τιμή, ο ρυθμός σφαλμάτων bits μπορεί να μειωθεί και κάτω από 10^{-9} με την εφαρμογή κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων (FEC) [36]. Φαίνεται ότι εφαρμόζοντας κατάλληλο επίπεδο αποκοπής για το συγκεκριμένο γεωμετρικό σχηματισμός της ζεύξης (απόσταση, γωνίες ανύψωσης, απόκλισης, FOV), ο ρυθμός σφαλμάτων bits μπορεί να μειωθεί από μία τιμή 10^{-3} σε μία τιμή 10^{-5} .



Σχήμα 3.34. (α) BER και (β) ηλεκτρικό SNR (SNR_{el}) σε συναρτήσεις του παράγοντα μ για το ACO και το Flip-OFDM σε αραιή ατμόσφαιρα.

Αν συσχετιστεί η τιμή του παράγοντα μ με το ηλεκτρικό SNR, καθώς ο παράγοντας μ αυξάνεται, το ηλεκτρικό SNR πέφτει τόσο για το ACO όσο και για το Flip-OFDM σήμα, σύμφωνα με το Σχήμα 3.34(β). Τα δύο σχήματα προφανώς έχουν την ίδια απόδοση. Υψηλότερη τιμή για το μ σημαίνει ότι το επίπεδο κορυφής του ηλεκτρικού σήματος πάνω από το οποίο το σήμα ψαλλιδίζεται τίθεται σε υψηλότερη τιμή και η αποκοπή «επηρεάζει» λιγότερο το σήμα. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη συμπεριφορά, ο ρυθμός σφαλμάτων bits ελαχιστοποιείται για μία συγκεκριμένη τιμή SNR, η οποία αντιστοιχεί στη βέλτιστη τιμή του μ . Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για το πολύ πυκνό μέσο και παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα σήματα των σχημάτων πολλαπλών φερόντων προστατεύονται από το κυκλικό πρόθεμα και ο λόγος SNR στο δέκτη είναι όμοιος και στις δύο εκδοχές ασύρματου μέσου όσον αφορά την πυκνότητά του. Αυτό είναι αναμενόμενο παρατηρώντας ότι οι καμπύλες του ρυθμού σφαλμάτων bit συναρτήσεως του SNR για τα σχήματα πολλαπλών φερόντων είναι σχεδόν ίδια στο Σχήμα 3.32(β) και στο Σχήμα 3.33(β).

3.2.5.4 Αριθμητικά αποτελέσματα για το δικτυακό σενάριο

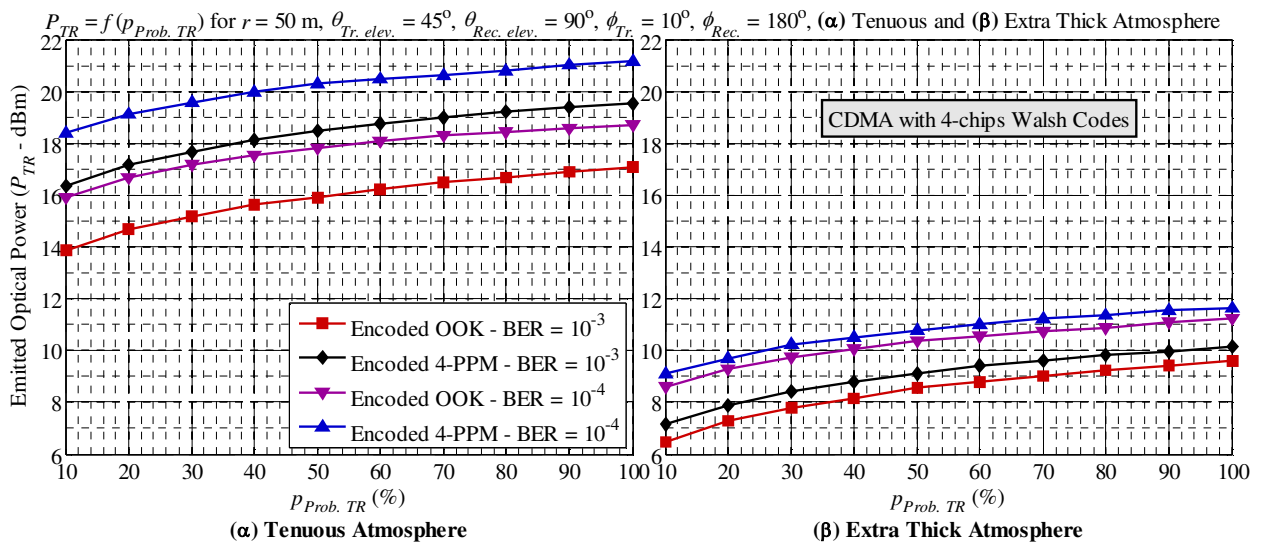
Θεωρώντας το δικτυακό σενάριο όπου εφαρμόστηκε σχήμα πολλαπλής πρόσβασης CDMA για τρεις κόμβους που μεταδίδουν και σύμφωνα με τις θεωρήσεις και τις υποθέσεις της ενότητας 3.2.5.2 και το Σχήμα 3.31(α), τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για αραιή ατμόσφαιρα φαίνονται στην Σχήμα 3.35(α). Για τιμή BER ίση με 10^{-3} που έχει τεθεί ως στόχος, κρατήθηκε η αντίστοιχη οπτική ισχύς εκπομπής της μεταδιδόμενης κωδικοποιημένης πληροφορίας για το εκάστοτε σχήμα διαμόρφωσης, για καθεμία τιμή της πιθανότητας $\rho_{prob.TR}$ και για τον επιθυμητό κόμβο. Για τη συγκεκριμένη τιμή BER, το κωδικοποιημένο OOK σήμα που έχει μικρότερο εύρος ζώνης από ότι το κωδικοποιημένο 4-PPM απαιτεί μικρότερα επίπεδα ισχύος από το 4-PPM για όλες τις τιμές της πιθανότητας $\rho_{prob.TR}$. Επιπλέον, το μέσο πλήθος των φωτοηλεκτρονίων που αντιστοιχούν στη διάρκεια του chip μετά την ολοκλήρωση στο δέκτη είναι μικρότερο για το 4-PPM σε σχέση με το OOK για ένα μη μηδενικό chip. Ο λόγος είναι ότι στο 4-PPM, η κωδικοποίηση γίνεται σε επίπεδο θυρίδας (με διάρκεια το ένα τέταρτο του μήκους του συμβόλου) και όχι σε επίπεδο bit, ενώ στο OOK, καθένα bit κωδικοποιείται για τον ίδιο ρυθμό bit των ωφέλιμων δεδομένων, όπως και στο 4-PPM για τις μεταδόσεις καθενός κόμβου, και με την ίδια κωδική λέξη (για κάθε κόμβο). Επιπροσθέτως, τα ωφέλιμα κωδικοποιημένα σήματα που προέρχονται από τα δύο σχήματα διαμόρφωσης που αποτελούν τη βάση πριν την κωδικοποίηση μεταδίδονται με την ίδια μέση οπτική ισχύ και την ίδια ισχύ κορυφής και τα σήματα αυτά υπόκεινται στις

ίδιες απώλειες. Επομένως, η μικρότερη διάρκεια του chip για το κωδικοποιημένο 4-PPM και η ίδια μέση εκπεμπόμενη οπτική ισχύς σε σχέση με το κωδικοποιημένο OOK είναι δύο περιοριστικοί παράγοντες για το 4-PPM. Μετά την αποκωδικοποίηση, η μικρότερη διάρκεια των θυρίδων του 4-PPM σε σχέση με τη διάρκεια των αποκωδικοποιημένων bits οδήγησε σε μικρότερο SNR για το 4-PPM. Επομένως, το υψηλότερο επίπεδο κατά 2.5 dB σε οπτική ισχύ που απαιτείται για το 4-PPM σε σχέση με το OOK για την ίδια τιμή BER που έχει τεθεί ως στόχος και την ίδια πιθανότητα $p_{prob.TR}$ κρίνεται ως λογική, όταν και τα δύο σήματα κωδικοποιούνται με βάση το σχήμα CDMA. Άλλο θέμα είναι η εξάλειψη των πλεονεκτημάτων της φώρασης μέγιστης πιθανοφάνειας χωρίς χρήση κατωφλίου του 4-PPM (μετά την αποκωδικοποίηση) σε σχέση με το OOK, όταν έχει εφαρμοστεί και για τα δύο σχήματα CDMA κωδικοποίηση. Όταν ο στόχος για το ρυθμό σφαλμάτων bits τεθεί σε χαμηλότερη τιμή, τότε και τα δύο κωδικοποιημένα σήματα από τα δύο σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση πρέπει να εκπεμφθούν με υψηλότερη ισχύ. Ταυτόχρονα, η σχέση τους παραμένει η ίδια, καθώς σύμφωνα με τις καμπύλες στο Σχήμα 3.35(α), η πρόσθετη οπτική ισχύς που απαιτείται για το 4-PPM παραμένει 2.5 dB σε σύγκριση με τις απαιτήσεις σε ισχύ για το κωδικοποιημένο OOK, για ρυθμό σφαλμάτων bits ίσο με 10^{-4} και την ίδια πιθανότητα $p_{prob.TR}$.

Κάτι που ίσως να μην είναι σαφές είναι ότι μετά την αποκωδικοποίηση, εξαιτίας της διεύρυνσης των παλμών που προκαλείται από το κανάλι, φωτοηλεκτρόνια μπορεί να εμφανιστούν σε θυρίδες ή bits που είναι γειτονικές των θυρίδων/bits στη διάρκεια των οποίων θα έπρεπε να εμφανιστούν. Αυτά τα «υπολειμματικά» φωτοηλεκτρόνια αφορούν όχι μόνο το επιθυμητό σήμα, αλλά και τα σήματα που αποτελούν παρεμβολές στο δέκτη του κεντρικού κόμβου. Αυτό σημαίνει ότι το επιθυμητό σήμα θα υποστεί την επίδραση της όχι τέλει αποκωδικοποίησης του ίδιου του σήματος αλλά και των σημάτων από παρεμβολή που εκπέμπονται ταυτόχρονα. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.22(β), οι εκτιμώμενες τιμές εύρους ζώνης για την περίπτωση αραιής ατμόσφαιρας είναι κοντά στο ρυθμό των μεταδιδόμενων chips μετά την κωδικοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, με 4 chips ανά κωδική λέξη, ο ρυθμός των chips είναι 4×10 kbit/s για το κωδικοποιημένο OOK, ενώ το εύρος ζώνης των καναλιών διάχυτων μεταδόσεων κυμαινόταν μεταξύ 103.5 kHz και 107.5 kHz για γωνία ανύψωσης πομπού ίση με 45° και για αποστάσεις από τον πομπό από 10 ως 50 μέτρα.

Τα αποτελέσματα για την αντίστοιχη περίπτωση προσομοίωσης για το πολύ πυκνό κανάλι δίνονται στο Σχήμα 3.35(β). Το φασματικά ευρύτερο κανάλι προκαλεί σημαντικά λιγότερη αλληλοπαρεμβολή συμβόλων. Επομένως, η ορθογωνιότητα των Walsh κωδικών είναι μία ιδιότητα που είναι δυνατό να αξιοποιηθεί στα κανάλια με το σημαντικά μεγαλύτερο εύρος ζώνης για τον αποδοτικότερο διαχωρισμό του επιθυμητού σήματος από τις παρεμβολές. Επιπροσθέτως, οι μικρότερες απώλειες επιτρέπουν μεταδόσεις με χαμηλότερα επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος. Στοχεύοντας και πάλι σε μία τιμή BER ίση με 10^{-3} , οι απαιτήσεις σε ισχύ τόσο για το κωδικοποιημένο OOK και το 4-PPM εμφανίστηκαν σημαντικά μειωμένες εξαιτίας των μειωμένων απωλειών και της μειωμένης αλληλοπαρεμβολής συμβόλων σε σύγκριση με την περίπτωση του αραιού μέσου. Μένοντας στο OOK, η μείωση της απαιτούμενης ισχύος είναι 7.50 dB για $p_{prob.TR} = 100\%$ και 7.37 dB για $p_{prob.TR} = 10\%$. Η μείωση στην απαιτούμενη ισχύ είναι ελαφρώς μικρότερη για τις μικρότερες τιμές της πιθανότητας $p_{prob.TR}$ λόγω των μικρότερων παρεμβολών και στα δύο περιβάλλοντα, δηλαδή οι μικρότερες παρεμβολές δεν έχουν μόνο ως αποτέλεσμα μικρότερες απαιτήσεις σε ισχύ στον πομπό για το καθένα περιβάλλον ξεχωριστά, αλλά από το πέρασμα από το αραιό στο πυκνό περιβάλλον, η βελτίωση είναι ελαφρώς μικρότερη σε σχέση με την επίδραση της μέγιστης τιμής της $p_{prob.TR}$ για τα δύο περιβάλλοντα. Περνώντας στο 4-PPM, οι απαιτήσεις σε ισχύ μειώνονται κάτι λιγότερο από 9.40 dB και 9.20 dB, για $p_{prob.TR} = 100\%$ και 10% , αντίστοιχα. Πρόσθετο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από το Σχήμα 3.35(β) είναι

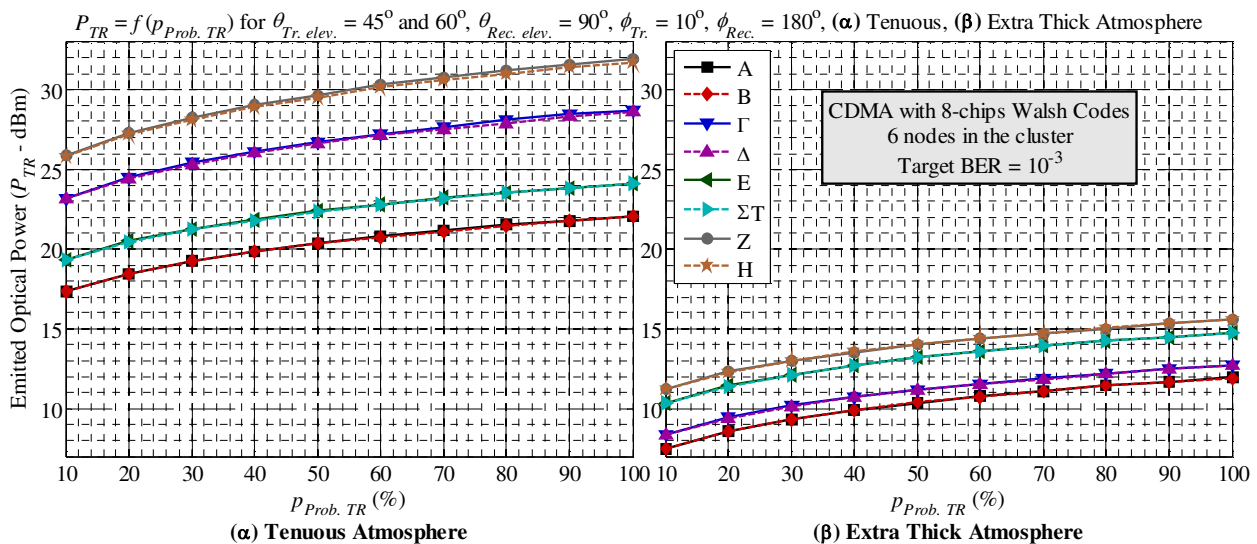
ότι με το μεγαλύτερο εύρος ζώνης των καναλιών στο πυκνότερο μέσο συρρικνώνεται η διαφορά των απαιτούμενων εκπεμπόμενων επιπέδων ισχύος μεταξύ 4-PPM και ΟΟΚ σε περίπου 0.6 dB για όλες τις τιμές της πιθανότητας $p_{prob.TR}$. Μειώνοντας, όπως πριν, το στόχο του ρυθμού σφαλμάτων bits σε 10^{-4} , επιβάλλονται υψηλότερες απαιτήσεις σε ισχύ εκπομπής. Συγκρίνοντας τους περιορισμούς σε ισχύ που εισάγονται από το αραιό και το πυκνό μέσο, για το ΟΟΚ και για $p_{prob.TR} = 100\%$, περίπου 7.50 dB λιγότερη ισχύ είναι αναγκαία για να επιτευχθεί ο στόχος του 10^{-4} σαν ρυθμός σφαλμάτων bits. Για $p_{prob.TR} = 10\%$, η μείωση σε ισχύ εκπομπής ανέρχεται σε περίπου 7.30 dB περίπου. Τα αντίστοιχα επίπεδα μείωσης για το 4-PPM είναι περίπου 9.50 dB και 9.30 dB. Η σχετική διαφορά σε απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύ (σε dB) για τον απαιτούμενο ρυθμό BER γίνεται περίπου 0.5 dB υπέρ του κωδικοποιημένου ΟΟΚ. Οι μειωμένες επιδόσεις για το κωδικοποιημένο 4-PPM στην αραιή ατμόσφαιρα, βελτιώνονται σημαντικά στο πολύ πυκνό μέσο, αλλά και πάλι παραμένει κατώτερο του κωδικοποιημένου ΟΟΚ. Παρόλ' αυτά, η υποβάθμιση είναι μικρή.



Σχήμα 3.35. Απαιτούμενα επίπεδα μέσης οπτικής ισχύος ως προς την πιθανότητα $p_{prob. TR}$ (α) υπό καθεστώς καθαρής και (β) υπό καθεστώς πολύ πυκνής ατμόσφαιρας, για BER 10^{-3} και 10^{-4} , για κωδικοποιημένα ΟΟΚ και 4-PPM μέσα σε ένα δίκτυο 4 κόμβων με 3 να εκπέμπουν. Οι μεταδόσεις ενός εξ αυτών αξιολογήθηκαν. Το ίδιο υπόμνημα και ο ίδιος κατακόρυφος άξονας ισχύουν για τα (α) και (β).

Αυξάνοντας το πλήθος των κόμβων στο δικτυακό σενάριο, οι επιδόσεις αναμένεται ότι θα χειροτερέψουν υπό καθεστώς αραιής ατμόσφαιρας. Αυτή η επιδείνωση θα εμφανιστεί εξαιτίας του περιορισμένου εύρους ζώνης του καναλιού λαμβάνοντας υπόψη το ιδιαίτερα ευρύ FOV του δέκτη και την αύξηση του εύρους ζώνης του σήματος μετά την κωδικοποίηση με μεγαλύτερου μήκους κωδική ακολουθία για την υποστήριξη μεγαλύτερου πλήθους κόμβων. Διατηρώντας τον επιθυμητό κόμβο του οποίου οι μεταδόσεις αξιολογούνται στα όρια της περιοχής που ελέγχει ο κεντρικός κόμβος, η υποβάθμιση των επιδόσεων θα εμφανιστεί ακόμα κι αν κάποιοι κόμβοι τοποθετηθούν πιο κοντά στον κεντρικό κόμβο. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.36(α) για καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας, όπου το πλήθος των κόμβων και το μήκος των κωδικών αυξήθηκαν σε 6 και 8, αντίστοιχα. Οι συνδυασμοί και οι τοπολογίες που φαίνονται στο σχήμα περιλαμβάνουν τις περιπτώσεις κωδικοποιημένων τόσο ΟΟΚ όσο και 4-PPM σημάτων, δύο περιπτώσεις γωνιών ανύψωσης για τους κόμβους που εκπέμπουν, 45° και 60° , και δύο περιπτώσεις αποστάσεων των κόμβων, με 5 κόμβους στα 50 μέτρα στη μία περίπτωση και με 2 κόμβους που προκαλούν παρεμβολές στα 10 μέτρα με τους υπόλοιπους 3 στα 50 μέτρα στη δεύτερη περίπτωση σύμφωνα με το Σχήμα 3.31(β). Φαίνεται καθαρά ότι η αύξηση του πλήθους των κόμβων με γωνία ανύψωσης των πομπών $\theta_{Tr. elev.}$ είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των απαιτούμενων επιπέδων

οπτικής ισχύος για την επίτευξη ρυθμού σφαλμάτων bits ίσο με 10^{-3} σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης Walsh κωδικών μήκους τεσσάρων chips τόσο για το OOK όσο και για το 4-PPM στην αρχική εκδοχή του δικτύου των τεσσάρων κόμβων. Το γεγονός ότι τα αποτελέσματα για τις δύο τοπολογίες των 6 κόμβων συμπίπτουν για το ίδιο σχήμα διαμόρφωσης και την ίδια γωνία ανύψωσης οφείλεται στην προϋπόθεση ότι στο δέκτη του κεντρικού κόμβου λαμβάνεται το ίδιο επίπεδο μέσης οπτικής ισχύος από όλους τους κόμβους ανεξάρτητα από τη θέση τους. Όταν η γωνία ανύψωσης όλων των πομπών των κόμβων που εξέπεμπαν αυξήθηκε σε 60° , οι απαιτήσεις σε ισχύ αυξήθηκαν περαιτέρω και ειδικά για το 4-PPM. Από τις καμπύλες με τους δίσκους και τους αστερίσκους, δηλαδή στις περιπτώσεις Z και H στο Σχήμα 3.36(α) που αντιστοιχούν στο κωδικοποιημένο 4-PPM με γωνία ανύψωσης των πομπών ίση με 60° , φαίνεται ότι μετά από την τιμή 60% για την πιθανότητα $p_{prob.TR}$ καθένας κόμβος που προκαλεί παρεμβολές να μεταδώσει ταυτόχρονα με τον επιθυμητό κόμβο, ο επιθυμητός κόμβος πρέπει να μεταδώσει πάνω από 1 Watt μέσης ισχύος ώστε να καταφέρει να επιτύχει τον επιθυμητό ρυθμό σφαλμάτων bits. Στην αραιή ατμόσφαιρα, το κωδικοποιημένο OOK ξεπέρασε σε επιδόσεις το 4-PPM και για τις δύο περιπτώσεις γωνιών ανύψωσης των πομπών και για τις δύο περιπτώσεις θέσεων των 5 από τους 6 κόμβους που εξετάστηκαν.



Σχήμα 3.36. Απαιτούμενα επίπεδα μέσης οπτικής ισχύος ως προς την πιθανότητα $p_{prob. TR}$ (α) υπό καθεστώς καθαρής και (β) υπό καθεστώς πολύ πυκνής ατμόσφαιρας για $BER = 10^{-3}$. A: Κωδικοποιημένο OOK, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, 5 κόμβοι στα 50 μέτρα, B: Κωδικοποιημένο OOK, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, 2 από τους 5 κόμβους στα 10 μέτρα, Γ: Κωδικοποιημένο 4-PPM, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, 5 κόμβοι στα 50 μέτρα, Δ: Κωδικοποιημένο 4-PPM, $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, 2 από τους 5 κόμβους στα 10 μέτρα, E: Κωδικοποιημένο OOK, $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, 5 κόμβοι στα 50 μέτρα, ΣΤ: Κωδικοποιημένο OOK, $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, 2 από τους 5 κόμβους στα 10 μέτρα, Z: Κωδικοποιημένο 4-PPM, $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, 5 κόμβοι στα 50 μέτρα, H: Κωδικοποιημένο 4-PPM, $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, 2 από τους 5 κόμβους στα 10 μέτρα. Το ίδιο υπόμνημα και ο ίδιος κατακόρυφος άξονας ισχύουν για τα (α) και (β).

Οι απαιτήσεις σε εκπεμπόμενη ισχύ μετριάζονται στην περίπτωση της πολύ πυκνής ατμόσφαιρας, αλλά και πάλι είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση της ομάδας των 4 κόμβων, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.36(β). Αυτό γίνεται φανερό όταν $p_{prob.TR} = 100\%$ και οι γωνίες ανύψωσης των κόμβων που μετέδωσαν ωφέλιμη πληροφορία ή σήμα παρεμβολής τέθηκαν σε γωνία $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$, όπου η μέση οπτική ισχύς αυξήθηκε κατά κάτι λιγότερο από 2.5 dB για το κωδικοποιημένο OOK και κατά κάτι περισσότερο από 2.5 dB για το κωδικοποιημένο 4-PPM σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που δίνονται στο Σχήμα 3.35(β) για τις μεταδόσεις του επιθυμητού κόμβου στο μικρό δίκτυο των 4 κόμβων σε καθεστώς πολύ πυκνού μέσου. Η επικράτηση του κωδικοποιημένου OOK έναντι του 4-PPM περιορίστηκε σε ένα εύρος μεταξύ 0.71 dB και 0.83 dB χαμηλότερης ισχύος όταν $\theta_{Tr. elev.} = 45^\circ$ και για όλες τις τιμές της πιθανότητας $p_{prob.TR}$ και

για τις δύο τοπολογίες των 6 συνολικά κόμβων. Για $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, η αντίστοιχη διαφορά υπέρ του κωδικοποιημένου ΟΟΚ κυμάνθηκε μεταξύ 0.81 dB και 0.89 dB. Γίνεται φανερό ότι η πύκνωση του μέσου από μικροσωματίδια-πηγές σκέδασης οδήγησε σε χαμηλότερα μέσα επίπεδα ισχύος που μπορούν να υποστηριχθούν από ένα πομπό, χωρίς την ανάγκη χρήσης υπερβολικά μεγάλου πλήθους από LEDs ή τεράστιες καταναλώσεις ισχύος στους κόμβους που μπορεί να ανήκουν σε μία (υπο)ομάδα ή ένα δίκτυο αισθητήρων. Βέβαια, από τα θεωρητικά αποτελέσματα σε μία περίπτωση δικτυακής υποδομής, το πλήθος των ενεργών κόμβων πρέπει να παραμείνει μικρό ώστε να παραμένουν χαμηλές και οι απαιτήσεις σε ισχύ μέσα σε ένα περιβάλλον πυκνής ατμόσφαιρας, όταν χρησιμοποιηθεί για πολλαπλή πρόσβαση ένα σχήμα CDMA. Επιπλέον, πρέπει να ελέγχονται και οι εκπομπές από κάθε κόμβο ώστε, αν είναι δυνατό, να μειώνονται περαιτέρω οι ανάγκες σε εκπεμπόμενη ισχύ.

3.2.5.5 Αριθμητικά αποτελέσματα σεναρίου ζεύξης σημείου-προς-σημείο με εφαρμογή τεχνικής πολλαπλών σκεδάσεων για το κανάλι

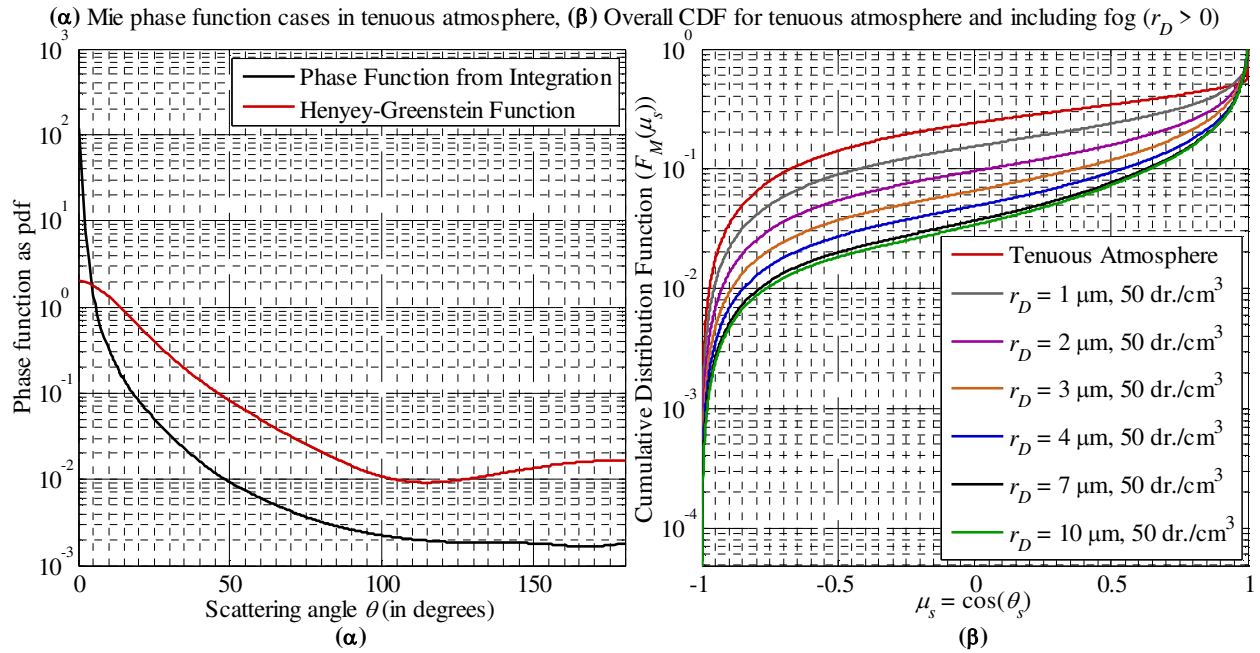
Σε αυτή την υποενότητα, η επίδοση ζεύξεων σημείου-προς-σημείο χωρίς οπτική επαφή εκτιμήθηκε αριθμητικά υπολογίζοντας το λόγο του σήματος προς το θόρυβο ($SNR_{el.}$) για απόσταση ζεύξεων $r = 20$ m και $r = 50$ m και για διάφορες περιπτώσεις πυκνότητας της ατμόσφαιρας, υπό την υπόθεση ότι τα κανάλια έχουν ευρύτερο εύρος ζώνης από αυτό των σημάτων, κάτι το οποίο ισχύει για τις μικρές αποστάσεις των λίγων δεκάδων μέτρων που έχουν θεωρηθεί εδώ [153]. Αυτό που διακρίνει αυτή την περίπτωση από την προηγούμενη είναι ότι οι απώλειες του καναλιού υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων που περιγράφηκε σύντομα στην ενότητα 3.2.2.2 και δίνεται στην [149], ενώ ενσωματώθηκαν πολλά σημεία από την [155]. Οι εκτιμήσεις των απωλειών έγιναν για μήκος κύματος $\lambda = 265$ nm. Μία τέτοια θεωρητική μελέτη θα δώσει μία χοντρική πρώτη εικόνα της επίδρασης της ομίχλης χρησιμοποιώντας παραμέτρους από τη βιβλιογραφία και τις ονομαστικές τιμές ιδιοτήτων των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μετρήσεις. Τα σχήματα διαμόρφωσης που εξετάστηκαν ήταν τα 4-PPM και Flip-OFDM. Θεωρήθηκε μετάδοση των σημάτων σε ρυθμό 10 kbit/s. Οι γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη τέθηκαν σε υψηλές τιμές και πιο συγκεκριμένα οι γωνίες ήταν $\theta_{Tr. elev.} = \theta_{Rec. elev.} = 70^\circ$. Οι συνθήκες που εξετάστηκαν ήταν υπό καθαρή ατμόσφαιρα και υπό καθεστώς ομίχλης με διαφορετικές ακτίνες σταγονιδίων, όμοια με τη θεώρηση στην υποενότητα 3.2.4.2. Η γωνία απόκλισης του πομπού τέθηκε ίση με $\varphi_{Tr.} = 10^\circ$, ενώ η γωνία θέασης του δέκτη (FOV) τέθηκε ίση με $\varphi_{Rec.} = 30^\circ$. Για την καθαρή ατμόσφαιρα εφαρμόστηκε το αστικό μοντέλο αερολυμάτων για ορατότητα 15 km και σχετική υγρασία ίση με 30%. Όπως και προηγουμένως στην 3.2.4.2, για καθεμία περίπτωση εμφάνισης ομίχλης, υποτέθηκε ότι όλα τα σταγονίδια είχαν ίδια ακτίνα. Για την περίπτωση καθαρής ατμόσφαιρας ($r_D = 0$), η συνάρτηση φάσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή που προέκυψε από τη θεωρία της σκέδασης Mie αντί της συνάρτησης Henyey-Greenstein (3.2). Οι δύο συναρτήσεις φαίνονται στο Σχήμα 3.37(α). Η κυματομορφή που προέκυψε από την αριθμητική επίλυση του ολοκληρώματος που αφορά τη συνάρτηση φάσης στην (3.31) έδωσε μεγαλύτερη τιμή στις μικρές γωνίες και μικρότερες τιμές στις μεγαλύτερες γωνίες δυνατής σκέδασης ως προς την κατεύθυνση που έχει ένα φωτόνιο την στιγμή πριν την αλληλεπίδραση με το μικροσωματίδιο. Υπενθυμίζεται ότι στην υποενότητα 3.2.4.2, δόθηκε και σχηματικά (Σχήμα 3.23(α)) η κατανομή μεγεθών μικροσωματιδίων αστικού μοντέλου αερολυμάτων για RH = 30%, Vis. = 15 km και περιγράφηκε σαν ένα άθροισμα δύο λογαριθμικοκανονικών κατανομών. Τα αερολύματα θεωρήθηκαν σφαίρες και ως προς τη σύστασή τους ήταν ένα μίγμα από υδατοδιαλυτές ουσίες, μικροσωματίδια τύπου σκόνης και αερολύματα τύπου αιθάλης με κατάλληλες ποσοστώσεις για τους δείκτες διάθλασης καθεμίας συνιστώσας για καθεμία από τις δύο κατανομές μικρών και μεγάλων αερολυμάτων. Για καθεμία από τις δύο κατανομές και για το συγκεκριμένο μήκος

κύματος που επιλέχθηκε, θεωρήθηκε ένας σύνθετος δείκτης διάθλασης λόγω της μίξης των συνιστωσών. Αυτό σημαίνει ότι η τελική στάθμιση του δείκτη διάθλασης του αθροίσματος των κατανομών θα έπρεπε να γίνει θεωρώντας ότι έχουμε μία εσωτερική μίξη (internal mixing) σύμφωνα με την αναφορά [171]. Σε αυτή την αναφορά, σε μία εσωτερική μίξη θεωρείται ότι κάθε μικροσωματίδιο μίας κατανομής μεγεθών αποτελείται από μίξη συνιστωσών και δε θεωρείται ότι κάθε μικροσωματίδιο έχει ξεχωριστή σύσταση από άλλα της ίδιας κατανομής, πχ ένα μικροσωματίδιο καθαρής αιθάλης μαζί με ένα μικροσωματίδιο τύπου σκόνης που συνυπάρχουν σε ένα όγκο. Αυτά που διέκριναν τις δύο κατανομές στο αστικό μοντέλο* ήταν τα μεγέθη των ακτίνων (mode τιμές και η τυπική απόκλιση) των μικροσωματιδίων και η ολική πυκνότητα των μικροσωματιδίων, ενώ ο δείκτης διάθλασης ανά κατανομή προέκυπτε λαμβάνοντας υπόψη τα μεγέθη των ακτίνων, έχοντας ως βάση τους ίδιους δείκτες διάθλασης για μηδενική υγρασία. Αυτό σημαίνει ότι για μηδενική σχετική υγρασία, οι δείκτες διάθλασης για τις δύο κατανομές ήταν ίδιοι. Μεταβολή της υγρασίας έδινε διαφορετικούς δείκτες διάθλασης ανά κατανομή λόγω της μεταβολής των μεγεθών των μικροσωματιδίων και ο σχετικός μαθηματικός τύπος δίνεται στην υποενότητα 3.2.4.2. Ο Πίνακας 3.3 στην υποενότητα 3.2.4.2 περιλαμβάνει τιμές των παραμέτρων των κατανομών για δύο παραδείγματα που παρουσιάστηκαν. Υπό αυτές τις παρατηρήσεις, δικαιολογείται η επιλογή της εσωτερικής μίξης για τον υπολογισμό του σύνθετου δείκτη διάθλασης της τελικής κατανομής όπως περιγράφεται στην [171] και για τους υπολογισμούς της θεωρίας Mie στην (3.31) απευθείας για την τελική κατανομή μεγεθών των αερολυμάτων της (3.30) και όχι για καθεμία κατανομή μεγεθών ξεχωριστά. Το αποτέλεσμα ήταν η εκτίμηση μίας συνάρτησης φάσης για τη Mie σκέδαση με τη στάθμιση που προβλέπεται στην (3.31). Η συγκεκριμένη μορφή της συνάρτησης $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ που προέκυψε στο Σχήμα 3.37(α) έχει να κάνει με την σημαντική επίδραση των μεγάλων σωματιδίων που παρά το ότι έχουν πολύ μικρότερες πυκνότητες ($n(r)$) σε σχέση με τα αερολύματα μικρότερων ακτίνων, έχοντας αρκετά μεγαλύτερες ακτίνες επιδρούν στο ολοκλήρωμα της (3.31) μέσω των διατομών σκέδασης $\sigma_s(r)$ ($\pi r^2 \times Q_{scat}$). Στην ενότητα Π.4 του παραρτήματος δίνονται κάποιες πρόσθετες πληροφορίες που αφορούν τη στάθμιση της συνάρτησης φάσης με διαφορετικό τρόπο για το συγκεκριμένο παράδειγμα προσεγγίζοντας καλύτερα τη συνάρτηση Henyey-Greenstein. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα καθαρής ατμόσφαιρας που εξετάζεται στην παρούσα υποενότητα, απομονώνοντας την σκέδαση Mie, αυτή θα είναι εντονότερα εμπρόσθια σε σχέση με το παράδειγμα για το οποίο υπολογίσθηκαν οι απώλειες στην υποενότητα 3.2.4.2. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα λίγο μεγαλύτερες απώλειες κάτι το οποίο επιβεβαιώθηκε στο Σχήμα 3.24(α) για αποστάσεις 20 και 50 μέτρων που εξετάστηκαν, όπου για καθαρή ατμόσφαιρα ($r_D = 0$) οι απώλειες ήταν μεγαλύτερες από ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε η λιγότερο «κατευθυντική» συνάρτηση Henyey-Greenstein.

Αντίθετα, η συνάρτηση Henyey-Greenstein χρησιμοποιήθηκε για καθεμία περίπτωση εμφάνισης ομίχλης (με εφαρμογή στην (3.2) του παράγοντα ασυμμετρίας g που εκτιμήθηκε από την τρίτη εξίσωση στην (3.31) της θεωρίας Mie), επειδή δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια πρόσθετη πληροφορία που να έχει σχέση με κατανομή μεγεθών των σταγονιδίων ομίχλης, ώστε τελικά να προκύψει κάποια εκτίμηση της συνάρτησης φάσης από την αριθμητική ολοκλήρωση της αντίστοιχης εξίσωσης ($\rho_{mie}(\cos(\theta))$) της (3.31). Οι λόγοι για τους οποίους ακολουθήθηκε η λογική σταγονιδίων μίας ακτίνας περιγράφηκαν στην υποενότητα 3.2.4.2, ενώ συμπληρωματικά στοιχεία δίνονται και στην παράγραφο Π.4 για εκδοχές ομίχλης που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία, αλλά δε χρησιμοποιήθηκαν λόγω του ότι δεν υπήρχε κάποια πληροφορία συσχέτισης με την ομίχλη που παράγεται από τη σχετική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές μετρήσεις. Επιπλέον, η στάθμιση των συναρτήσεων φάσης για την

* Όμοια είναι και η θεώρηση στο αγροτικό μοντέλο από το οποίο προκύπτει το αστικό μοντέλο [170].

εξαγωγή της τελικής συνάρτησης φάσης που περιλαμβάνει την επίδραση τόσο των μορίων όσο και των μικροσωματιδίων και των σταγονιδίων έγινε όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 3.2.4.2 στη σχέση (3.32).



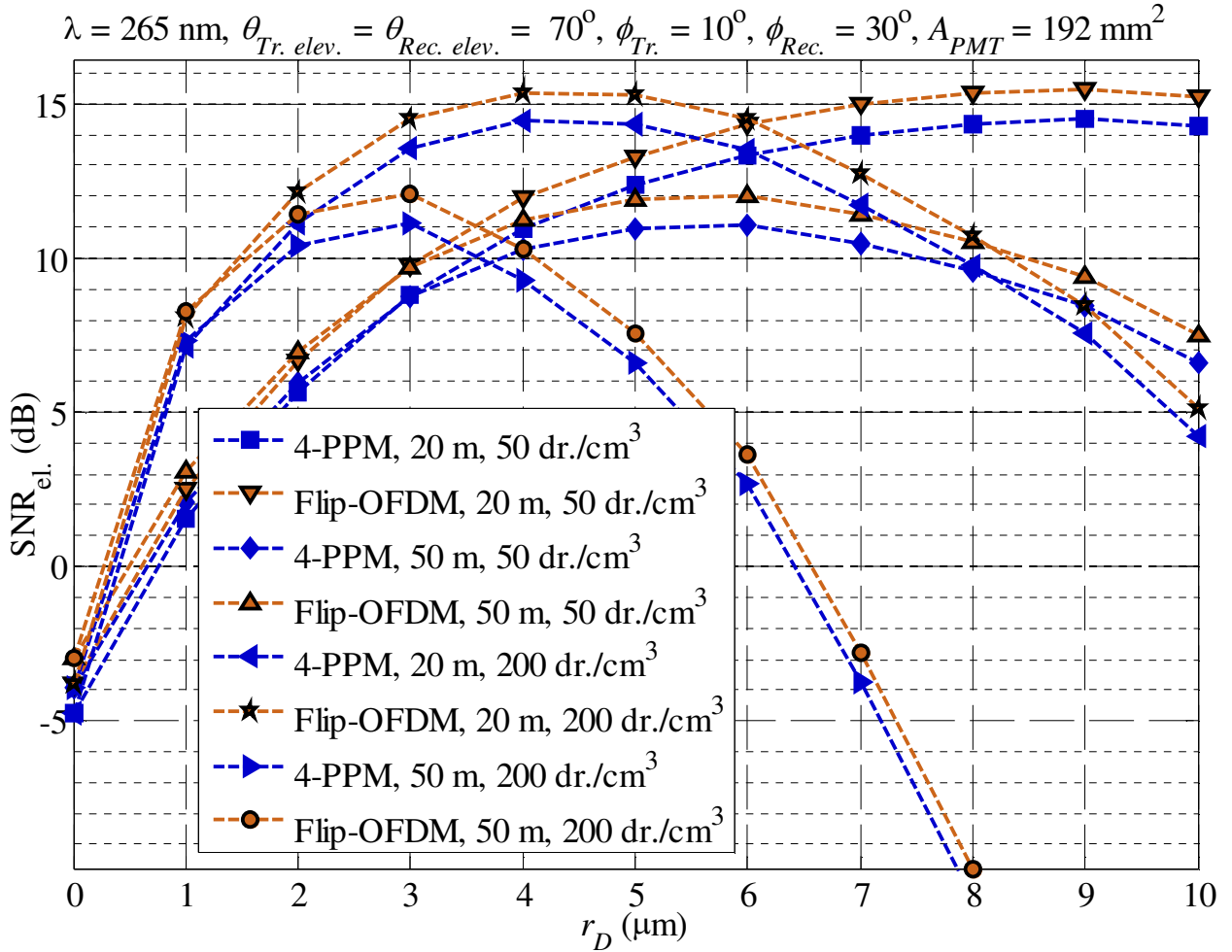
Σχήμα 3.37. (α) Συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie ως pdf για καθαρή ατμόσφαιρα εκφρασμένη μέσω του αποτελέσματος της αριθμητικής επίλυσης του τελευταίου ολοκληρώματος στην (3.31) και μέσω της συνάρτησης της Henyey-Greenstein. (β) Αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής για το μέσο μετά τη στάθμιση όλων των συναρτήσεων φάσης υπό καθαρή ατμόσφαιρα και υπό καθεστώς ομίχλης με σταγονίδια διαφόρων ακτίνων και πυκνότητα αυτών 50 dr./cm³.

Η ηλιακή ακτινοβολία ελήφθη υπόψη θεωρώντας ρυθμό 14500 μετρούμενων φωτονίων ανά δευτερόλεπτο ($N_n = 14500$ ph/sec), όπως καθορίστηκε και στις υποενότητες 3.2.5.1–3.2.5.4. Τα επίπεδα μέσης ισχύος εκπομπής που θεωρήθηκαν ήταν 2 και 7 dBm, για τις αποστάσεις $r = 20$ m και $r = 50$ m, αντίστοιχα, ώστε στο δέκτη να εκτιμηθούν παρόμοιες τιμές ηλεκτρικού SNR για τις δύο αποστάσεις υπό καθαρή ατμόσφαιρα. Τα 5 dB διαφοράς των δύο επιπέδων ισχύος δικαιολογούνται από το ότι για αποστάσεις 20 m και 50 m, οι απώλειες εκτιμήθηκαν κοντά στα 98.86 dB και 103.25 dB, αντίστοιχα, όπως δίνονται και στο Σχήμα 3.24(α) με κόκκινο χρώμα για ($r_D = 0$). Αναφέρθηκε νωρίτερα ότι οι απώλειες ήταν λίγο αυξημένες σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν για καθαρή ατμόσφαιρα στην 3.2.4.2 λόγω της μεταβολής της συνάρτησης φάσης λόγω της σκέδασης Mie (95.43 dB και 99.90 dB ήταν οι απώλειες για τις ίδιες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη στο Σχήμα 3.24(α) για απόσταση κάλυψης 20 m και 50 m, αντίστοιχα, όταν εφαρμόστηκε η συνάρτηση Henyey-Greenstein για την σκέδαση Mie υπό καθαρή ατμόσφαιρα). Για τις υπόλοιπες παραμέτρους που αφορούν την πλευρά του πομπού (τύπος πηγών) και την πλευρά του δέκτη (τύπος και διαστάσεις φωτοφωρατή, οπτικό φίλτρο) ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.2.5.1.

Οι δύο καμπύλες για τις απώλειες στα 20 και στα 50 μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του ασύρματου καναλιού σε αυτή την ενότητα φαίνονται για όλες τις τιμές ακτίνων σταγονιδίων ($r_D \geq 0$) με κόκκινο χρώμα πίσω από τις αντίστοιχες μαύρες καμπύλες στο Σχήμα 3.24(α) για συγκέντρωση 50 σταγονιδίων ανά cm³ (dr./cm³ στη λεζάντα και στο υπόμνημα του σχήματος). Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.38 και σε συνδυασμό με τις καμπύλες των απωλειών που περιλαμβάνονται στο Σχήμα 3.24(α), φαίνεται εύκολα ότι για απόσταση ζεύξης $r = 20$ m και με πυκνότητα ομίχλης 50 dr./cm³, οι απώλειες ισχύος ελαττώνονταν σταδιακά

(με την αύξηση των ακτίνων των σταγονιδίων) μέχρι την περίπτωση σταγονιδίων ομίχλης με $r_D = 9 \mu\text{m}$. Για μεγαλύτερη ακτίνα ($10 \mu\text{m}$), οι απώλειες αυξήθηκαν ελαφρώς και πάλι μειώνοντας το λόγο SNR. Για την ίδια πυκνότητα σταγονιδίων και για απόσταση $r = 50 \text{ m}$, ο λόγος SNR αυξήθηκε μέχρι και την περίπτωση ακτίνας $r_D = 6 \mu\text{m}$ για να αρχίζει να μειώνεται ξανά λόγω της αύξησης των απωλειών. Για πυκνότητα 200 σταγονιδίων ανά cm^3 και μέχρι τιμή ακτίνων $r_D = 4 \mu\text{m}$ και $r_D = 3 \mu\text{m}$ για αποστάσεις $r = 20 \text{ m}$ και $r = 50 \text{ m}$, αντίστοιχα, η εκτίμηση του λόγου SNR εμφανίστηκε βελτιωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές SNR για τις ίδιες ακτίνες σταγονιδίων στην περίπτωση μικρότερης πυκνότητας (50 dr./cm^3). Ωστόσο, όταν θεωρήθηκε ομίχλη με μεγαλύτερα σταγονίδια, οι τιμές του SNR μειώθηκαν. Από την ενότητα 3.2.3.2, γίνεται αντιληπτό ότι υψηλότερες τιμές SNR έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερες τιμές BER, ενώ ο ρυθμός μεταβολής του BER συναρτήσει του ηλεκτρικού SNR εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης, με το 4-PPM να έχει πιο απότομη κλίση, όπως έχει φανεί και στο Σχήμα 3.33(β) για το πυκνό κανάλι όπου δεν υπήρχε επίδραση του εύρους ζώνης του καναλιού. Η μικρή διαφορά στις τιμές SNR που εκτιμήθηκαν για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης για ίδιες ακτίνες σταγονιδίων οφείλεται στο διαφορετικό τρόπο δειγματοληψίας και φιλτραρίσματος των δύο σημάτων στο δέκτη.

Εδώ τονίζεται ότι η χρήση της συνάρτησης φάσης για την καθαρή ατμόσφαιρα όπως προέκυψε από την αριθμητική επίλυση των σχετικών ολοκληρωμάτων στην (3.31) και δόθηκε στο Σχήμα 3.37(α) είχε ως αποτέλεσμα ελαφρώς αυξημένες απώλειες σε σχέση με αυτές στο Σχήμα 3.24(α) όχι μόνο όταν θεωρήθηκε αποκλειστικά καθαρή ατμόσφαιρα όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, αλλά και όταν θεωρήθηκε ομίχλη με συγκέντρωση 50 σταγονιδίων ανά cm^3 , αλλά μόνο για τις μικρές τιμές ακτίνας r_D . Αυτό συνέβη επειδή για τις μικρές τιμές ακτίνας, οι αντίστοιχοι συντελεστές σκέδασης λόγω της ομίχλης έχουν παραπλήσιες τιμές αυτών για καθαρή ατμόσφαιρα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.24(β). Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση των συντελεστών καθαρής ατμόσφαιρας ήταν σημαντική στην στάθμιση της συνάρτησης φάσης σύμφωνα και με την (3.32). Αντίθετα, με την αύξηση της ακτίνας των σταγονιδίων ομίχλης, οι τιμές των απωλειών ακολουθούν αυτές στο Σχήμα 3.24(α), καθώς οι συντελεστές σκέδασης λόγω της ομίχλης έχουν συντριπτικά μεγαλύτερη επίδραση στη στάθμιση της συνάρτησης φάσης. Επομένως, οι απώλειες σε αυτή την υποενότητα ακολούθησαν σε συμπεριφορά ακριβώς τις απώλειες που εκτιμήθηκαν στην 3.2.4.2 με ελάχιστες τροποποιήσεις για τις μικρές ακτίνες σταγονιδίων για πυκνότητα σταγονιδίων ομίχλης 50 dr./cm^3 . Όμοια συμπεράσματα με αυτά για το Σχήμα 3.24(α) θα προέκυπταν αν υπολογίζονταν οι απώλειες με χρήση της συνάρτησης Henyey-Greenstein και της $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ από την (3.31) για την καθαρή ατμόσφαιρα και με πυκνότητα 200 dr./cm^3 αντί για 50 dr./cm^3 για την ομίχλη. Η μόνη διαφορά θα ήταν η σύγκλιση των δύο καμπυλών για την ίδια απόσταση σε μικρότερη τιμή ακτίνας σταγονιδίων λόγω των ακόμα μεγαλύτερων συντελεστών σκέδασης από την ομίχλη.



Σχήμα 3.38. Αριθμητική εκτίμηση του SNR για διαφορετικές αποστάσεις ζεύξεων ($r = 20$ και 50 m) και διαφορετικές ακτίνες σταγονιδίων λόγω ομίχλης εκκινώντας από συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας ($r_D = 0$) μέχρι την περίπτωση πολύ πυκνής ατμόσφαιρας ($r_D = 10 \mu\text{m}$), για 4-PPM και Flip-OFDM. Οι δύο συγκεντρώσεις σταγονιδίων για τις οποίες έγιναν οι εκτιμήσεις του SNR ήταν 50 και 200 dr./cm^3 .

Ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, για μία συγκεκριμένη συγκέντρωση σταγονιδίων και σε δεδομένη απόσταση, όταν εμφανίζεται ομίχλη στο μέσο, η σκέδαση υπερτερούσε έναντι της απορρόφησης και οι απώλειες εμφανίστηκαν μειωμένες αυξάνοντας το SNR. Παρόλα αυτά, το κέρδος της σκέδασης άρχισε να μετριάζεται καθώς η ακτίνα r_D αυξήθηκε εξαιτίας της πιο έντονης σκέδασης Mie που είναι σκέδαση προς τα μπρος. Δηλαδή, παρά το γεγονός ότι δεν αλλάζει σημαντικά ο παράγοντας ασυμμετρίας (g), με τη σημαντική αύξηση των συντελεστών σκέδασης Mie, αναδεικνύεται πλήρως η σκέδαση Mie εις βάρος της Rayleigh. Αυτό μπορεί να φανεί στο Σχήμα 3.37(β). Σε αυτό το σχήμα, δίνονται περιπτώσεις αθροιστικών συναρτήσεων κατανομής που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση για την παραγωγή των τυχαίων γωνιών ζενίθ ή όμοια των γωνιών σκέδασης (θ_s) ως προς την τρέχουσα κατεύθυνση διάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε στην 3.2.2.2, επειδή οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής παίρνουν τιμές στο διάστημα $[0, 1]$, από μία τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0, 1]$, προκύπτουν τα συνημίτονα $\mu_s = \cos(\theta_s)$ και κατ' επέκταση οι γωνίες σκέδασης ως προς τον άξονα διάδοσης του φωτονίου. Για καθαρή ατμόσφαιρα, η αθροιστική συνάρτηση κατανομής, που φαίνεται με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 3.37(β), έχει προκύψει από το ολοκλήρωμα μίας σταθμισμένης συνάρτησης φάσης στο οποίο οι συντελεστές σκέδασης Rayleigh και Mie έχουν παρόμοια βαρύτητα (υπενθυμίζεται ότι εκτιμήθηκαν $k_{s,Ray} = 0.237 \text{ km}^{-1}$ και $k_{s,Mie} = 0.271 \text{ km}^{-1}$). Από την (3.6) και από τη μορφή των συναρτήσεων φάσης (από το Σχήμα 3.10(α) και το Σχήμα 3.37(α)) αναμένεται ότι η ολική σταθμισμένη συνάρτηση φάσης θα έχει μία

μορφή εμπρόσθιας κατεύθυνσης, αλλά με μία σημαντική συνεισφορά της συνιστώσας λόγω σκέδασης Rayleigh. Αυτό θα σημαίνει ότι στατιστικά θα είναι σημαντικό το πλήθος των τιμών θ_s που δε θα έχουν μικρές τιμές. Δηλαδή θα έχουμε σκεδάσεις με αλλαγή κατεύθυνσης υπό μεγάλες γωνίες. Όταν θεωρηθεί ότι εισέρχεται ομίχλη στο ασύρματο μέσο με πυκνότητα 50 dr./cm^3 , τότε από τη νέα στάθμιση της συνάρτησης φάσης, προκύπτει μία αθροιστική συνάρτηση κατανομής της οποίας οι τιμές μειώνονται για $\mu_s < 0.5$ καθώς η ακτίνα των σταγονιδίων ομίχλης παίρνει τιμές από $r_D = 1 \mu\text{m}$ ως $10 \mu\text{m}$. Αυτό δικαιολογεί την ανάδειξη της σκέδασης Mie έναντι της Rayleigh και την όλο και πιο έντονα εμπρόσθια κατευθυντική συμπεριφορά της σκέδασης, καθώς όπως φάνηκε και από το Σχήμα 3.24(β), με την ίδια συγκέντρωση και μεγαλύτερες ακτίνες σταγονιδίων προκύπτουν μεγαλύτεροι συντελεστές σκέδασης. Βέβαια, αυτό δεν περιορίζει τη βελτίωση του SNR μέχρι και κάποια ακτίνα r_D , καθώς δεν παύει μεγαλύτερος συντελεστής σκέδασης να εξακολουθεί να σημαίνει περισσότερες σκεδάσεις (που είναι πιθανότερο να συμβούν κατά μήκος της ζεύξης για την κάλυψη της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη), αφού από τις θεωρήσεις στην υποενότητα 3.2.2.2, τα βήματα μετακίνησης Δs θα είναι μικρότερα. Από κάποια κρίσιμη ακτίνα και μετά, αυτή η συμπεριφορά δεν είναι ευνοϊκή για τις απώλειες και το SNR αρχίζει να μειώνεται, καθώς αυξάνεται τόσο ο συντελεστής σκέδασης όσο και απορρόφησης Mie. Ο παράγοντας απορρόφησης δεν αυξάνεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να υποβαθμίσει σημαντικά τα βάρη (w_n) ανά βήμα μετακίνησης. Η ταυτόχρονη, όμως, αύξηση των δύο παραγόντων προκαλεί και αύξηση του παράγοντα απόσβεσης (k_e) του μέσου (στον οποίο έχουν ήδη συμπεριληφθεί οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης από την καθαρή ατμόσφαιρα). Στην υποενότητα 3.2.2.2, βάσει του μοντέλου που εφαρμόστηκε [149], ο παράγοντας απόσβεσης εισέρχεται στην πιθανότητα το εκάστοτε φωτόνιο να φθάσει επιτυχώς στο δέκτη (P_n) και αυτή η πιθανότητα καθορίζει έμμεσα τη λαμβανόμενη ισχύ, ενώ αντιστρέφοντάς τη σχετίζεται με τις απώλειες του καναλιού. Υπενθυμίζεται ότι $P_n = w_n \times p_{1,n} \times p_{2,n}$, με $p_{2,n} = \exp(-k_e \times r_{n \rightarrow rec})$ να αντιστοιχεί στις απώλειες διάδοσης του φωτονίου από το n -οστό κέντρο σκέδασης όπου βρίσκεται το φωτόνιο ως το δέκτη. Με τον υπολογισμό της P_n σε κάθε βήμα (εφόσον το φωτόνιο βρίσκεται εντός του FOV του δέκτη), η ισχυρότερη σκέδαση θα οδηγήσει σε αύξηση των απωλειών.

Όταν η συγκέντρωση σταγονιδίων αυξήθηκε, τόσο ο συντελεστής σκέδασης όσο και ο συντελεστής απορρόφησης Mie αυξήθηκαν περαιτέρω. Με ίδιο εμβαδό διατομής του σταγονιδίου νερού για μία συγκεκριμένη ακτίνα, ο τετραπλασιασμός της συγκέντρωσης (από 50 dr./cm^3 σε 200 dr./cm^3) θα τετραπλασιάσει και τους σχετικούς συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης [172], σύμφωνα με τη θεώρηση σταθερής ακτίνας σταγονιδίων για κάθε περίπτωση ομίχλης που εξετάστηκε. Βάσει της ανάλυσης που μόλις παρουσιάστηκε, αναμένεται ότι οι απώλειες θα αρχίσουν να αυξάνονται για μικρότερες τιμές ακτίνων r_D . Επομένως, στην περίπτωση της υψηλότερης συγκέντρωσης, η μεγιστοποίηση του SNR και η αλλαγή στις καμπύλες με τη μετέπειτα μείωση του SNR επήλθε σε μικρότερες τιμές διαστάσεων των σταγονιδίων, όπως φαίνεται και το Σχήμα 3.38.

Όταν η απόσταση αυξήθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, οι απώλειες ήταν υψηλότερες για αραιή ατμόσφαιρα. Με τη μεγάλη πύκνωση του μέσου, παρά το γεγονός ότι με τις περισσότερες σκεδάσεις στο μέσο δύναται η ανάπτυξη ζεύξεων χωρίς οπτική επαφή, οι σκεδάσεις οδήγησαν σε ακόμα υψηλότερες απώλειες. Πιο συγκεκριμένα, είναι πιο πιθανό να σκεδαστεί ένα φωτόνιο στο μέσο με την πολύ πυκνή ομίχλη. Καλύπτοντας την απόσταση που προβλέπεται από το μοντέλο, η διάδοση επιδρά στην μείωση της πιθανότητας επιτυχούς άφιξης μέσω της απόσβεσης. Επομένως, οι αυξημένες τιμές SNR εξαιτίας της ομίχλης εμφανίστηκαν για ακόμα μικρότερες τιμές ακτίνων r_D , όπως επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 3.38.

Η μεγαλύτερη αύξηση του SNR για το μέσο με συγκέντρωση σταγονιδίων 200 dr./cm^3 , για μικρές ακτίνες μέχρι οριακά $r_D = 6 \text{ }\mu\text{m}$ για την περίπτωση των 20 μέτρων και μέχρι $r_D = 3 \text{ }\mu\text{m}$ για την περίπτωση των 50 μέτρων σε σχέση με τη συγκέντρωση των 50 dr./cm^3 για τα αντίστοιχα μεγέθη σταγονιδίων και μήκη των ζεύξεων οφείλεται στον ευνοϊκό συμβιβασμό υπέρ της επίδρασης της έντονης σκέδασης όσο οι διαστάσεις των σταγονιδίων δεν επιδρούν καθοριστικά στην ανάδειξη των χαρακτηριστικών της Mie σκέδασης σε τέτοιο βαθμό που να αυξάνονται οι απώλειες. Καθώς αυξήθηκε η τιμή της ακτίνας των σταγονιδίων, το κέρδος από τη σκέδαση Mie εξαλείφθηκε. Αυτές οι θεωρητικές εκτιμήσεις και για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης σκιαγραφούν τη συμπεριφορά ενός πυκνού περιβάλλοντος όπου θα γίνονταν εφικτές οι μεταδόσεις σημάτων χωρίς οπτική επαφή με εξασφάλιση υψηλότερου SNR μέχρι κάποιου ανώτατου επιπέδου πυκνότητας του μέσου και μέχρι κάποια μέγιστη απόσταση. Αποτελούν μία ένδειξη του τι αναμένεται για μεγάλες γωνίες ανύψωσης. Επισημαίνεται ότι η δεύτερη περίπτωση πυκνότητας ομίχλης (200 dr./cm^3) σε συνδυασμό με τις μεγάλες ακτίνες σταγονιδίων οδήγησαν σε αρκετά μεγάλες τιμές συντελεστών σκέδασης, και όγκο σταγονιδίων που αντιστοιχεί σε τιμή $200 \times 4/3 \times \pi \times (10 \text{ }\mu\text{m})^3 \approx 8.38 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$ ανά 1 cm^3 λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη τιμή σταθερής ακτίνας σταγονιδίων ομίχλης που χρησιμοποιήθηκε ($r_D = 10 \text{ }\mu\text{m}$). Αυτός ο όγκος είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που είτε έχει μετρηθεί ή εκτιμηθεί στη βιβλιογραφία, καθώς κατά πρώτον στην πραγματικότητα τα σταγονίδια δεν έχουν σταθερό μέγεθος, αλλά ακολουθούν κατανομές μεγεθών, όπως ήδη αναφέρθηκε, και κατά δεύτερον συγκεντρώσεις των 200 dr./cm^3 έχουν εμφανιστεί για μικρότερες mode τιμές ακτίνων σταγονιδίων σε ομίχλη ακτινοβολίας [175], [185]. Παρόλα αυτά είναι μία ένδειξη των αναμενόμενων τάσεων όσον αφορά τις απώλειες σε ένα πυκνό μέσο.

3.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Οι αρχικές πειραματικές μελέτες με κατώτερο μήκος κύματος τα 280 nm ξεκίνησαν τη δεκαετία του 60'. Σε αυτές τις μελέτες, ως πηγές χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες φλας ξένου (xenon flashtubes) και ως δέκτης ένας PMT. Κατά την επόμενη δεκαετία, αναπτύχθηκαν πειραματικά συστήματα στα οποία οι πηγές ήταν λάμπες υδραργύρου. Το φάσμα αυτών των πηγών έχει πολλαπλές κορυφές και μία από αυτές είναι στα 254 nm περίπου [138], [15]. Βελτιωμένες ως προς την απόδοση λάμπες υδραργύρου που λειτουργούν ως μικροβιοκτόνες πηγές φωτός έχουν ως βασικό μήκος κύματος εκπομπής τα 254 nm, 253.7 nm για την ακρίβεια, και έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πρωτοτύπων για την αποτίμηση της δυνατότητας χρήσης τέτοιων πηγών για ασύρματες οπτικές μεταδόσεις στη UV-C μπάντα. Τέτοιες πηγές διαμορφώνονταν άμεσα, αλλά εισάγονται σοβαροί περιορισμοί από τη χρήση τους που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση της θερμοκρασίας τους και τη σταθεροποίηση της διαδικασίας εκκένωσης μέσω της συνεχούς παροχής ρεύματος [186]. Ακόμα και την τρέχουσα δεκαετία πολλά πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση πηγών laser Nd:YAG με μήκος κύματος εκπομπής στα 1064 nm, αλλά με τετραπλασιασμό της συχνότητας οι μεταδόσεις γίνονται στα 266 nm [138] με κύριο στόχο την κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων. Οι προηγούμενοι τύποι πηγών είναι σχετικά ογκώδεις, μη αποδοτικοί ενεργειακά και έχουν πολύ περιορισμένο εύρος ζώνης. Το πρόγραμμα Semiconductor UV Optical Source (SUVOS) χρηματοδοτήθηκε από την DARPA, ώστε να αναπτυχθούν ημιαγωγικές πηγές στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα. Ξεκίνησε το 2002 και ολοκληρώθηκε το 2006 και το αποτέλεσμα ήταν η ανάπτυξη ημιαγωγικών πηγών, μικρού μεγέθους, χαμηλής ισχύος, υψηλής αξιοπιστίας, υψηλού εύρους ζώνης και με μία δυναμική πτώσης του κόστους τους. Οι ημιαγωγικές πηγές είναι ασύμφωνης ακτινοβολίας, πρόκειται δηλαδή για LEDs, και είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμες. Τα προσφερόμενα μήκη κύματος καλύπτουν το τμήμα της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας από 255 nm και πάνω, ενώ υπάρχουν και LEDs που καλύπτουν μήκη κύματος στις UV-

B/UV-A μπάντες. Σε γενικές γραμμές, η εκπεμπόμενη ισχύς μεμονωμένων LEDs παραμένει χαμηλότερη των LEDs στο υπέρυθρο φάσμα.

Το δεύτερο τμήμα της ζεύξης είναι ο δέκτης. Κρίσιμο τμήμα του είναι αυτό που θα μετατρέψει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, δηλαδή ο φωτοφωρατής. Χαρακτηριστικά του φωτοφωρατή είναι η ενεργός επιφάνειά του, η ευαισθησία του στην επιθυμητή περιοχή μηκών κύματος, η απόρριψη των μη επιθυμητών μηκών κύματος και το ρεύμα σκότους. Δύο τυπικές μορφές φωτοφωρατών των οποίων η χρήση ενδείκνυται για την περιοχή μεταξύ 200 και 280 nm είναι οι PMTs και οι Φωτοδίοδοι Χιονοστιβάδας (APDs). Οι PMTs, όπως έχει ήδη περιγραφεί, έχουν πολύ καλά χαρακτηριστικά κέρδους, που μπορεί να φθάνει και το 10^7 , και χαμηλό ρεύμα σκότους. Μπορεί να έχουν μεγάλη ενεργό επιφάνεια και σε συνδυασμό με τα προηγούμενα χαρακτηριστικά είναι ιδανικοί για τη φώραση ιδιαίτερα ασθενών σημάτων σε επίπεδο μέτρησης φωτονίων. Ωστόσο, στη συμβατική τους εκδοχή, οι PMTs είναι εύθραυστοι και σχετικά ογκώδεις (σε σχέση με τις APDs). Το σχετικά προσιτό κόστος τους και οι ικανοποιητικές επιδόσεις όταν συνδυαστούν με κατάλληλο οπτικό φίλτρο διατηρούν τους PMTs στην πρώτη επιλογή για την ανάπτυξη πειραματικών διατάξεων στην περιοχή μεταξύ 200 και 280 nm ακόμα και σήμερα, παρά τα μειονεκτήματά τους. Από την άλλη, σκοπός ήταν η ανάπτυξη συμπαγών δεκτών με καλές επιδόσεις και μικρό κόστος και πιο συγκεκριμένα η στόχευση ήταν σε ηλιακά τυφλές APDs. Στα πλαίσια του προγράμματος Deep Ultraviolet Avalanche Photodetector (DUVAP) της DAPRA που ξεκίνησε το 2007 αναπτύχθηκαν APDs. Τέτοιες μεμονωμένες APDs έγιναν εμπορικά διαθέσιμες, αλλά έχουν πολύ μικρή επιφάνεια, ενώ σε γραμμική λειτουργία (linear mode) δε μπορούν να πετύχουν το κέρδος των τυπικών PMTs. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές APDs για να πετύχουν παρόμοιες επιδόσεις με τους PMTs σε σχετικά χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων, αυξάνοντας ταυτόχρονα το κόστος του συστήματος. Αξίζει βέβαια να αναφερθεί ότι στα πλαίσια του προγράμματος DUVAP πρόσθετος στόχος ήταν η ανάπτυξη APDs σε διάταξη (array) στο ίδιο υπόστρωμα και σε καθεστώς λειτουργίας Geiger (Geiger mode). Με χρήση κατάλληλου υλικού, διατάξεις από APDs σε συνδυασμό με ένα οπτικό φίλτρο μπορούν να αποτελέσουν ανταγωνιστική επιλογή των PMTs στο άμεσο μέλλον. Υλικά που εξετάστηκαν στα πλαίσια του προγράμματος DUVAP ήταν το καρβίδιο του πυριτίου (Silicon Carbide – SiC) και το AlGaN (Aluminium Gallium Nitride) [15]. Επικρατέστερο είναι το SiC. Σε συντομία, μία APD σε λειτουργία Geiger μπορεί να αποδώσει μεγαλύτερο κέρδος από ότι σε συμβατική λειτουργία. Πολώνοντας ανάστροφα μία APD με τάση μεγαλύτερη (σε απόλυτη τιμή) από την τάση κατάρρευσης (break-down voltage), όταν ένα φωτόνιο μετατραπεί σε ηλεκτρόνιο και το τελευταίο εισέλθει στην περιοχή χιονοστιβάδας, η περιοχή χιονοστιβάδας καταρρέει και η APD γίνεται αγωγός [187]. Η ροή ρεύματος που παράγεται είναι μεγάλη με αποτέλεσμα και το κέρδος να είναι μεγάλο αφού η ροή ρεύματος θα έχει προέλθει από ένα ηλεκτρόνιο. Αυτή η ροή ρεύματος εμφανίζεται ως ένας παλμός στην έξοδο. Προφανώς, αυτή η λειτουργία από μόνη της δεν είναι χρήσιμη, και μετά την κατάρρευση η APD θα πρέπει να επανέλθει στην προηγούμενη κατάσταση. Με κατάλληλο κύκλωμα, η τάση στην APD (μετά την πυροδότηση της κατάρρευσης) μπορεί να πέσει κάτω από την τάση κατάρρευσης. Έπειτα, μέσω της ενσωμάτωσης κατάλληλου διακόπτη στο κύκλωμα, η APD θα επανέλθει στην προηγούμενη κατάσταση πριν την νέα πρόσπτωση φωτονίου ή φωτονίων και ταυτόχρονα, με ανάστροφη τάση πόλωσης μεγαλύτερη από την τάση κατάρρευσης [188]. Αυτός ο κύκλος κατάρρευσης και επαναφοράς λέγεται Geiger τρόπος λειτουργίας. Ο χρόνος επαναφοράς μπορεί να μειωθεί με κατάλληλη κατασκευή του κυκλώματος στο οποίο είναι συνδεδεμένη η APD. Ένας περιορισμός που εμφανίζεται είναι ότι στο χρονικό διάστημα μεταξύ της «πυροδότησης» της κατάρρευσης της APD και της επαναφοράς της, η APD είναι «τυφλή» στην άφιξη πρόσθετων φωτονίων και δεν είναι δυνατό να καθοριστεί αν η πυροδότηση έγινε από ένα ή από περισσότερα φωτόνια που προσέπεσαν στη φωτοδίοδο. Με μία διάταξη από

APDs σε λειτουργία Geiger συνδεδεμένες παράλληλα μπορεί να ξεπεραστεί ο περιορισμός που αναφέρθηκε κάνοντας δυνατή τη διάκριση της άφιξης πολλαπλών φωτονίων από την άφιξη μεμονωμένου φωτονίου. Η έξοδος της διάταξης είναι το άθροισμα των εξόδων των APDs. Όταν αφιχθούν πάνω από δύο φωτόνια σε χρονικό διάστημα μικρότερο από το χρόνο επαναφοράς των APDs και αυτά μετατραπούν σε φωτοηλεκτρόνια από διαφορετικές APDs, οι παλμοί θα αθροιστούν δίνοντας ύψος ενός παλμού στην έξοδο που θα αντιστοιχεί στο πλήθος των φωτοηλεκτρονίων, καθώς ο παλμός στην έξοδο είναι υπέρθεση των παλμών από καθεμία APD. Βέβαια, αν περισσότερα φωτόνια προσπέσουν σε μία APD και πάλι δε θα γίνει αντιληπτό το πλήθος που προσέπεσε σε καθεμία APD χειροτερεύοντας τη γραμμικότητα της εξόδου της διάταξης. Επιπλέον, ο θόρυβος στη διάταξη των APDs σε Geiger λειτουργία παραμένει μεγαλύτερος αντίστοιχων PMTs.

Δεδομένων των δυνατοτήτων και των εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών στο τμήμα της εκπομπής και της λήψης, χρησιμοποιήθηκαν πηγές ασύμφωνης ακτινοβολίας και καθεμία πηγή ήταν πολλαπλά LED chips, ενώ στο τμήμα της λήψης χρησιμοποιήθηκε PMT με κατάλληλο οπτικό φίλτρο για απόρριψη της μη επιθυμητής ακτινοβολίας. Επιπλέον, χαλαρώνοντας την απαίτηση μετάδοσης αυστηρά χωρίς οπτική επαφή, χρησιμοποιήθηκε μία και μόνο φωτοδίοδος pin από υλικό SiC για μετρήσεις σε εξωτερικό και εσωτερικό περιβάλλον.

Όσον αφορά τις απώλειες σε ζεύξη σημείου-προς-σημείο, πραγματοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος μετρήσεων για αποστάσεις μέχρι 20 μέτρα, για διάφορες γωνίες ανύψωσης του πομπού (UV-LEDs) και του δέκτη (PMT) και για διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες για τον χαρακτηρισμό του εκάστοτε καναλιού. Το ίδιο σύστημα πομπού-δέκτη με μικρές τροποποιήσεις χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση σημάτων. Οι επιδόσεις του τηλεπικοινωνιακού συστήματος που δομήθηκε εκτιμήθηκαν για το ίδιο εύρος αποστάσεων και γωνιών ανύψωσης για το οποίο υπολογίστηκαν οι απώλειες μεταδίδοντας σήματα διαμορφωμένα κατά ένα παλμικό σχήμα διαμόρφωσης και κατά ένα σχήμα διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων. Οι ρυθμοί που εφαρμόστηκαν ήταν μέχρι 10 kbit/s. Η αξιολόγηση των μεταδόσεων πραγματοποιήθηκε και για διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η τελευταία ομάδα αποτελεσμάτων με αντικατάσταση του PMT από τη φωτοδίοδο SiC σε συνδυασμό με ένα πρόσθετο φακό ήταν πιο περιορισμένη και περιλάμβανε μετρήσεις απωλειών και επιδόσεων των μεταδόσεων σημάτων σε εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον. Στις εξωτερικές μεταδόσεις εξετάστηκε και η επίδραση της αλλαγής των ατμοσφαιρικών συνθηκών.

3.3.1 Χαρακτηριστικά καναλιού όσον αφορά τις απώλειες

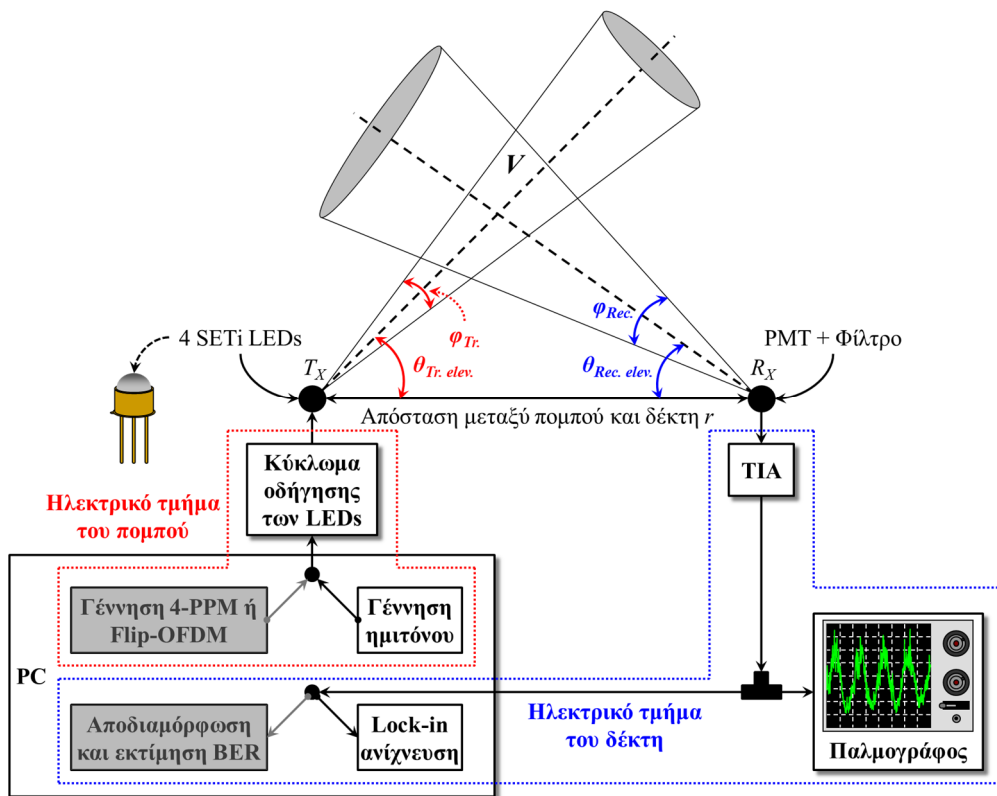
Μία από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους στα ασύρματα συστήματα οπτικών επικοινωνιών που λειτουργούν σε καθεστώς μη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη είναι οι απώλειες. Αυτές έχουν εκτιμηθεί πειραματικά για διάφορες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη τόσο για μικρές [179], όσο και μεγάλες αποστάσεις [169].

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους, οι απώλειες ισχύος για την περίπτωση των καναλιών χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη στη μπάντα μεταξύ 200 και 280 nm είναι αποτέλεσμα του συμβιβασμού μεταξύ σκέδασης και απορρόφησης. Υπό συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες (πχ παρουσία ομίχλης μέχρι κάποια όρια πυκνότητας), η σκέδαση υπερνικά την επίδραση της απορρόφησης, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών για το κανάλι χωρίς οπτική επαφή. Παρά το ότι η ευνοϊκή επίδραση της σκέδασης έχει προβλεφθεί και περιγραφεί αριθμητικά στη διεθνή βιβλιογραφία [150], [189], δεν έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά με συστηματικό τρόπο. Πχ οι πειραματικές μετρήσεις στην [168] έδειξαν υπό συνθήκες μία δυναμική αύξησης του πλήθους των αφικνόμενων φωτονίων στο δέκτη που χρησιμοποιήθηκε όταν στην ατμόσφαιρά εισέρχονταν μικροσωματίδια με τεχνητό

τρόπο, αλλά δε μπορούν να βγουν ασφαλή συμπεράσματα καθώς οι μετρήσεις είχαν πολύ μεγάλη διακύμανση ή εμφανιζόταν ακόμα και αύξηση των απωλειών σε κάποιες περιπτώσεις εμφάνισης περισσότερων σκεδαστών στο μέσο για μικρή αύξηση των αποστάσεων καλύπτοντας 20 μέτρα.

Το κενό που καλύπτει η παρούσα ενότητα με τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν είναι η συστηματική επιβεβαίωση της σημαντικής μείωσης των απωλειών του ασύρματου καναλιού όταν οι μεταδόσεις γίνονται στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα υπό την παρουσία (τεχνητής) ομίχλης. Οι μετρήσεις, οι οποίες ελήφθησαν για διάφορους γεωμετρικούς σχηματισμούς των ζευξέων πομπού και δέκτη (με ρύθμιση των αποστάσεων και των γωνιών ανύψωσης) είναι σε συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα για τις κατά προσέγγιση αντίστοιχες ατμοσφαιρικές συνθήκες στο κανάλι.

Σχετικά με τη ζεύξη πομπού και δέκτη που χρησιμοποιήθηκε, θα παρουσιαστεί το ενιαίο σχήμα που περιλαμβάνει τη μέτρηση των απωλειών και του ρυθμού σφαλμάτων bits, επειδή υπάρχει ένα σημαντικό τμήμα που είναι κοινό και στις δύο περιπτώσεις. Η πλήρης πειραματική διάταξη ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση είτε των απωλειών είτε του ρυθμού σφαλμάτων bits χωρίς να χρειάζεται να συνδεθεί κάποια πρόσθετη διάταξη, αφού τα απαραίτητα σήματα παράγονταν από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η ανάλυση σε αυτή την υποπαράγραφο θα επικεντρωθεί στις μετρήσεις των απωλειών, ενώ σε επόμενη παράγραφο θα γίνει αναφορά στο ίδιο σχήμα αυτής της υποπαράγραφου και θα αφορά το τμήμα των μετρήσεων για την εκτίμηση του ρυθμού σφαλμάτων bits.



Σχήμα 3.39. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση των απωλειών και των επιδόσεων των σημάτων.

Οι απώλειες μετρήθηκαν για διάφορες γωνίες ανύψωσης τόσο του πομπού ($\theta_{Tr. elev.}$) όσο και του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$), καθώς και για διάφορες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη (baseline range r), σύμφωνα με την πειραματική διάταξη της ζεύξης που φαίνεται στο Σχήμα 3.39. Ο πομπός αποτελούνταν από τέσσερις LEDs που εξέπεμπαν στα 265nm – UVCLEAN Lamps από τη Sensor Electronic Technology, Inc. (SETi) με μέγιστη ονομαστική οπτική ισχύ εξόδου σχεδόν ίση με 5 mW για καθεμία – με ένα

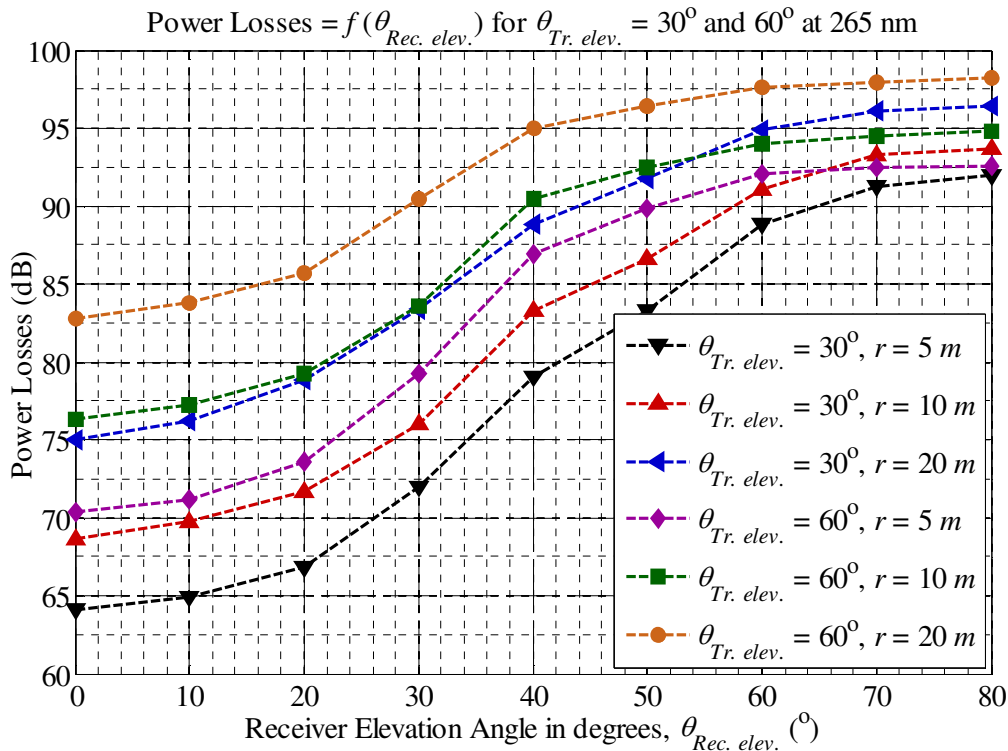
ημισφαιρικό φακό (ολοκληρωμένο) μπροστά από καθεμία πηγή [190]. Η κατασκευή τους βασίζεται σε ημιαγωγικό υλικό AlGaIn. Το φασματικό εύρος καθεμίας LED στο οπτικό επίπεδο είναι περίπου 11.5 nm. Η γωνία απόκλισης ($\varphi_{Tr.}$) των LEDs είναι περίπου 10° . Το FOV του δέκτη ($\varphi_{Rec.}$) είναι περίπου 30° . Ένα ημιτονικό σήμα με συχνότητα 1 kHz παραγόταν από ηλεκτρονικό υπολογιστή (PC στο Σχήμα 3.39) (χρησιμοποιώντας το Simulink) στο ηλεκτρικό επίπεδο και διαμορφωνόταν η φωτεινή ένταση των τεσσάρων LEDs του πειράματος. Το σήμα περνούσε στις LEDs μέσω της θύρας line-out της κάρτας ήχου του υπολογιστή. Όλες οι πηγές ήταν πολωμένες στο ίδιο σημείο λειτουργίας και γύρω από μία τιμή, τέτοια ώστε να εκπέμπεται οπτική ισχύς λίγο κάτω από 1 mW από καθεμία LED. Επιπλέον, δόθηκε βαρύτητα στην αποφυγή θεμάτων μη γραμμικής λειτουργίας των πηγών.

Ο δέκτης αποτελούνταν από ένα PMT, τον R7154 της Hamamatsu με αποκρισιμότητα $\mathfrak{R} = 0.06$ A/W στα 265 nm [167], με ένα οπτικό φίλτρο με απόκριση (transmittance) περίπου ίση με 0.17 μπροστά από αυτόν. Το οπτικό εύρος ζώνης του φίλτρου έχει ονομαστική τιμή 10 nm. Όσον αφορά πιθανές επιδράσεις αλλαγών της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στο κέρδος και την αποκρισιμότητα του PMT, εφαρμόστηκαν οι μαθηματικές σχέσεις της παραγράφου Π.6 του παραρτήματος για τη διόρθωση του κέρδους και της αποκρισιμότητας σε σχέση με τις ονομαστικές τιμές που δίνονται για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας από τον κατασκευαστή. Αυτές οι αλλαγές ενσωματώθηκαν στο πρόγραμμα Simulink ώστε να φαίνονται σε πραγματικό χρόνο οι τιμές κέρδους και αποκρισιμότητας του φωτοπολλαπλασιαστή. Μετά τη φώραση, στο ηλεκτρικό επίπεδο, ο PMT ακολουθείται από ένα ενισχυτή διαγωγιμότητας (Trans-Impedance Amplifier – TIA) με αντίσταση ανάδρασης $R_{TIA} = 2$ MΩ. Η συζευγμένη κατά AC έξοδος (AC coupled output) του TIA ήταν δυνατό να τροφοδοτηθεί σε ένα ενισχυτή εγκλειδωσης (lock-in amplifier) δομημένο ως λογισμικό ή να περαστεί σε ένα παλμογράφο. Το λαμβανόμενο ηλεκτρικό σήμα εισερχόταν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω της θύρας line-in της κάρτας ήχου του υπολογιστή. Μετά την ανίχνευση με το lock-in ενισχυτή, το επιθυμητό ημιτονικό σήμα μπορεί να εξαχθεί και να αξιοποιηθεί. Η μέση τιμή του πλάτους του επιθυμητού ημιτονικού σήματος εκτιμάται σε μία τιμή τάσης. Έπειτα διαιρείται με την τιμή του R_{TIA} ώστε να μετατραπεί σε μία τιμή ρεύματος. Η επίδραση του κέρδους του PMT αφαιρείται με τη διαίρεση του ρεύματος με την τιμή του κέρδους ($Gain_{PMT}$). Διαιρώντας στη συνέχεια με την αποκρισιμότητα του PMT στα 265 nm και με την απόκριση του φίλτρου, μπορεί να αποκτηθεί το επίπεδο της οπτικής ισχύος που φθάνει στο δέκτη και αφορά την τιμή κορυφής του ημιτόνου στο οπτικό επίπεδο. Η τιμή της στιγμιαίας οπτικής ισχύος κορυφής του ημιτόνου κατά τη μετάδοση χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την λαμβανόμενη οπτική ισχύ κορυφής, ώστε να εκτιμηθούν οι απώλειες της οπτικής ισχύος λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις απώλειες του ασύρματου μέσου. Οι αποστάσεις που εξετάστηκαν για τη ζεύξη ήταν 5, 7, 10 και 20 μέτρα. Η διαφορά της διαδικασίας που περιγράφηκε από τις άλλες που έχουν συμπεριληφθεί στη διεθνή βιβλιογραφία είναι το τμήμα του lock-in ενισχυτή, αντί για τον μετρητή φωτονίων που συνήθως συναντάται μετά τον PMT ([151], [169], [179]). Τα τμήματα της πειραματικής διάταξης που δεν περιγράφηκαν αφορούν τη γέννηση (στο ηλεκτρικό τμήμα του πομπού) και την αποδιαμόρφωση και φώραση των σημάτων (στο ηλεκτρικό τμήμα του δέκτη). Αυτά παρέμειναν αδρανιστοποιημένα σε αυτή την ομάδα μετρήσεων, φαίνονται αχνά στο Σχήμα 3.39 και θα περιγραφούν κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα σχήματα διαμόρφωσης που εξετάστηκαν.

* Εδώ ο όρος απόδιαμόρφωση χρησιμοποιείται καταχρηστικά καθώς η μετατροπή από το οπτικό στο ηλεκτρικό επίπεδο [158] έχει ήδη γίνει από τον PMT. Ωστόσο, περιλαμβάνει την υπόλοιπη διαδικασία ανάκτησης του σήματος [163] η οποία εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης που εφαρμόστηκε. Έπειτα ακολουθεί η διαδικασία απόφασης και εκτίμησης του ρυθμού σφαλμάτων bits. Επιπλέον, υπάρχουν περιπτώσεις στη διεθνή βιβλιογραφία που δεν υπάρχει ξεκάθαρος διαχωρισμός αποδιαμόρφωσης και φώρασης [138], [186].

Για τις περιπτώσεις αποστάσεων 7, 10 και 20 μέτρων, χρησιμοποιήθηκε μία μηχανή παραγωγής ομίχλης για την τεχνητή τροποποίηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις ένα εμπόδιο ύψους και πλάτους 1.83 μέτρων τοποθετήθηκε στη μέση της εκάστοτε υπό εξέταση ζεύξης ώστε να εμποδίσει οποιαδήποτε πιθανή συνιστώσα οπτικής επαφής. Το μοντέλο μηχανής ομίχλης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Scenic Fog Machine 1200. Η μηχανή παράγει στην έξοδό της ομίχλη με ρυθμό 560 m³/min [191], με τυπικές τιμές διαμέτρων σωματιδίων μεταξύ 1 και 10 μm [192]. Η μηχανή τοποθετούνταν στο μέσο της εκάστοτε ζεύξης, αλλά γινόταν προσπάθεια να καλυφθεί όσο το δυνατό περισσότερος όγκος και όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφα. Η ομοιόμορφη μεταβολή της πυκνότητας του μέσου με τη χρήση της μηχανής δεν ήταν εύκολο να επιτευχθεί ικανοποιητικά πάντα, λόγω της αστάθειας του μέσου. Αυτό έγινε εντονότερο σε ζεύξεις μήκους 20 μέτρων όπως θα φανεί και πιο κάτω. Ακόμα και υπό αυτό το μειονέκτημα, θα φανεί καθαρά ότι η επικράτηση της σκέδασης έναντι της απορρόφησης όταν η ατμόσφαιρα έγινε πυκνότερη. Αυτή η συμπεριφορά επιβεβαιώθηκε για πλήθος γωνιών ανύψωσης και αποστάσεων μεταξύ πομπού και δέκτη είτε πρόκειται για μέτρηση απωλειών είτε πρόκειται για εκτίμηση του ρυθμού σφαλμάτων bits, όπως θα παρουσιαστεί στην επόμενη υποενότητα.

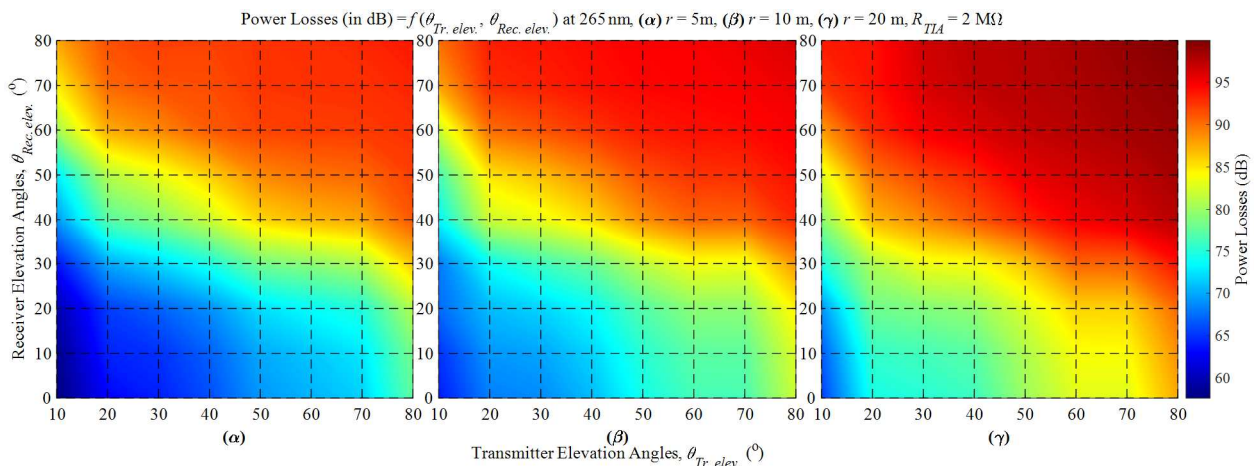
Μετά την περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ζεύξεων χωρίς οπτική επαφή, οι απώλειες για αποστάσεις 5, 10 και 20 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη δίνονται στο Σχήμα 3.40, σαν συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) για γωνία ανύψωσης πομπού ίση με $\theta_{Tr. elev.} = 30^\circ$. Εν γένει, οι απώλειες αυξάνονται με την αύξηση της $\theta_{Rec. elev.}$ και την αύξηση της απόστασης. Στο ίδιο σχήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για γωνία ανύψωσης πομπού ίση με $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$. Αξίζει να αναφερθεί ότι παρά την παρόμοια συμπεριφορά των απωλειών συναρτήσει των γωνιών ανύψωσης του δέκτη για τις δύο περιπτώσεις γωνιών ανύψωσης του πομπού, το εύρος των τιμών των απωλειών* είναι μικρότερο για την μεγαλύτερη γωνία ανύψωσης [179].



Σχήμα 3.40. Απώλειες ισχύος στα 265 nm, όταν η γωνία ανύψωσης του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) κυμαίνεται μεταξύ 0° και 80° , για γωνία ανύψωσης πομπού ίση με $\theta_{Tr. elev.} = 30^\circ$ και 60° . Οι απώλειες μετρήθηκαν για μήκη ζεύξης 5, 10 και 20 μέτρα.

* Η διαφορά της μικρότερης από τη μεγαλύτερη τιμή.

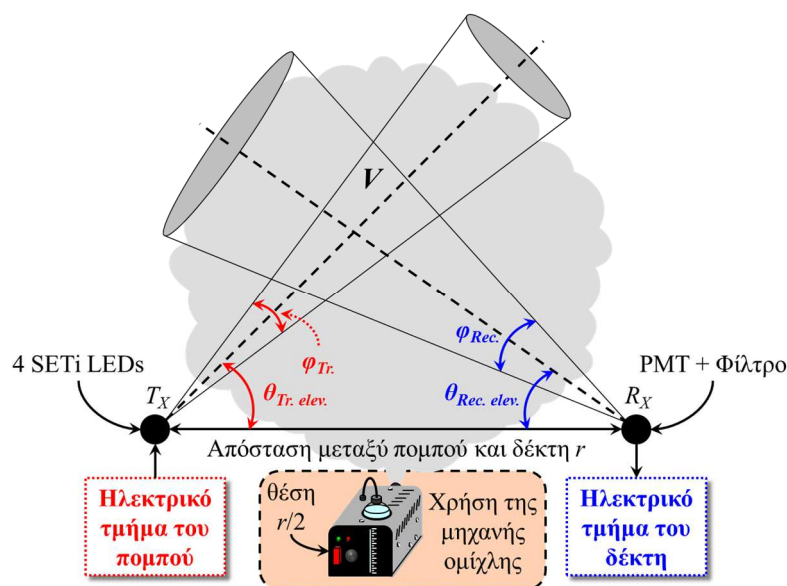
Οι απώλειες ισχύος δίνονται στο Σχήμα 3.41 σε γεμισμένα περιγράμματα για (α) 5, (β) 10 και (γ) 20 μέτρα απόστασης πομπού-δέκτη για όλους τους συνδυασμούς γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη που εφαρμόστηκαν. Οι γωνίες ανύψωσης του πομπού κυμαίνονται από 10° ως 80° , ενώ οι αντίστοιχες γωνίες για το δέκτη βρίσκονται μεταξύ των γωνιών 0° και 80° . Και για τις τρεις αποστάσεις χρησιμοποιήθηκε η ίδια κλίμακα χρωμάτων ώστε να δοθεί μία σαφής εικόνα της αύξησης των απωλειών με την απόσταση. Επιπλέον, ο κατακόρυφος άξονας είναι ίδιος και για τα τρία διαγράμματα. Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες μετρήθηκαν κάτω από 60 dB μόνο για ζεύξεις με συνιστώσες ακτινοβολίας από οπτική επαφή, ακόμα και για την περίπτωση ζεύξης μήκους 5 μέτρων (Σχήμα 3.41(α)). Εστιάζοντας σε μήκος ζεύξης 10 μέτρων, φαίνεται ότι όσο οι γωνίες ανύψωσης αυξάνονται, το αποτέλεσμα στο δέκτη της ζεύξης είναι να «φθάνουν» μόνο συνιστώσες από διάχυτη μετάδοση χωρίς οπτική επαφή, πχ πάνω από γωνία ανύψωσης 40° τόσο του πομπού όσο και του δέκτη, οι απώλειες ξεπερνούν τα 80 dB, ακόμα και για τη μικρή απόσταση των 10 μέτρων. Αυτό διακρίνεται από τα όρια που τίθενται από τα περιγράμματα κίτρινου χρώματος που αντιστοιχούν σε απώλειες μεγαλύτερες από 80 dB. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των απωλειών για 20 μέτρα ζεύξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.41(γ). Οι απώλειες των 80 dB μετρήθηκαν για ακόμα μικρότερες γωνίες ανύψωσης από ότι για τα 10 μέτρα, όπως ήταν αναμενόμενο. Παραμένοντας στα 20 μέτρα, για γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη πάνω από 40° , οι απώλειες είναι μεγαλύτερες από 90 dB. Για ζεύξεις με αποστάσεις 10 και 20 μέτρων, για πολύ υψηλές γωνίες ανύψωσης του πομπού, πχ πάνω από 60° , η αύξηση των απωλειών γίνεται ομαλότερη και ο ρυθμός αύξησής τους μικραίνει. Πιο συγκεκριμένα, σταθεροποιώντας τη γωνία ανύψωσης του πομπού πχ στις 70° στα 20 μέτρα, βλέπουμε ότι οι απώλειες κυμαίνονται σε ένα εύρος μικρότερο από 17 dB από τη μικρότερη ως τη μεγαλύτερη τιμή για τις γωνίες ανύψωσης του δέκτη που εξετάστηκαν (περίπου από 82.78 dB μέχρι 99.10 dB). Αντίθετα, για γωνία ανύψωσης πομπού 10° στα 20 μέτρα, οι απώλειες που προέκυψαν για τις αντίστοιχες γωνίες ανύψωσης του δέκτη αυξάνονται από περίπου 65.52 dB για $\theta_{Rec. elev.} = 0^\circ$ σε κάτι λιγότερο από 93.50 dB για $\theta_{Rec. elev.} = 80^\circ$. Η ίδια συμπεριφορά φαίνεται και στις πολύ υψηλές γωνίες ανύψωσης του δέκτη. Την ίδια τάση μπορεί να παρατηρήσει κανείς και στις μετρήσεις στο Σχήμα 3.40, όπου ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ελαττώνεται για τη μεγάλη γωνία ανύψωσης του πομπού $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$.



Σχήμα 3.41. Απώλειες οπτικού καναλιού στα 265 nm, με τη $\theta_{Tr. elev.}$ στον οριζόντιο άξονα να κυμαίνεται μεταξύ 10° και 80° και με τη $\theta_{Rec. elev.}$ στον κατακόρυφο άξονα να κυμαίνεται μεταξύ 0° και 80° . Οι αποστάσεις κάλυψης ήταν (α) 5, (β) 10 και (γ) 20 μέτρα, αντίστοιχα.

Οι προηγούμενες μετρήσεις ελήφθησαν υπό το καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας, δηλαδή σε ένα περιβάλλον αραιό σε σκεδαστές. Ένα περιβάλλον «πυκνό» σε σκεδαστές αναμένεται να αποδίδει μειωμένες απώλειες σαν ασύρματο μέσο θεωρώντας μήκη κύματος μεταξύ 200 και 280 nm. Για την σκόπιμη πύκνωση του μέσου,

χρησιμοποιήθηκε η μηχανή ομίχλης που προαναφέρθηκε. Σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 3.2.4.2, αναμένεται ότι για μικρού μήκους ζεύξεις σαν αυτές που εξετάστηκαν πειραματικά (< 50 μέτρα), οι απώλειες θα μειωθούν υπό την ύπαρξη ομίχλης.

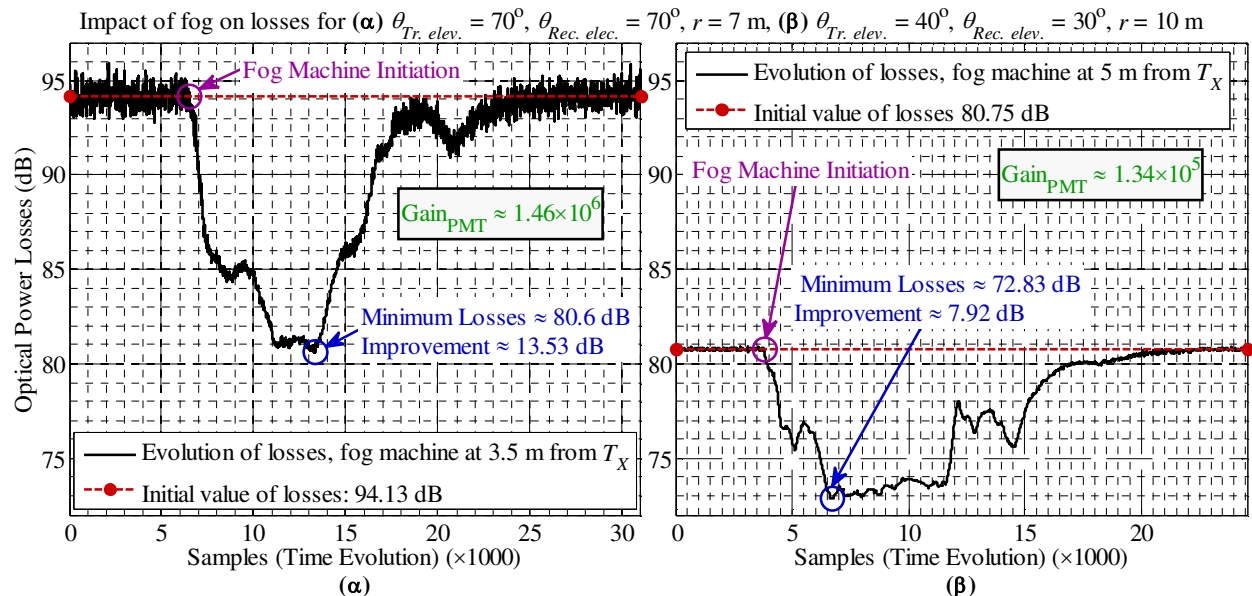


Σχήμα 3.42. Πειραματική διάταξη με την προσθήκη της μηχανής παραγωγής ομίχλης. Ισχύουν όσα αναφέρονται στο Σχήμα 3.39.

Για τη σειρά των πειραμάτων με την εμφάνιση ομίχλης, στο Σχήμα 3.39 δεν τροποποιήθηκαν τα άκρα της πειραματικής διάταξης, αλλά προστέθηκε η μηχανή ομίχλης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.42. Υπό αυτή τη διεύθυνση της ζεύξης υπό την παρουσία της μηχανής παραγωγής ομίχλης έγιναν οι μετρήσεις όταν αυτή λειτουργούσε για τις διάφορες περιπτώσεις γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη, καθώς και για διάφορες αποστάσεις πομπού και δέκτη. Όμοια ήταν η θέση της όταν χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της επίδρασης της ομίχλης στις επιδόσεις των μεταδιδόμενων σημάτων. Αυτό το σημείο θα αναλυθεί καλύτερα σε επόμενη σχετική υποενότητα, αλλά θα γίνεται αναφορά στο ίδιο ακριβώς σχήμα. Παρά το γεγονός ότι στο υλικό του πομπού και του δέκτη δεν έγιναν αλλαγές, στο λογισμικό έγιναν ελάχιστες αλλαγές. Πιο συγκεκριμένα, ο ενισχυτής lock-in τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να συγκλίνει γρήγορα. Αρχικά, χρησιμοποιώντας τις ίδιες πηγές με πριν, έγινε μετάδοση στα 265 nm ύστερα από διαμόρφωση του φέροντος κύματος με ένα ημίτονο συχνότητα 1 kHz και ο lock-in ενισχυτής μπήκε σε καθεστώς σύγκλισης. Μετά τη σύγκλιση, τέθηκε σε λειτουργία η μηχανή παραγωγής ομίχλης και εξετάστηκε η επίδραση της εμφάνισης ομίχλης στο μέσο μέχρι τη διακοπή της μηχανής. Μετά τη διακοπή της μηχανής παραγωγής ομίχλης, ο δέκτης αφήθηκε να συγκλίνει ξανά στην αρχική τιμή των απωλειών. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε σε κάθε περίπτωση επαναχρησιμοποίησης της μηχανής στην ίδια ζεύξη, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι οι αλλαγές δεν ήταν τυχαίες και οι βελτιώσεις θα επανεμφανίζονταν. Επιπλέον, η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για καθεμία γεωμετρική διάταξη πομπού και δέκτη που δοκιμάστηκε. Σε όλα τα παραδείγματα που θα παρουσιαστούν έχει δοθεί προσοχή ώστε να μην μπει στον κόρο ο δέκτης αν σε κάποια περίπτωση η μείωση των απωλειών ήταν μεγάλη. Επιπροσθέτως, το πυκνότερο μέσο ήταν γενικά πιο ασταθές, καθώς η ομίχλη μπορούσε να διαλυθεί σε περίπτωση εμφάνισης ριπής ανέμου. Επομένως, δόθηκε η απαραίτητη προσοχή κατά τη χρήση της μηχανής, ώστε να «γεμίζει» το μέσο όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια της άπνοιας. Το λαμβανόμενο σήμα και οι απώλειες καταγράφονταν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας που περιλάμβανε την αρχική σύγκλιση, την έναρξη της λειτουργίας της μηχανής ομίχλης, την

πύκνωση του ασύρματου μέσου, τη διάλυση της ομίχλης, τη σύγκλιση του δέκτη στις αρχικές απώλειες.

Στο Σχήμα 3.43(α), παρουσιάζεται ένα σετ συνεχόμενων μετρήσεων που δείχνουν την εξέλιξη των οπτικών απωλειών σε συνάρτηση του χρόνου, συμπεριλαμβάνοντας την ενεργοποίηση της μηχανής παραγωγής ομίχλης, για γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη ίσες με 70° και για απόσταση 7 μέτρων. Τονίζεται ότι έχει ήδη επέλθει η σύγκλιση στο στάδιο της ανίχνευσης με τη χρήση του lock-in ενισχυτή. Το κέρδος του PMT ($Gain_{PMT}$) ήταν περίπου ίσο με 1.46×10^6 . Το διάστημα μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων-δειγμάτων στο σχήμα ήταν 5 ms. Πιο συγκεκριμένα, κάθε δείγμα της καμπύλης των απωλειών έχει προκύψει από υπολογισμούς σε πέντε διαδοχικές περιόδους του ημίτονου του 1 kHz. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 192 kHz και σε πέντε διαδοχικές περιόδους αντιστοιχούν $192 \times 5 = 960$ σημεία από το ημίτονο. Ωστόσο, στο δέκτη γίνεται υπο-δειγματολήπτηση (down-sampling) κατά 1/8 και τελικά, μετά από επεξεργασία 120 σημείων προκύπτει ένα δείγμα απωλειών στο Σχήμα 3.43(α). Η μέση τιμή των απωλειών μετά την αρχική σύγκλιση του lock-in ενισχυτή ήταν περίπου 94.13 dB. Μετά από 6500 δείγματα, ξεκίνησε η παραγωγή της ομίχλης έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών εξαιτίας του περιβάλλοντος εντονότερης σκέδασης που δημιουργήθηκε. Μετά από 15000 δείγματα, η παραγωγής ομίχλης σταμάτησε και η ομίχλη διαλύθηκε άμεσα. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι η βελτίωση είναι πάνω από 13 dB στο βέλτιστο τμήμα της καμπύλης που απεικονίζει την εξέλιξη των απωλειών, ενώ είναι παρατεταμένο το πλήθος των δειγμάτων για το οποίο οι απώλειες είναι μειωμένες κατά περισσότερο από 12 dB, καθώς για περισσότερα από 2500 δείγματα (που αντιστοιχούν σε χρόνο μεγαλύτερο των 12.5 sec), οι απώλειες υπό τη χρήση της μηχανής παρέμειναν κάτω από 81.50 dB. Η ελάχιστη τιμή των απωλειών που μετρήθηκε ήταν 80.60 dB, δηλαδή 13.53 dB χαμηλότερα από την αρχική μέση τιμή που εκτιμήθηκε προτού η μηχανή ομίχλης τεθεί σε λειτουργία.



Σχήμα 3.43. Εξέλιξη των απωλειών του ασύρματου καναλιού διάχυτων μεταδόσεων όταν το μέσο είναι αραιό και όταν εισάγεται τεχνητά ομίχλη από τη σχετική μηχανή, με (α) $\theta_{Tr, elev.} = 70^\circ, \theta_{Rec, elev.} = 70^\circ$, μήκος ζεύξης 7 μέτρων και με (β) $\theta_{Tr, elev.} = 40^\circ, \theta_{Rec, elev.} = 30^\circ$, μήκος ζεύξης 10 μέτρων.

Για να ελεγχθεί αν η μείωση των απωλειών μπορεί να υποστηριχθεί και υπό άλλη πειραματική διάταξη όσον αφορά τις γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη και την απόσταση αυτών, οι γωνίες ανύψωσης τέθηκαν σε τιμές 40° και 30° , για τον πομπό και το δέκτη, και η απόσταση στα 10 μέτρα. Και πάλι, με τις ίδιες πηγές και με 1 kHz ημιτονικό σήμα, η εξέλιξη των απωλειών για το δεύτερο σενάριο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.43(β). Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται τα χρονικά δείγματα, ακριβώς όπως στο

Σχήμα 3.43(α). Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τις απώλειες και είναι ίδιος με αυτόν στο Σχήμα 3.43(β). Το κέρδος του PMT σε αυτή την περίπτωση τέθηκε περίπου ίσο με 1.35×10^5 . Όμοια με πριν, αρχικά εκτιμήθηκε η μέση τιμή των απωλειών υπό καθαρή ατμόσφαιρα και αυτή ήταν περίπου 80.75 dB. Η τιμή αυτή ήταν κοντά (λιγότερο από 3 dB) σε αυτή του διαγράμματος Σχήμα 3.41(β). Μετά τη σύγκλιση, τέθηκε σε λειτουργία η μηχανή παραγωγής ομίχλης και καταγράφηκαν οι τιμές των απωλειών. Η πυκνότητα του μέσου αυξήθηκε γρήγορα εξαιτίας της εμφάνισης της ομίχλης και η εντονότερη σκέδαση ως απόρροια των περισσότερων σκεδαστών οδήγησε στη μείωση των απωλειών σε μία ελάχιστη τιμή περίπου 72.83 dB, που είναι μικρότερη κατά 7.92 dB από την τιμή των απωλειών που εκτιμήθηκε σε καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας. Όμοια, η οπτική ισχύς που έλαβε ο δέκτης ήταν πάνω από 6 φορές μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση της αραιής ατμόσφαιρας. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η βελτίωση στις επιδόσεις (όσον αφορά τις απώλειες) παρέμεινε σχεδόν άθικτη για πάνω από 5000 δείγματα (25 sec), παρά την αστάθεια του μέσου. Μετά από 15000 δείγματα, η λειτουργία της μηχανής σταμάτησε και οι απώλειες συνέκλιναν στην αρχική (μέση) τιμή. Μετά την επανάληψη της διαδικασίας για αρκετές φορές, η ίδια σχεδόν βελτίωση επιτεύχθηκε και το αποτέλεσμα ήταν η μέτρηση τμημάτων καμπυλών παρόμοια με αυτό στο Σχήμα 3.43(β). Για παράδειγμα, για τη συγκεκριμένη διάταξη πομπού και δέκτη, δύο άλλα σετ αντίστοιχων μετρήσεων έδωσαν ελάχιστη τιμή απωλειών περίπου 73.01 dB και 73.16 dB, αντίστοιχα. Και οι δύο τιμές είναι πολύ κοντά σε αυτή που προέκυψε ως ελάχιστη στο Σχήμα 3.43(β). Επιστρέφοντας στο σενάριο με γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη στις 70° και μήκος ζεύξης 7 μέτρων, ίδια συμπεράσματα προέκυψαν όσον αφορά την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων και αυτού του σεναρίου.

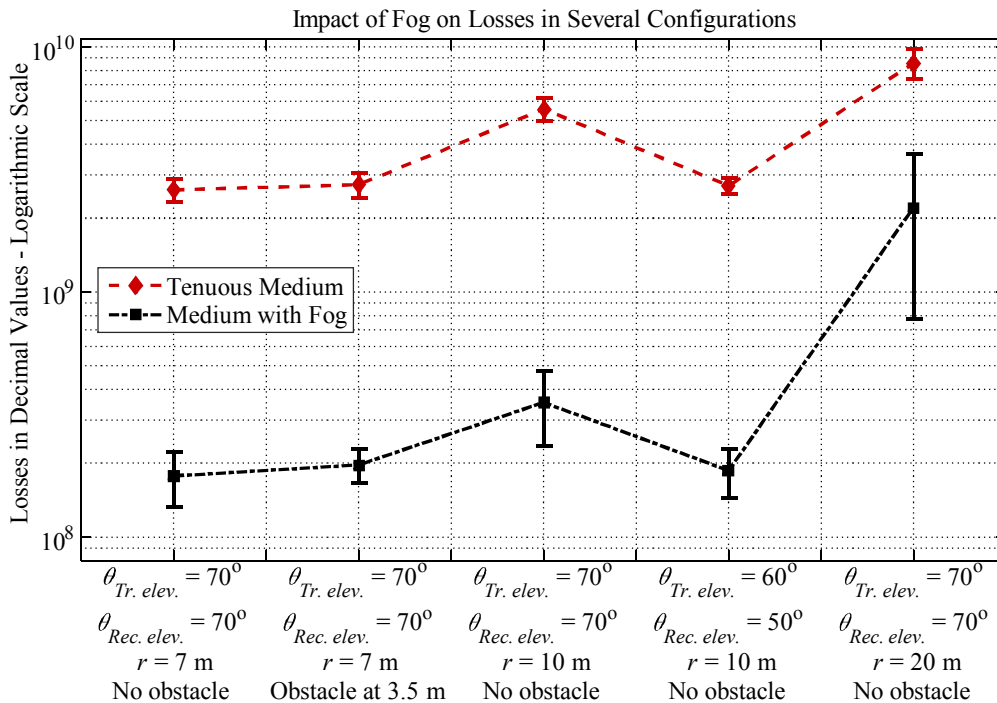
Για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τα σενάρια που μελετήθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη και την μεταβλητότητα των ατμοσφαιρικών συνθηκών, οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν αρκετές φορές (70 φορές) δίνοντας αρκετές χιλιάδες δείγματα ανά σετ μέτρησης όπως αυτό στο Σχήμα 3.43(α), ανάλογα με τον εκάστοτε γεωμετρικό σχηματισμό. Από τα δεδομένα που αποκτήθηκαν, υπολογίστηκαν η μέση τιμή και η διακύμανση των οπτικών απωλειών. Τα αποτελέσματα για τα σενάρια που μελετήθηκαν απεικονίζονται στο Σχήμα 3.44, όπου συμπεριλαμβάνονται οι στατιστικές μέσες τιμές και οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις για τις απώλειες που μετρήθηκαν με και χωρίς την παρουσία τεχνητής ομίχλης, για διάφορες περιπτώσεις ζεύξεων βάσει της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη και των γωνιών ανύψωσής τους. Επιπλέον, εξετάστηκε και η επίδραση εμποδίου ενδιάμεσα της ζεύξης. Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 3.44, υπό την παρουσία ομίχλης, έχουν απομονωθεί τα τμήματα όπου οι απώλειες ήταν σταθεροποιημένες γύρω από τις χαμηλότερες τιμές απωλειών.

Μένοντας στο σενάριο του οποίου τα αποτελέσματα δόθηκαν στο Σχήμα 3.43(α), οι μέσες απώλειες εκτιμήθηκαν για τα τμήματα χρονικών δειγμάτων των μετρήσεων, όπου οι απώλειες παρέμεναν κοντά είτε σε ένα υψηλό είτε σε ένα χαμηλό επίπεδο, ανάλογα με τη μέτρηση υπό καθαρή ατμόσφαιρα ή υπό την παρουσία ομίχλης, αντίστοιχα. Για αραιή ατμόσφαιρα, η μέση τιμή των απωλειών εκτιμήθηκε περίπου ίση με 94.16 dB (εκφράζοντας πτώση της ισχύος που φθάνει στο δέκτη κατά περίπου 2.61×10^9 * σε δεκαδικές τιμές). Υπό καθεστώς τεχνητής ομίχλης, η μέση τιμή που εκτιμήθηκε ήταν λίγο μικρότερη από 82.50 dB (1.78×10^8). Η τυπική απόκλιση σαν ποσοστό των μέσων απωλειών ήταν μεγαλύτερη από την περίπτωση όπου δεν υπήρχε ομίχλη. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη αστάθεια των μετρήσεων εξαιτίας της γρήγορης διάλυσης της ομίχλης. Ο λόγος που τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων των μέσων τιμών των απωλειών δόθηκαν σε δεκαδικές τιμές με τον κατακόρυφο άξονα σε λογαριθμική κλίμακα, είναι για να είναι ευδιάκριτες οι αλλαγές λόγω της επίδρασης της ομίχλης που

* Προφανώς, οι απώλειες θα ήταν $1/(2.61 \times 10^9)$ σε δεκαδικές τιμές θεωρώντας ότι πολλαπλασιάζονται με την ισχύ του σήματος και η ισχύς αυτή θα υποβιβάζοταν.

ξεπερνούν και τη μία τάξη μεγέθους σε κάθε περίπτωση. Δε ακολουθήθηκε η κλίμακα των decibel, διότι οι τιμές των τυπικών αποκλίσεων μπορεί σαν ποσοστιαίες μεταβολές ως προς τη μέση τιμή να μην ήταν πολύ μεγάλες, αλλά σε πολλές περιπτώσεις ξεπερνούσαν τα 83 dB σαν απόλυτες τιμές, ιδίως για όλες τις περιπτώσεις καθαρής ατμόσφαιρας στο Σχήμα 3.44, όπου οι μέσες τιμές των απωλειών ξεπέρασαν τα 93 dB. Με απεικόνιση σε decibel θα ήταν δυσανάγνωστο το διάγραμμα.

Με την προσθήκη μεγάλου εμποδίου στη μέση της ζεύξης και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την μέτρηση μέσων τιμών, οι μέσες τιμές των απωλειών προέκυψαν κοντά στα 94.37 dB (2.74×10^9) χωρίς την παρουσία ομίχλης, μία τιμή πολύ κοντά σε αυτή που εκτιμήθηκε υπό την απουσία εμποδίου. Αυτή η μέτρηση επιβεβαιώνει ότι η θεώρηση λειτουργίας υπό καθεστώς μη οπτικής επαφής ισχύει, καθώς οποιαδήποτε συνιστώσα οπτικής επαφής θα κοβόταν από το εμπόδιο και τότε θα προέκυπτε άλλη εκτίμηση για τις απώλειες, και συγκεκριμένα μεγαλύτερη, υπό την παρουσία του εμποδίου. Υπό την παρουσία ομίχλης, η μέση τιμή των απωλειών που μετρήθηκε ήταν λίγο κάτω από 83 dB, μία τιμή επίσης κοντά στα 82.50 dB που εκτιμήθηκαν για το αντίστοιχο σενάριο χωρίς εμπόδιο.



Configurations that were examined

Σχήμα 3.44. Οι μέσες τιμές των απωλειών (σε δεκαδικές τιμές) μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις με και χωρίς ομίχλη, για τα 5 σενάρια γεωμετρικών σχηματισμών των ζεύξεων δύο σημείων που εξετάστηκαν. Τα πρώτα δύο αφορούν απόσταση 7 μέτρων, τα επόμενα δύο απόσταση 10 μέτρων και το τελευταίο απόσταση 20 μέτρων.

Αυξάνοντας την απόσταση στα 10 μέτρα, οι μετρήσεις των απωλειών έγιναν για δύο περιπτώσεις, η μία με γωνία ανύψωσης 70° τόσο για τον πομπό όσο και για το δέκτη και η δεύτερη για γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, 60° και 50° , αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση, χωρίς ομίχλη, υπολογίστηκε μία μέση τιμή απωλειών περίπου 97.46 dB (5.56×10^9). Αυτή η τιμή διαφέρει από αυτή που υπολογίστηκε θεωρητικά στο Σχήμα 3.24(α) (10 μέτρα σε καθαρή ατμόσφαιρα) κατά περίπου 5.15 dB. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη δεδομένων αναφορικά με την ορατότητα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Υπό την παρουσία ομίχλης, η αντίστοιχη μέση τιμή απωλειών ήταν περίπου 85.49 dB (3.54×10^8). Η μείωση ήταν περίπου 12 dB. Στη δεύτερη περίπτωση ($\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 50^\circ$) εκτιμήθηκε μία μέση τιμή απωλειών 94.33 dB για το αραιό μέσο (2.71×10^9), ενώ για το πυκνότερο μέσο υπό την παρουσία ομίχλης, οι μέσες απώλειες μειώθηκαν

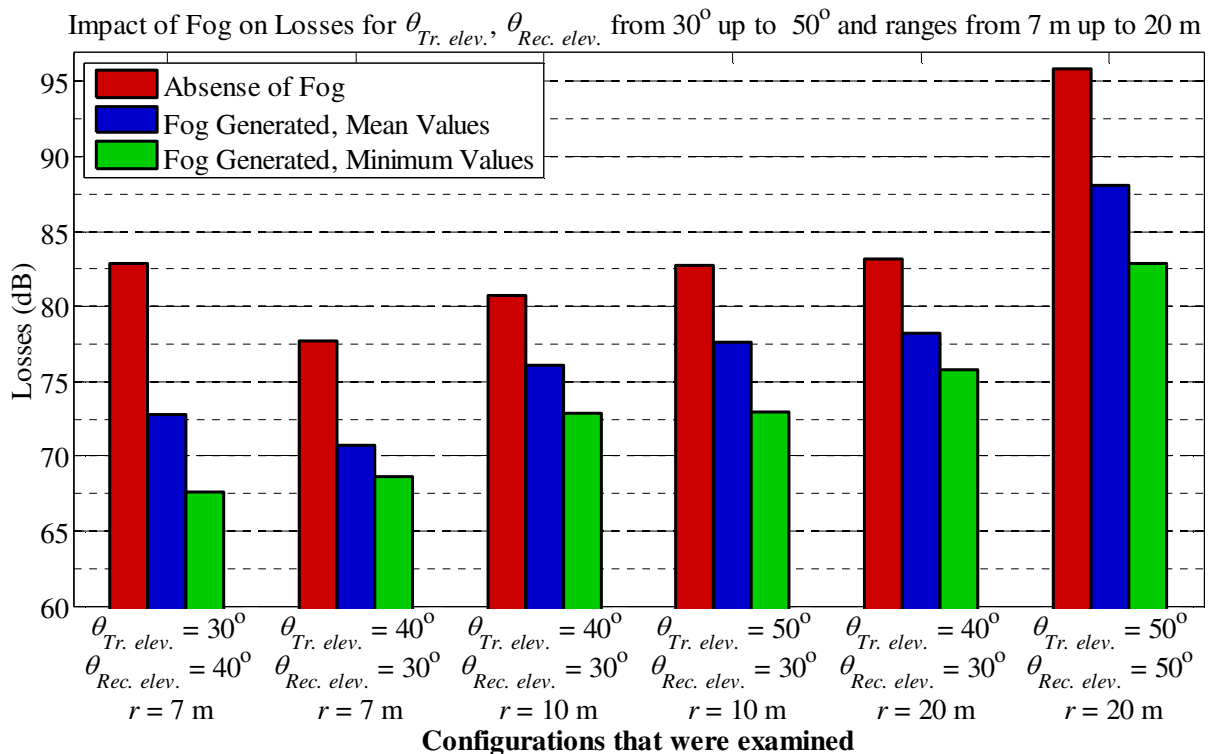
στα 82.71 dB (1.87×10^8). Η μείωση είναι λίγο πάνω από 11.50 dB σε σχέση με την καθαρή ατμόσφαιρα.

Όταν η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη αυξήθηκε στα 20 μέτρα και οι γωνίες ανύψωσης τέθηκαν στις 70° , οι απώλειες ήταν αναμενόμενο να αυξηθούν. Για την καθαρή ατμόσφαιρα, οι απώλειες εκτιμήθηκαν στα 99.34 dB (8.59×10^9), 3.91 dB μεγαλύτερες από την τιμή που υπολογίστηκε κατά την εκτίμηση των απωλειών μέσω της προσομοίωσης (Σχήμα 3.24(α)) όταν θεωρήθηκε ότι η στατιστική περιγραφή των γωνιών σκέδασης για τη σκέδαση Mie σε καθαρή ατμόσφαιρα περιγράφεται από τη συνάρτηση Henyey-Greenstein, παρά την έλλειψη δεδομένων για την ορατότητα που επικρατούσε. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η συνάρτηση που προέκυψε για την $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ από την (3.31) εφαρμόστηκε στις προσομοιώσεις της υποενότητας 3.2.5.5 ως συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie αντί για την Henyey-Greenstein με τις υπόλοιπες παραμέτρους ίδιες, οι απώλειες εκτιμήθηκαν με την ίδια μέθοδο πολλαπλών σκεδάσεων κοντά στα 98.86 dB, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.24(α), δηλαδή πολύ κοντά σε μία διαφορά 0.5 dB από την εκτίμηση από τις πειραματικές μετρήσεις, παρά το ότι η συνάρτηση φάσης είχε διαφορετική μορφή από αυτή της Henyey-Greenstein. Επιστρέφοντας στα πειραματικά αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη ζεύξη, υπό την παρουσία ομίχλης, η μέση τιμή των απωλειών ήταν μικρότερη κατά περίπου 6 dB από ότι σε καθαρή ατμόσφαιρα, δηλαδή περίπου 93.45 dB (2.21×10^9). Από την άλλη πλευρά, η τυπική απόκλιση ήταν μεγαλύτερη εξαιτίας της αστάθειας στην πυκνότητα του μέσου, μιας και η μηχανή δεν ήταν δυνατό να καλύψει με ομίχλη με απόλυτα ομογενή τρόπο και τα 20 μέτρα της ζεύξης. Επομένως, τα αποτελέσματα είναι κάπως απαισιόδοξα και θα πρέπει να αναμένεται μεγαλύτερη βελτίωση, δηλαδή μείωση των απωλειών, στην περίπτωση ομογενούς ή έστω καλύτερης κάλυψης του μέσου με ομίχλη, λαμβάνοντας υπόψη και τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα.

Μένοντας στην απεικόνιση του σετ των μέσων τιμών των απωλειών όταν το μέσο ήταν αραίο και όταν στο μέσο υπάρχει ομίχλη, αλλά και της ελάχιστης τιμής των απωλειών για κάποια ακόμα σενάρια που εξετάστηκαν, προέκυψε το Σχήμα 3.45. Οι μέσες τιμές των απωλειών στο ασύρματο μέσο χωρίς ομίχλη, στο μέσο με ομίχλη και οι ελάχιστες απώλειες που μετρήθηκαν υπό ομίχλη δίνονται σε ραβδόγραμμα για καθεμία πρόσθετη γεωμετρική διαμόρφωση της ζεύξης πομπού και δέκτη που εξετάστηκε. Για απόσταση 7 μέτρων, αφού οι γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη τέθηκαν σε τιμές 30° και 40° , αντίστοιχα, μετά τη σύγκλιση του lock-in ενισχυτή με μετάδοση σε καθαρή ατμόσφαιρα, οι μέσες απώλειες μετρήθηκαν περίπου ίσες με 82.79 dB. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής ομίχλης, οι μέσες απώλειες έπεσαν κατά περίπου 10 dB στα 72.72 dB, ενώ η ελάχιστη τιμή που μετρήθηκε για τις απώλειες ήταν περίπου 67.65 dB. Κάνοντας αντιμετάθεση των γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη για την ίδια απόσταση, μετρήθηκε διαφορετική τιμή απωλειών υπό απουσία ομίχλης, και πιο συγκεκριμένα η τιμή αυτή ήταν 77.68 dB. Κατά την παραγωγή ομίχλης, οι μέσες απώλειες μειώθηκαν κατά 7 dB αφού μετρήθηκε μία τιμή περίπου 70.70 dB. Όσον αφορά τις ελάχιστες απώλειες αυτές εκτιμήθηκαν κοντά στα 68.65 dB. Εδώ σημειώνεται ότι η αντιμετάθεση δεν έδωσε παρόμοιες απώλειες υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας. Στην περίπτωση της μεγαλύτερης γωνίας ανύψωσης του δέκτη προέκυψαν μεγαλύτερες απώλειες. Η ευαισθησία του πραγματικού συστήματος στην αύξηση των γωνιών ανύψωσης του δέκτη είναι μεγαλύτερη από ότι στην αύξηση των γωνιών ανύψωσης του πομπού. Αυτό επιβεβαιώνεται τόσο από το Σχήμα 3.41 όσο και από τη διεθνή βιβλιογραφία όπως στην [179] όπου υπάρχουν αντίστοιχες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα της αντιμετάθεσης γωνιών είναι ευδιάκριτα μέχρι και για ζεύγη ενδιάμεσων γωνιών ανύψωσης. Και εδώ και στην [179], αντιμεταθέσεις των γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη όπως έγινε στα δύο προηγούμενα σενάρια, είναι εις βάρος της περίπτωσης όπου η μεγαλύτερη γωνία ανύψωσης είναι αυτή του δέκτη και η

διαφορά μειώνεται με την αύξηση των γωνιών ανύψωσης και των αποστάσεων. Αυτό σημαίνει ότι είτε το FOV του δέκτη είτε η γωνία απόκλισης της δέσμης δεν είναι ακριβώς στα ονομαστικά όρια του κατασκευαστή και χαμηλώνοντας τις γωνίες ανύψωσης του δέκτη πιθανόν να λαμβάνεται κάποια συνιστώσα από οπτική επαφή.

Η επόμενη ζεύξη στο Σχήμα 3.45 αφορά αυτή για την οποία προέκυψε η καμπύλη στο Σχήμα 3.43(β) ($\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, $r = 10$ m). Οι μέσες απώλειες όταν το μέσο ήταν αραιό ήταν 80.76 dB, μία τιμή πολύ κοντά στην τιμή που εκτιμήθηκε για το «στιγμιότυπο» της χρονικής εξέλιξης των απωλειών που μετρήθηκαν και απεικονίστηκαν στο Σχήμα 3.43(β). Οι μέσες απώλειες υπό την παρουσία ομίχλης, οι οποίες δεν αναφέρθηκαν στο σχετικό παράδειγμα, ήταν περίπου 76.06 dB. Σε μία τέτοια περίπτωση φαίνεται να προκύπτει ένα μέσο κέρδος μόλις 4.70 dB για τη λαμβανόμενη ισχύ σε σχέση με το καθεστώς απουσίας ομίχλης. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι η λαμβανόμενη ισχύς κατά μέσο όρο τριπλασιάστηκε, κάτι που αποτελεί μη αμελητέα βελτίωση. Επιπροσθέτως, σε κάποιες περιπτώσεις η απότομη διάλυση της ομίχλης κατά τη διάρκεια των πειραμάτων προκάλεσε χειροτέρευση των μετρούμενων τιμών των απωλειών. Η ελάχιστη τιμή των απωλειών αναφέρθηκε στο Σχήμα 3.43(β) και επαναλαμβάνεται ότι ήταν 7.92 dB. Παραμένοντας στα 10 μέτρα και σε γωνία ανύψωσης του δέκτη ίση με 30° , η γωνία ανύψωσης του πομπού αυξήθηκε κατά 10° στις 50° . Η αναμενόμενη αύξηση των μέσω απωλειών σε καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας επιβεβαιώθηκε και προέκυψε περίπου ίση με 82.72 dB. Έπειτα, η αυξημένη πυκνότητα του μέσου με την εμφάνιση ομίχλης προσέφερε μία βελτίωση κατά 5.15 dB περίπου, αποδίδοντας 77.57 dB απωλειών. Η ελάχιστη τιμή των απωλειών που μετρήθηκε γι' αυτή τη διάταξη ήταν 72.92 dB, που σημαίνει μείωση κατά 9.80 dB σε σύγκριση με τις απώλειες για καθαρή ατμόσφαιρα.



Σχήμα 3.45. Μέσες απώλειες (σε dB) σε αραιό και πυκνό μέσο λόγω απουσίας ή παρουσίας ομίχλης, αντίστοιχα, και ελάχιστες απώλειες υπό καθεστώς παρουσίας ομίχλης, για 6 γεωμετρικούς σχηματισμούς ζεύξεων που εξετάστηκαν. Οι πρώτες δύο αφορούν απόσταση 7 μέτρων, οι επόμενες δύο αφορούν απόσταση 10 μέτρων και οι τελευταίες δύο αφορούν 20 μέτρα.

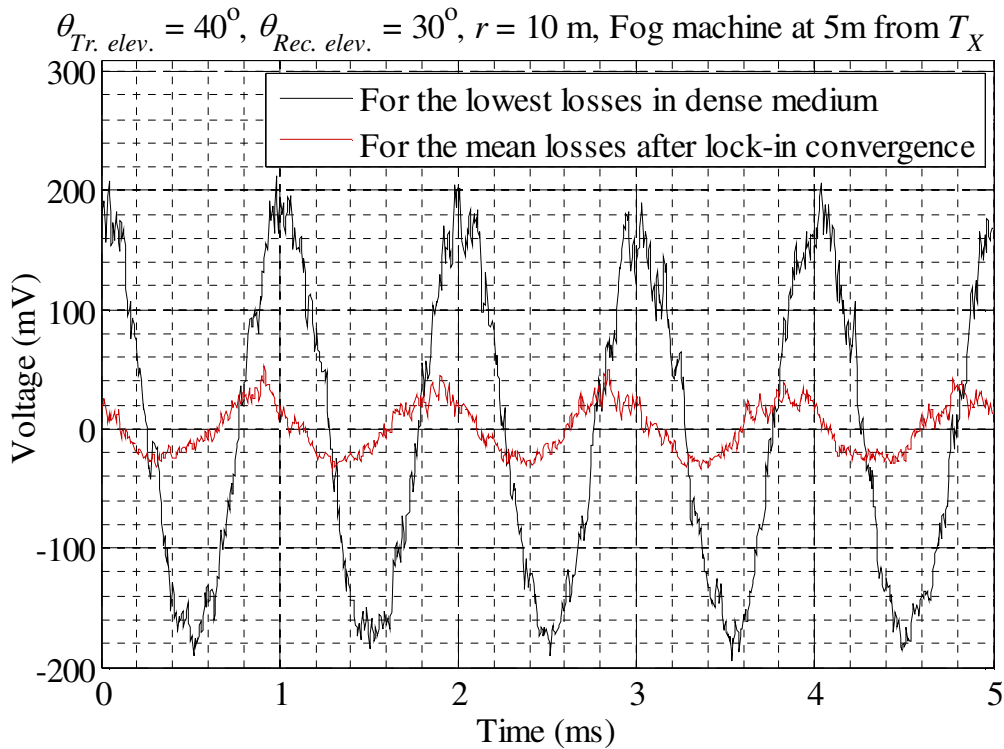
Επιστρέφοντας στο ζεύγος γωνιών $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$ και αυξάνοντας την απόσταση στα 20 μέτρα, μετρήθηκαν οι απώλειες της πέμπτης ομάδας τιμών στο Σχήμα 3.45. Για καθαρή ατμόσφαιρα, η μέση τιμή των απωλειών εκτιμήθηκε περίπου

ιση με 83.11 dB. Κατά τη λειτουργία της μηχανής ομίχλης, τα μικροσωματίδια έδρασαν σαν πηγές σκέδασης «οδηγώντας» περισσότερα φωτόνια προς τον PMT. Γι' αυτή τη σειρά μετρήσεων, η μέση και η ελάχιστη τιμή που μετρήθηκαν ήταν 78.18 dB και 75.82 dB, αντίστοιχα. Η βέλτιστη περίπτωση μείωσης των απωλειών (κατά 7.29 dB) ήταν μικρότερη από ότι για τον ίδιο συνδυασμό γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη στα 10 μέτρα που ήδη απεικονίστηκε στο Σχήμα 3.43(β). Αν η γωνία ανύψωσης τόσο του πομπού όσο και του δέκτη αυξηθούν για την ήδη αυξημένη απόσταση, τότε οι απώλειες θα αυξηθούν, αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται και ο κοινός όγκος που θα σχηματιστεί από τη δέσμη της πηγής και το FOV του δέκτη αυξάνοντας εν δυνάμει και την «περιοχή αλληλεπίδρασης» φωτός με τα κέντρα σκέδασης. Σε ένα πυκνό μέσο θα εμφανιστεί ένας συμβιβασμός, καθώς πολύ περισσότερα κέντρα σκέδασης θα εμφανιστούν μέσα στον κοινό όγκο, αλλά τα φωτόνια θα υπόκεινται σε μεγαλύτερη εξασθένιση εξαιτίας των μεγαλύτερων αποστάσεων που θα πρέπει να «διανύσουν» ώστε να φθάσουν στο δέκτη. Ταυτόχρονα, το πυκνότερο μέσο επεκτείνει την περιοχή αλληλεπίδρασης και εκτός του κοινού όγκου, μιας και μέσω των πολλαπλών σκεδάσεων είναι δυνατό να δημιουργηθούν πρόσθετα «μονοπάτια» από τον πομπό στο δέκτη, όπως φάνηκε και από τη θεωρητική μελέτη. Για να εξεταστεί ο συμβιβασμός και οι δυνατότητες που ενδεχομένως θα δώσει το πυκνό μέσο για τη μεγαλύτερη απόσταση και τις αυξημένες γωνίες ανύψωσης, η απόσταση διατηρήθηκε ίση με 20 μέτρα και οι γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη τέθηκαν στις 50° (έκτη ομάδα τιμών στο Σχήμα 3.45). Ξεκινώντας από περίπου 95.82 dB για αραιή ατμόσφαιρα, η μέση τιμή των απωλειών μειώθηκε σε 88.12 dB περίπου όταν εμφανίστηκε η ομίχλη. Η μεγαλύτερη βελτίωση ήταν 12.97 dB και αντιστοιχεί σε περίπου 82.85 dB απώλειες.

Για όλους τους συνδυασμούς ενδιάμεσων και υψηλών γωνιών ανύψωσης που παρουσιάστηκαν, οι ζεύξεις χωρίς οπτική θα εμφάνιζαν δριμείς απώλειες αν εφαρμόζονταν μεταδόσεις σε αραιή ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας μήκος κύματος στα 265 nm. Ωστόσο, υπό την παρουσία ομίχλης για όλες τις περιπτώσεις ζεύξεων που εξετάστηκαν εμφανίστηκε καθαρή βελτίωση όσον αφορά τις απώλειες. Άλλο ενδιαφέρον σημείο είναι το γεγονός ότι η βελτίωση για το ζεύγος γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη στις 50° στα 20 μέτρα, στο Σχήμα 3.45, ήταν σημαντική και ακόμα μεγαλύτερη σαν απόλυτη τιμή από ότι η μείωση των απωλειών για κάποιες περιπτώσεις ζευγών μικρότερων γωνιών ανύψωσης. Αυτό προσθέτει μία δυσκολία στη συστηματική εκτίμηση της βελτίωσης, αφού η ποσότητα της μείωσης των απωλειών εξαρτάται και από τον εκάστοτε γεωμετρικό σχηματισμό της ζεύξης (γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη και απόσταση αυτών). Επιπλέον, η βελτιστοποίηση της παραγωγής ομίχλης σε εξωτερικό περιβάλλον είναι μία δύσκολη διαδικασία εξαιτίας της αστάθειας του μέσου κατά τη λειτουργία της σχετικής μηχανής ομίχλης. Τονίζεται και πάλι ότι σε αυτό το σύνολο μετρήσεων, οι μέσες τιμές για τις απώλειες πριν την εμφάνιση ομίχλης για τις ζεύξεις που εξετάστηκαν για τα 10 και τα 20 μέτρα στο Σχήμα 3.45, ήταν κοντά σε αυτές που δίνονται στο Σχήμα 3.41(β) και στο Σχήμα 3.41(γ), παρά το γεγονός ότι οι μετρήσεις έγιναν διαφορετικές μέρες από αυτές κατά τις οποίες προέκυψε το Σχήμα 3.41 και το σύστημα βαθμονομήθηκε ξανά. Όμοια ισχύει και για τα αποτελέσματα στο Σχήμα 3.44 με λίγο μεγαλύτερη απόκλιση για κάποια από τα σενάρια, χωρίς, όμως, οι αποκλίσεις να ξεπεράσουν τα 3 dB.

Η επίδραση της ομίχλης στις απώλειες αναμφίβολα θα επηρεάσει τη σχέση μεταξύ του επιθυμητού σήματος και του θορύβου στο δέκτη, όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.2.5.5. Επιστρέφοντας στα 10 μέτρα και για $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, από την πειραματική διαδικασία από την οποία προέκυψαν τα αποτελέσματα που δόθηκαν στο Σχήμα 3.43(β), αποθηκεύτηκε και το ημιτονικό σήμα πριν την επεξεργασία του, ώστε να απεικονιστεί η εξέλιξή του με τις μεταβολές των απωλειών. Στο Σχήμα 3.46, με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται πέντε περίοδοι του ημιτονικού σήματος μετά τη

σύγκλιση του συστήματος στις απώλειες που αντιστοιχούν στο αραιό (σε πυκνότητα) κανάλι. Μετά τη μείωση των απωλειών εξαιτίας της λειτουργίας της μηχανής παραγωγής ομίχλης, το σήμα στο δέκτη είναι ισχυρότερο από ότι στην περίπτωση απουσίας ομίχλης, όπως φαίνεται καθαρά και από την μαύρη καμπύλη μεγαλύτερου πλάτους. Αυτές οι πέντε περίοδοι αντιστοιχούν στις ελάχιστες απώλειες που μετρήθηκαν για τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, που ήταν 7.92 dB μικρότερες από τις απώλειες πριν την παραγωγή ομίχλης. Το πλάτος του ημιτονικού σήματος μετά τη σύγκλιση για καθαρή ατμόσφαιρα ήταν περίπου 30 mV σύμφωνα με το Σχήμα 3.46. Το πλάτος του ημιτονικού σήματος εξαπλάσιάζεται κατά την πτώση των απωλειών, δικαιολογώντας τη μείωση των απωλειών που εκτιμήθηκε.



Σχήμα 3.46. Πέντε περίοδοι του ημιτονικού σήματος όταν το μέσο ήταν αραιό και όταν η μηχανή παραγωγής ομίχλης τέθηκε σε λειτουργία και οι απώλειες ήταν στην ελάχιστη τιμή τους. Η εξέλιξη των απωλειών ήταν αυτή στο Σχήμα 3.43(β) ($\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, μήκος ζεύξης 10 μέτρων).

3.3.2 Επιδόσεις συστήματος διάδοσης

Σ' αυτήν την υποενότητα, οι επιδόσεις ενός επικοινωνιακού συστήματος μικρής εμβέλειας κάλυψης με μεταδόσεις στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη εκτιμώνται για δύο σχήματα διαμόρφωσης ένα παλμικό και ένα πολλαπλών φερόντων. Το παλμικό σχήμα ήταν το 4-PPM και χρησιμοποιήθηκε λόγω της βέλτιστης φώρασης. Το σχήμα πολλαπλών φερόντων ήταν το Flip-OFDM το οποίο είναι κατάλληλο για μονοπολικές (unipolar) επικοινωνίες χωρίς την απαίτηση DC πόλωσης για την γέννηση ενός πραγματικού και θετικού σήματος στο πεδίο του χρόνου που αντιπροσωπεύει την μεταδιδόμενη οπτική ισχύ [157]. Οι ζεύξεις ήταν σημείου προς σημείο και οι αποστάσεις που καλύφθηκαν ήταν από 5 μέχρι και 20 m ακριβώς όπως έγινε και με τις απώλειες. Οι ρυθμοί που εφαρμόστηκαν ήταν 4 και 10 kbit/s, χαμηλοί μεν, επαρκείς δε για μετάδοση φωνής ή/και δεδομένων, πχ σε ένα αυτόνομο σύστημα αισθητήρων. Οι ζεύξεις αξιολογήθηκαν με βάση το ρυθμό σφαλμάτων bits για ένα πλήθος γωνιών ανύψωσης του πομπού και του δέκτη, τόσο σε αραιό όσο και σε πυκνότερο μέσο. Προκαταβολικά, αναφέρεται ότι ένα από τα κύρια ευρήματα ήταν η σημαντικά βελτίωση των επιδόσεων όταν το ασύρματο μέσο γινόταν πυκνότερο.

Σχετικά με την πειραματική διάταξη, είναι η ίδια με αυτή στο Σχήμα 3.39 με δύο διαφοροποιήσεις. Σχετικά με την πρώτη διαφοροποίηση, τα ηλεκτρικά σήματα παράγονταν στον υπολογιστή χρησιμοποιώντας το Simulink και διαμόρφωναν άμεσα τη φωτεινή ένταση των LEDs, ενώ αδρανοποιήθηκαν τα τμήματα της γέννησης του ημιτόνου στον πομπό και της ανίχνευσης με εγκλειδωση στο ηλεκτρικό τμήμα του δέκτη, όπως αντίστροφα είχε συμβεί κατά τη μέτρηση των απωλειών. Η δεύτερη σοβαρή διαφοροποίηση ήταν η εκπομπή 0.5 mW οπτικής ισχύος από καθεμία LED όταν διέρρεε μόνο το ρεύμα πόλωσης σε καθεμία LED, ώστε από τη μία να εξασφαλιστεί λειτουργία σε γραμμικό τμήμα της καμπύλης P-I και από την άλλη να διατηρηθεί το επίπεδο της εκπεμπόμενης ισχύος όσο το δυνατό χαμηλότερο για λόγους ασφαλείας, όσον αφορά τα ανθρώπινα μάτια. Στη λήψη εφαρμόστηκε άμεση φώραση χρησιμοποιώντας και πάλι τον PMT R7154 μαζί με το ίδιο φίλτρο με ζώνη διέλευσης γύρω από τα 265 nm. Όμοιο παρέμεινε και το κύκλωμα μετά τον PMT διατηρώντας τον TIA με $R_{TIA} = 2 \text{ M}\Omega$. Μετά το πέρασμα του εκάστοτε σήματος στον υπολογιστή όμοια με πριν, ακολουθούσε η ανάκτηση των ενθόρυβων σημάτων που έλαβε ο δέκτης και η απόφαση και αντιστοίχιση των συμβόλων σε bits ανάλογα με το εκάστοτε σχήμα διαμόρφωσης που εξεταζόταν. Έπειτα, γινόταν η εκτίμηση του BER συγκρίνοντας τα bits που ανίχνευσε ο δέκτης με αυτά που είχαν γεννηθεί και σταλεί. Αναφέρεται ότι τα σήματα 4-PPM και Flip-OFDM γεννήθηκαν με την ίδια ρίζα της μέσης τετραγωνικής τιμής της τάσης (root mean square – rms voltage) στο ηλεκτρικό επίπεδο. Αυτό συνέβη για να είναι δίκαιη η σύγκριση για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης εξαιτίας της AC συζευγμένης εξόδου του TIA.

Σε καθεμία Flip-OFDM σύμβολο των 256×2 υποφερόντων που τροφοδοτούνταν στον IFFT στην πλευρά της εκπομπής και στον FFT στην πλευρά της λήψης, αντίστοιχα, 30 υποφέροντα έφεραν σύμβολα διαμορφωμένα κατά φάση βάσει του σχήματος Εγκλειδωσης με Ολίσθηση Φάσης Τέταρτης τάξης (Q-PSK). Αναλυτικότερα, μένοντας στα αχνά τμήματα που δεν περιγράφηκαν στο Σχήμα 3.39 και λαμβάνοντας υπόψη όσα ήδη παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 3.19 [157], η απόσταση των υποφερόντων τέθηκε ίση με $\Delta f = F_s / (256 \times 2) = 375 \text{ Hz}$, με $F_s = 192 \text{ kHz}$ να αποτελεί τη συχνότητα δειγματοληψίας. Στο τμήμα του Flip-OFDM πριν το διαχωρισμό του διπολικού συμβόλου σε δύο μονοπολικά σύμβολα (στην πλευρά του πομπού) και μετά την ενοποίηση των δύο συμβόλων (στην πλευρά του δέκτη), δηλαδή στο συμβατικό τμήμα του Flip-OFDM, το υποφέρον στο DC δε χρησιμοποιήθηκε (είχε περιεχόμενο 0), 255 υποφέροντα ακολουθούσαν από ένα μηδενικό υποφέρον και τα υπόλοιπα 255 ήταν συζυγή κατοπτρικά των πρώτων 255 υποφερόντων. Σχετικά με τα 255 υποφέροντα, τα πρώτα 6 υποφέροντα είχαν περιεχόμενο 0. Οπότε, τα 7 πρώτα συνολικά υποφέροντα δε χρησιμοποιούνταν σε κάθε Flip-OFDM σύμβολο. Τα 6 υποφέροντα με δείκτη $8+7 \times i$ (λαμβάνοντας υπόψη κατά την αρίθμηση ως πρώτο υποφέρον το DC), με $i = 0, 1, \dots, 5$ χρησιμοποιήθηκαν ως πιλοτικά υποφέροντα. Τα πιλοτικά υποφέροντα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του καναλιού. Τα 30 υποφέροντα που έφεραν ωφέλιμα δεδομένα, ήταν χωρισμένα σε 5 ομάδες και καθεμία ομάδα αποτελούνταν από 6 διαδοχικά υποφέροντα. Η πρώτη ομάδα με ωφέλιμα Q-PSK σύμβολα αποτελούνταν από το 9ο ως και το 14ο υποφέρον. Η δεύτερη ομάδα από το 16ο ως το 21ο. Αυτό σημαίνει ότι τα υποφέροντα $9+7 \times i$ με $i = 0, 1, \dots, 4$ ήταν τα αρχικά υποφέροντα, τα $10+7 \times i$ ήταν τα δεύτερα υποφέροντα κάθε ομάδας των 6 συνεχόμενων υποφερόντων κοκ. Μετά το 43ο υποφέρον που αποτέλεσε τον τελευταίο πιλότο, τα υπόλοιπα 213 υποφέροντα δε φέρουν ωφέλιμα δεδομένα και είναι μηδενικά. Μαζί με το μεσαίο μηδενικό και τα υπόλοιπα κατοπτρικά υποφέροντα των 255 πρώτων, θα περάσουν από τον IFFT στον πομπό και θα ακολουθήσουν όσα φαίνονται στο Σχήμα 3.19(α). Στο πεδίο του χρόνου, το κυκλικό πρόθεμα τέθηκε στο 12.50% της διάρκειας του αρχικού Flip-OFDM συμβόλου. Στη λήψη, τα κυκλικά προθέματα των μονοπολικών Flip-OFDM σημάτων που έλαβε ο δέκτης αφαιρούνται και από τα δύο διαδοχικά πραγματικά σύμβολα θα χτισθεί ένα διπολικό [157]. Αφού εφαρμοσθεί ο FFT στο τελικό σύμβολο, η

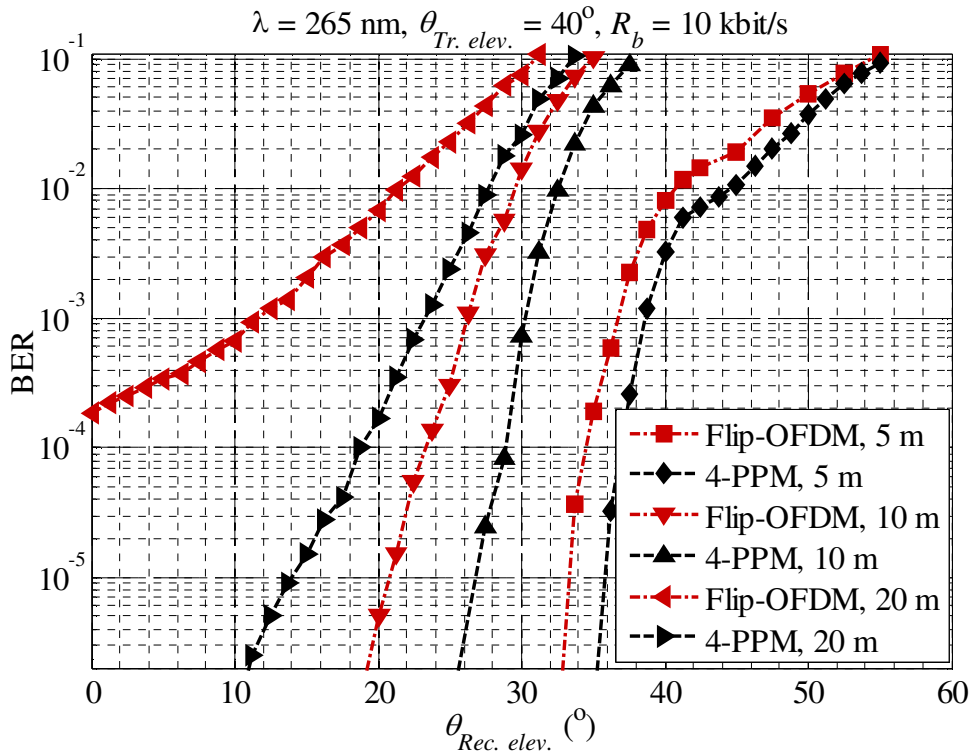
υπόλοιπη διαδικασία είναι αυτή που θα εφαρμοζόταν σε ένα συμβατικό OFDM σύμβολο. Για το 4-PPM εφαρμόστηκε φιλτράρισμα integrate-and-dump σε επίπεδο θυρίδας και έπειτα φώραση μέγιστης πιθανοφάνειας χωρίς κατώφλι (αντιστοίχιση σε κάποιο σύμβολο βάσει της θέσης της θυρίδας για την οποία μεγιστοποιείται η έξοδος). Εξακολουθούν να ισχύουν όσα αναφέρθηκαν για το Σχήμα 3.17.

Αρχικά, ο ρυθμός τέθηκε στα 10 kbit/s και η απόσταση που καλύφθηκε ήταν $r = 5$ m, 10 m και 20 m. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και σε αυτό το στάδιο, όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό περιβάλλον. Όμοια με τις εκτιμήσεις των απωλειών, μετά τον αρχικό χαρακτηρισμό των ζεύξεων υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας, η ίδια μηχανή παραγωγής ομίχλης [191] τοποθετήθηκε στο μέσο της εκάστοτε υπό εξέταση ζεύξης ($r/2$) ώστε να ελεγχθεί η πυκνότητα του ασύρματου μέσου, σύμφωνα με το Σχήμα 3.42. Και σε αυτή την περίπτωση, σκοπός ήταν η κάλυψη του χώρου όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφα. Όπως είναι αναμενόμενο, οι δύο άξονες πειραματικής μελέτης περιλάμβαναν τη σύγκριση των δύο σχημάτων διαμόρφωσης υπό συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας και τον έλεγχο της επίδρασης της ομίχλης στις επιδόσεις και των δύο σχημάτων.

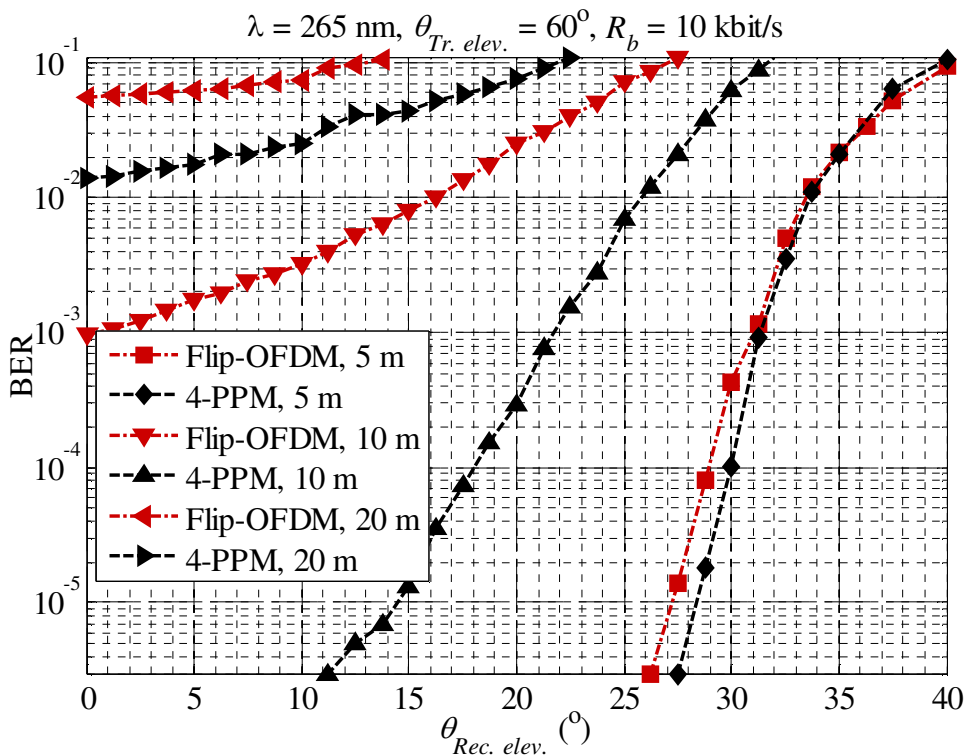
Οι καμπύλες του BER σε συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης του δέκτη (από 0° ως και 60°) για απόσταση 5 m, 10 m και 20 m, με τη γωνία ανύψωσης του πομπού στις 40° για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης δίνονται στο Σχήμα 3.47. Για την μικρή απόσταση των 5 μέτρων, η επίδοση του Flip-OFDM ήταν ελαφρώς κατώτερη της επίδοσης του 4-PPM. Ωστόσο, η σχέση αυτή άλλαξε με την αύξηση της απόστασης. Για $r = 10$ m, η λαμβανόμενη ισχύς ήταν της τάξης των -80 dBm λόγω των απωλειών του καναλιού, όπως μπορεί να φανεί και από το Σχήμα 3.41(β). Για τέτοια επίπεδα ισχύος, η κβαντική φύση του φωτός άρχισε να γίνεται έκδηλη και ο δέκτης άρχισε να λειτουργεί ως ένας μετρητής φωτονίων. Σε μία τέτοια περίπτωση, η επίδοση του 4-PPM είναι καλύτερη σε σύγκριση με αυτή του Flip-OFDM εξαιτίας της βέλτιστης φώρασης χωρίς κατώφλι του πρώτου. Θεωρώντας την περίπτωση όπου η συνιστώσα οπτικής επαφής είχε μειωθεί σημαντικά, πχ για $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, φαίνεται ότι η τιμή BER που επιτεύχθηκε για το 4-PPM ήταν πάνω από μία τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή που επιτεύχθηκε για το Flip-OFDM. Αυτή η υπεροχή του 4-PPM έκλεισε στις υψηλότερες γωνίες ανύψωσης του δέκτη που επέβαλαν ακόμα πιο υψηλά επίπεδα απωλειών. Όταν η απόσταση τέθηκε στα 20 μέτρα, το 4-PPM και πάλι υπερέφερε του Flip-OFDM. Ωστόσο, ήταν σημαντικά περιορισμένο το εύρος των γωνιών για το οποίο ήταν δυνατό να επιτευχθούν μεταδόσεις με ικανοποιητικές τιμές BER χωρίς οπτική επαφή, ειδικά για το Flip-OFDM.

Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν παρατηρώντας το Σχήμα 3.48 για τη μεγαλύτερη γωνία ανύψωσης η οποία ήταν $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$. Το 4-PPM ξεπέρασε σε επιδόσεις το Flip-OFDM και η ανωτερότητά του ενισχύθηκε με την αύξηση της απόστασης, αλλά για μικρότερο εύρος γωνιών ανύψωσης του δέκτη σε σχέση με τις μετρήσεις για $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$. Για $r = 10$ m, όταν εξετάστηκαν οι επιδόσεις για μικρές γωνίες ανύψωσης του δέκτη, πχ κάτω από 25° , το 4-PPM απέδωσε σημαντικά μικρότερο BER από το Flip-OFDM, το οποίο ξεπέρασε τη μία τάξη μεγέθους. Η διαφορά ήταν μικρότερη για υψηλότερες γωνίες ανύψωσης όπου οι απώλειες ήταν αυξημένες. Μένοντας σε γωνία ανύψωσης του πομπού $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$, για απόσταση 20 μέτρων, ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να εγκατασταθεί μία αξιόπιστη ζεύξη και για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης εξαιτίας των πολύ χαμηλών επιπέδων λαμβανόμενης ισχύος. Το αποτέλεσμα ήταν BER μεγαλύτερα από 10^{-2} και για τα δύο σχήματα, με το 4-PPM να εμφανίζει λίγο καλύτερη συμπεριφορά, αλλά σε μη αποδεκτά πλαίσια.

* Το μεταβαλλόμενο τμήμα και των δύο τύπων σημάτων παρουσιάζει οπτική rms ισχύ περίπου -2.5 dBm κατά την εκπομπή, ενώ από το Σχήμα 3.41(β) για $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$ και για τις γωνίες ανύψωσης του δέκτη που δίνονται στο Σχήμα 3.47 για $r = 10$ m, δηλαδή μεταξύ 20° και 40° , οι απώλειες κυμαίνονται μεταξύ 73.50 dB και 85.50 dB περίπου.



Σχήμα 3.47. Ρυθμός σφαλμάτων bits σε συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) για τρία μήκη ζεύξεων ($r = 5 \text{ m}, 10 \text{ m}$ και 20 m), με μεταδόσεις στα 265 nm και $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$.



Σχήμα 3.48. Ρυθμός σφαλμάτων bits σε συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) για τρία μήκη ζεύξεων ($r = 5 \text{ m}, 10 \text{ m}$ και 20 m), με μεταδόσεις στα 265 nm και $\theta_{Tr. elev.} = 60^\circ$.

Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν είναι:

- ⇒ μεταδόσεις με περιορισμό στις επιδόσεις λόγω των απωλειών. Το εύρος ζώνης των καναλιών είναι της τάξης των εκατοντάδων kHz ως και μερικά MHz για κανάλια σαν αυτά που πραγματευόμαστε χωρίς οπτική επαφή στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα για μικρές [153] ή και για μεγάλες αποστάσεις [193]. Επομένως,

είναι αρκετά υψηλότερο από το εύρος ζώνης των μεταδιδόμενων σημάτων και ένας ρυθμός ίσος με 10 kbit/s μπορεί να υποστηριχθεί με τις απώλειες να αποτελούν τον κρίσιμο παράγοντα, ειδικά σε μεγάλες αποστάσεις και γωνίες ανύψωσης.

- ⇒ η σημαντική αύξηση των απωλειών με την αύξηση της απόστασης και των γωνιών ανύψωσης.
- ⇒ η βέλτιστη φώραση του 4-PPM. Το παλμικό σχήμα 4-PPM οποίο φαίνεται να ταιριάζει καλύτερα σε τέτοια κανάλια σε σχέση με το Flip-OFDM που έχει αναλογική μορφή στο πεδίο του χρόνου.

Από το Σχήμα 3.47 και το Σχήμα 3.48, σε όλες τις περιπτώσεις, ο ρυθμός σφαλμάτων bits αυξάνεται με την αύξηση των γωνιών ανύψωσης, ενώ η κλίση του BER συναρτήσει της γωνίας ανύψωσης του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) μειώνεται δραματικά με την αύξηση της απόστασης εξαιτίας του σημαντικής επιδείνωσης του SNR σε συνέπεια της μειωμένης λαμβανόμενης οπτικής ισχύος στο δέκτη. Για μεγάλες αποστάσεις, το αποτέλεσμα είναι το BER να εκκινεί από υψηλή τιμή ακόμη και για μικρές γωνίες ανύψωσης του δέκτη. Αυτό έγινε ιδιαίτερα αισθητό για το Flip-OFDM. Συγκρίνοντας τα δύο σχήματα διαμόρφωσης, η ανωτερότητα του 4-PPM ίσχυε για όλες τις αποστάσεις, αλλά έγινε πιο έντονη στις μεγαλύτερες αποστάσεις εξαιτίας της βέλτιστης φώρασής του. Για τις μικρότερες αποστάσεις και τις χαμηλές γωνίες ανύψωσης, το κριτήριο της ίδιας rms τάσης για τα δύο σχήματα, αλλά και οι μικρότερες απώλειες δεν ευνοούν το 4-PPM και μετριάζουν την υπεροχή του. Σε πολύ υψηλότερες γωνίες ανύψωσης, η επιδείνωση των επιδόσεων και για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης είναι αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης των λαμβανόμενης οπτικής ισχύος. Με έλεγχο του θερμικού θορύβου και με Poisson στατιστική για τις δυνόδους, πιθανή αύξηση του κέρδους του PMT δε θα έδινε κάποια σημαντική αλλαγή. Από την (3.21), για μία διάρκεια τ εντός της οποίας αφικνούνται κατά μέσο όρο n_p φωτόνια στην φωτοκάθοδο του PMT με κβαντική απόδοση η , τότε το ηλεκτρικό SNR είναι $SNR_{el.} = \eta \times n_p / F$. Από την ίδια σχέση φαίνεται ότι αύξηση του G θα αύξανε ελάχιστα το ηλεκτρικό SNR, καθώς ο παράγοντας F είναι $F = \delta / (\delta - 1)$ με $\delta = G^{1/k}$ και $k = 9$ για ένα PMT όπως ο R7154 που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Με $G = 10^5$, θα προέκυπτε $F \approx 1.386$, ενώ για $G = 10^7$ που είναι το μέγιστο για το συγκεκριμένο PMT [167] θα προέκυπτε $F \approx 1.20$. Άρα, θεωρητικά η αύξηση του κέρδους θα βελτίωνε ελάχιστα το ηλεκτρικό SNR για οποιοδήποτε από τα δύο σχήματα διαμόρφωσης. Ωστόσο, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι με το κέρδος του PMT αντιμετωπίστηκε η επίδραση των υψηλών απωλειών (έστω και σε χαμηλότερες γωνίες) η επίδραση του θορύβου βολής και έγινε δυνατή η δόμηση ζεύξεων χωρίς οπτική επαφή.

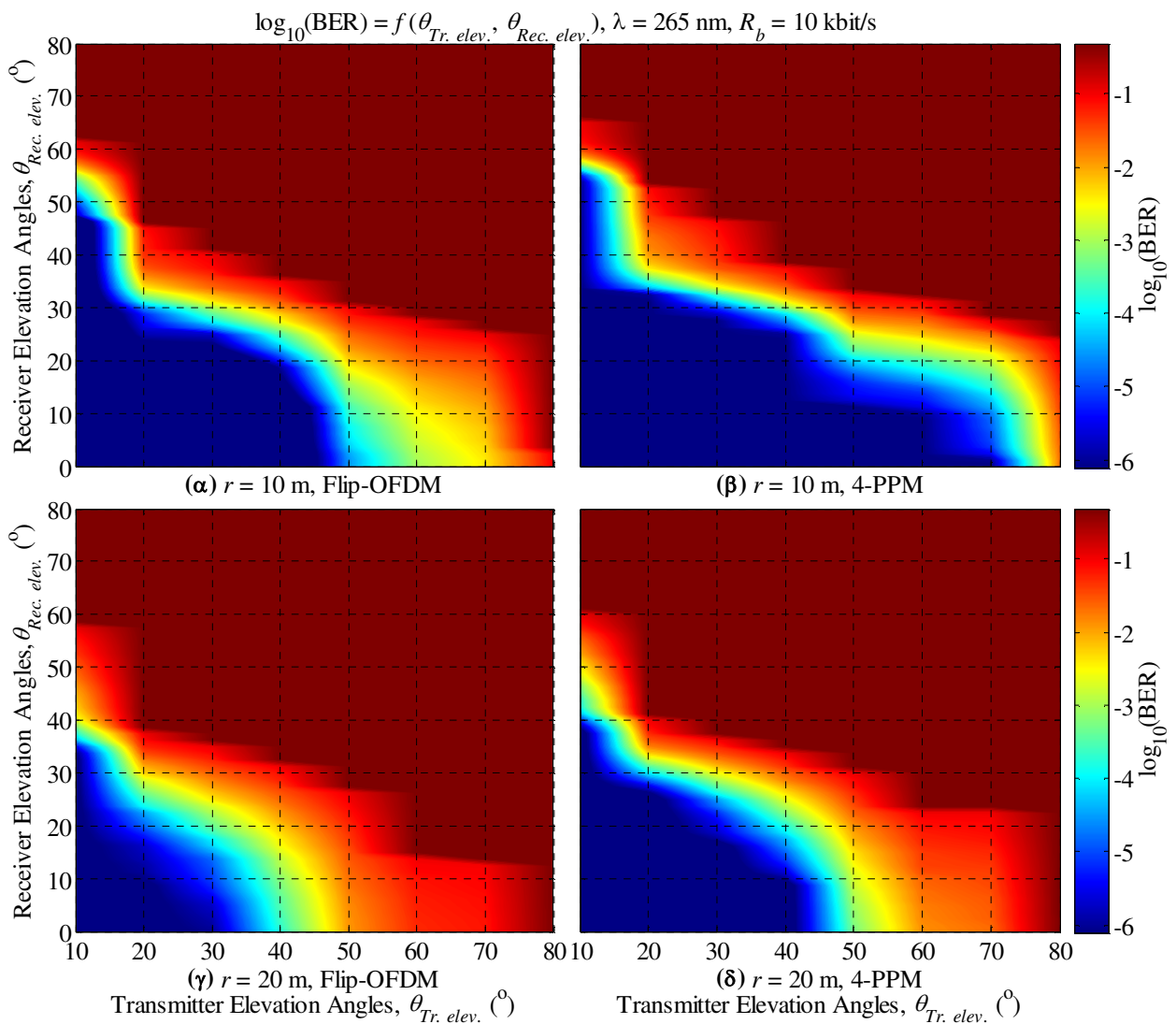
Μένοντας στο κομμάτι των επιδόσεων και χρησιμοποιώντας τη μετρική του BER για την αξιολόγηση των ζεύξεων υπό διάφορους γεωμετρικούς σχηματισμούς, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για μεγάλο πλήθος συνδυασμών γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη για αποστάσεις 10 και 20 μέτρων για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 3.49 υπό μορφή γεμισμένων περιγραμμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας του χρώματος δεν αντιστοιχεί σε τιμές BER, αλλά στο δεκαδικό λογάριθμο ($\log_{10}(\text{BER})$) των τιμών του BER για καθεμία περίπτωση μήκους και σχήματος διαμόρφωσης. Το κάτω όριο του BER που μπορούσε να εκτιμηθεί με ακρίβεια ήταν 8×10^{-7} και το άνω όριο 1.2×10^{-1} . Για καθεμία απόσταση (10 ή 20 μέτρα) και για καθένα από τα δύο σχήματα διαμόρφωσης, για οποιοδήποτε συνδυασμό γωνιών ανύψωσης δεν μετρήθηκε BER τουλάχιστον 8×10^{-7} , ανατέθηκε η τιμή 0 στο BER. Στο άλλο άκρο, αφού το BER είναι αύξουσα συνάρτηση των γωνιών ανύψωσης του δέκτη για μία συγκεκριμένη γωνία ανύψωσης του πομπού [179], μετά από μία μέτρηση του BER = 1.2×10^{-1} , οι μετρήσεις του BER διακόπηκαν για τις υπόλοιπες γωνίες ανύψωσης του δέκτη που απέμεναν και η τιμή 0.5 ανατέθηκε στις τιμές του BER

που αντιστοιχούν στους υπόλοιπους συνδυασμούς γωνιών (για την γωνία ανύψωσης του πομπού που είχε τεθεί). Αυτό έγινε ώστε να δημιουργηθούν διαγράμματα υπό μορφή γεμισμένων περιγραμμάτων για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης. Όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο προέκυψαν οι περιοχές που είναι ενδιάμεσες των ορίων του BER για καθένα διάγραμμα στο Σχήμα 3.49, οι γωνίες ανύψωσης του πομπού ορίστηκαν στο διάστημα από 10° ως 80° με βήμα 10° . Για καθεμία γωνία ανύψωσης του πομπού, ο ρυθμός σφαλμάτων bits μετρήθηκε και κρατήθηκε για όλες τις γωνίες ανύψωσης του δέκτη εφόσον το BER ήταν εντός του αποδεκτού εύρους τιμών (από 8×10^{-7} μέχρι και 1.2×10^{-1}). Έπειτα, για καθεμία γωνία ανύψωσης πομπού για την οποία προέκυψε ένα σετ μετρήσεων, εφαρμόστηκε παρεμβολή των τιμών που ήταν εντός του συγκεκριμένου εύρους τιμών του BER ώστε να αποκτηθούν τιμές BER ανά 1.25° όσον αφορά τις γωνίες ανύψωσης του δέκτη που ήταν η ελεύθερη παράμετρος. Σε αυτό το σημείο τονίζεται ότι μεγάλο σετ μετρήσεων περιλάμβανε μέτρηση του BER ήδη με βήμα 1.25° στις γωνίες ανύψωσης του δέκτη για καθεμία γωνία ανύψωσης του πομπού. Αυτό μπορεί να φανεί τόσο στο Σχήμα 3.47 όσο και στο Σχήμα 3.48. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργήθηκε ένα πλέγμα τιμών BER για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης και τα δύο μήκη ζεύξεων που εξετάστηκαν. Και στα τέσσερα περιγράμματα που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα και δίνονται στο Σχήμα 3.49(α) ως το Σχήμα 3.49(δ), έχει χρησιμοποιηθεί ακριβώς η ίδια διαβάθμιση για τον άξονα των χρωμάτων που αντιστοιχούν στα αποδεκτά όρια του BER. Επιπλέον και στα τέσσερα διαγράμματα έχουν χρησιμοποιηθεί οι ίδιοι άξονες γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη. Σε τιμές που τελικά βρέθηκαν κάτω από την ελάχιστη τιμή του BER αποδόθηκε το χρώμα που αντιστοιχούσε και στην ελάχιστη τιμή BER που σημαίνει ότι είναι δυνατή η επίτευξη BER από το όριο 8×10^{-7} και κάτω για όποιο συνδυασμό γωνιών συνέβη αυτό. Προφανώς, αυτό γίνεται για να είναι πιο ευανάγνωστα τα σχήματα και να φαίνονται οι επιδράσεις της αύξησης της απόστασης. Πρόσθετος λόγος είναι η δίκαιη σύγκριση των σχημάτων διαμόρφωσης. Παρατηρώντας τα πάνω όρια του BER για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, τα αποτελέσματα έχουν μία μορφή «σκαλοπατιών», που φαίνεται από το απότομο πέρασμα από το ανοιχτό κόκκινο στο σκούρο κόκκινο χρώμα και ταυτόχρονα από το πέρασμα σε διαδοχικές γωνίες ανύψωσης του πομπού στα όρια των περιγραμμάτων ανοιχτού κόκκινου χρώματος. Αυτή η μορφή οφείλεται στο ότι καθένα από τα τέσσερα διαγράμματα προέκυψε σε συνδυασμός από μετρήσεις που έγιναν ως εξής: για καθεμία γωνία ανύψωσης του πομπού που εξετάζοταν, «σαρώνονταν» οι γωνίες ανύψωσης του δέκτη ξεκινώντας από τη γωνία σε 0° , μέχρι τη γωνία για την οποία ξεπερνούσαν το άνω όριο του BER. Όταν πιανόταν το όριο 1.2×10^{-1} , οι μετρήσεις γι' αυτή τη γωνία ανύψωσης του πομπού σταματούσαν και για τις υπόλοιπες γωνίες μέχρι $\theta_{Rec. elev.} = 80^\circ$ το BER έπαιρνε τιμή 0.5. Έτσι, οι απότομες μεταβολές του BER και η αραιή διαμέριση των γωνιών ανύψωσης του πομπού δικαιολογούν τη μορφή των διαγραμμάτων.

Αρχικά, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας, το εύρος των γωνιών για το οποίο το BER που μετρήθηκε ήταν εντός των αποδεκτών ορίων δεν είναι αρκετά μεγάλο για το μέσο επίπεδο ισχύος εκπομπής που εφαρμόστηκε. Αν θεωρηθεί ως στόχος μία τιμή BER ίση με 10^{-3} [36], τότε τα όρια των γωνιών ανύψωσης τόσο του πομπού όσο και του δέκτη γίνονται στενότερα. Επιπροσθέτως, φαίνεται καθαρά ότι ανεξάρτητα από το σχήμα διαμόρφωσης, η μεγαλύτερη απόσταση περιόρισε σημαντικά τα ζεύγη των γωνιών για τα οποία η τιμή BER που μετρήθηκε ήταν μέσα στα αποδεκτά όρια. Αυτό είναι εύκολο να το παρατηρήσει κανείς, καθώς η περιοχή με σκούρο μπλε χρώμα κάτω αριστερά συρρικνώθηκε όταν η απόσταση τέθηκε ίση με 20 μέτρα στα διαγράμματα στο Σχήμα 3.49(γ) και στο Σχήμα 3.49(δ).

Όταν η εμβέλεια της ζεύξης ήταν 10 μέτρα και οι συνιστώσες οπτικής επαφής μειώνονταν σημαντικά, το σχήμα 4-PPM υπερεβούσε του Flip-OFDM

συμπληρώνοντας τα σχόλια που έχουν ήδη αναφερθεί για το Σχήμα 3.47 και το Σχήμα 3.48. Για παράδειγμα, για γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη ίσες με 30° , από τη διαβάθμιση των χρωμάτων στο Σχήμα 3.49(α) και στο Σχήμα 3.49(β) φαίνεται εύκολα ότι η τιμή του BER που μετρήθηκε για το 4-PPM είναι σχεδόν δύο τάξεις μικρότερη από αυτή που μετρήθηκε για το Flip-OFDM. Το σκούρο προς ανοιχτό μπλε χρώμα για το 4-PPM αντιστοιχεί σε εκθέτη περίπου -5 και άρα το BER θα είναι 10^{-5} . Για το Flip-OFDM, το πράσινο προς κίτρινο χρώμα αντιστοιχεί σε εκθέτη περίπου -3 , δηλαδή BER περίπου 10^{-3} . Επιπλέον, για γωνία ανύψωσης του πομπού ίση με 70° , η τιμή του BER που επιτεύχθηκε για το Flip-OFDM δεν ήταν ποτέ κάτω από 10^{-3} για όλες τις γωνίες ανύψωσης του δέκτη. Από την άλλη, για το 4-PPM και για $\theta_{Tr. elev.} = 70^\circ$, όσο υπάρχουν συνιστώσες οπτικής επαφής στη ζεύξη, η τιμή του BER ήταν κάτω από 10^{-4} . Τιμή BER $\approx 10^{-3}$ μετρήθηκε για γωνία ανύψωσης του δέκτη κοντά στις 20° .



Σχήμα 3.49. Δεκαδικός λογάριθμος του ρυθμού σφαλμάτων bits σε συνάρτηση των γωνιών ανύψωσης του πομπού ($\theta_{Tr. elev.}$) και του δέκτη ($\theta_{Rec. elev.}$) για (α) 10 μέτρα και Flip-OFDM, (β) 10 μέτρα και 4-PPM, (γ) 20 μέτρα και Flip-OFDM, (δ) 20 μέτρα και 4-PPM, όλα στα 265 nm και υπό συνθήκες αραιής ατμόσφαιρας.

Αν η απόσταση αυξηθεί στα 20 μέτρα, από το Σχήμα 3.49(γ) και το Σχήμα 3.49(δ), το σύνολο των γωνιών για το οποίο το Flip-OFDM επιτυγχάνει BER μικρότερο από 10^{-3} περιλάμβανε μόνο χαμηλές γωνίες ανύψωσης. Για το ζεύγος γωνιών 30° – 30° , το BER ήταν πάνω από 10^{-2} για το Flip-OFDM (περίπου 3×10^{-2}), ενώ για το 4-PPM η τιμή που επιτεύχθηκε ήταν μεν πάνω από 10^{-3} (περίπου 3×10^{-3}), αλλά παρέμεινε μία τάξη μεγέθους κάτω από το BER του Flip-OFDM. Η επικράτηση του 4-PPM μετριάζεται στις

πολύ μεγάλες γωνίες ανύψωσης όπου επιβάλλονται υψηλότερες απώλειες, επιβεβαιώνοντας όσα έχουν αναφερθεί. Για την ακραία περίπτωση όπου $\theta_{Tr. elev.} = 70^\circ$, το πλήθος των γωνιών ανύψωσης του δέκτη που έδωσαν BER λίγο πάνω από 10^{-2} και κάτω από 10^{-1} ήταν μεγαλύτερο από το αντίστοιχο πλήθος γωνιών για το Flip-OFDM. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις, το BER ήταν πάνω από 10^{-3} που τέθηκε ως στόχος.

Τα πειραματικά αποτελέσματα στο Σχήμα 3.49 μπορεί να είναι επικουρικά αυτών που παρουσιάστηκαν νωρίτερα, αλλά επιβεβαίωσαν όσα σχόλια αναφέρθηκαν για τη συμπεριφορά των δύο σχημάτων διαμόρφωσης βάσει των αποτελεσμάτων στο Σχήμα 3.47 και στο Σχήμα 3.48. Ταυτόχρονα, προέκυψε πλήρης εικόνα του BER στα μήκη που μετρήθηκε, έχοντας ένα πλήρη χαρακτηρισμό τόσο για τις απώλειες όσο και για τις επιδόσεις του σχήματος διαμόρφωσης.

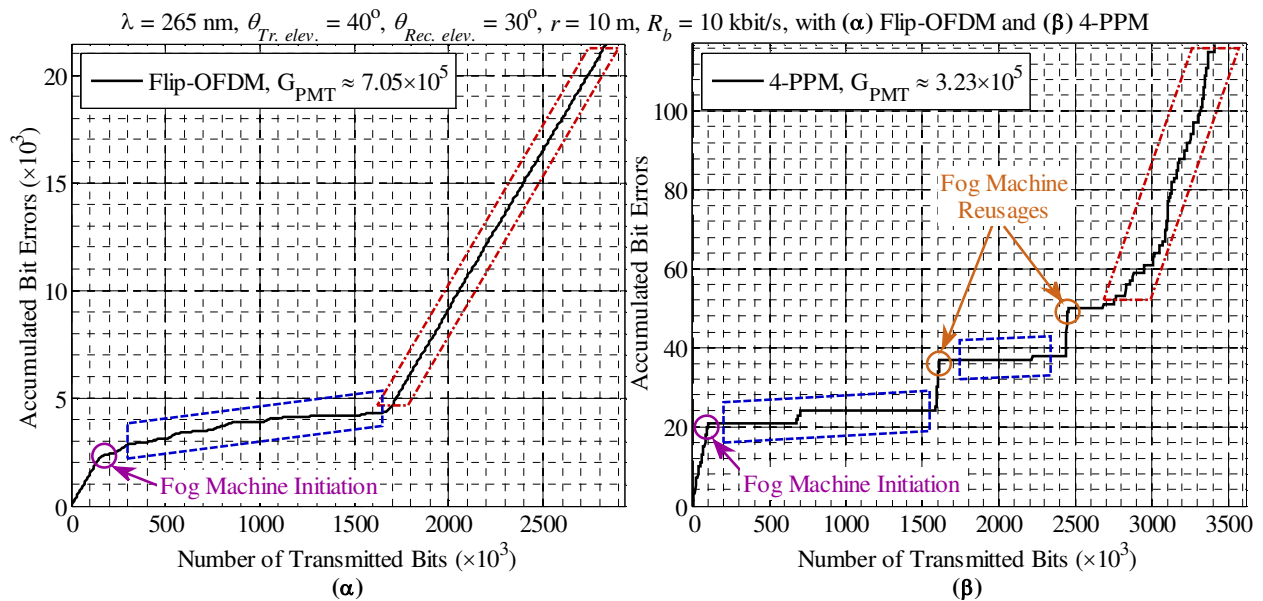
Στη συνέχεια τα σχήματα διαμόρφωσης αξιολογήθηκαν υπό την παρουσία ομίχλης μέσα στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που έχουν γίνει και αφορούσαν τις εκτιμήσεις των απωλειών και την εκτίμηση του BER και του SNR για μεταδιδόμενα σήματα, η ισχυρή σκέδαση σε πυκνότερα μέσα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο SNR για κανάλια χωρίς οπτική επαφή σε μικρές αποστάσεις (κάτω από 50 μέτρα). Επιπλέον, από τις παρατηρήσεις που αφορούσαν τα πειράματα εκτίμησης των απωλειών με και χωρίς ομίχλη στην προηγούμενη υποενότητα προκλήθηκε μείωση των απωλειών λόγω της επικράτησης της σκέδασης έναντι της απορρόφησης με την αύξηση της πυκνότητας του μέσου σε σκεδαστές. Αναμένεται ότι η μείωση των απωλειών θα οδηγήσει σε αύξηση της αφικνούμενης ισχύος στο δέκτη και βελτίωση των επιδόσεων καθώς όπως έχει ήδη περιγραφεί και αναφερθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, για μικρές αποστάσεις, ρυθμοί της τάξης των kilobit/s υποστηρίζονται σε μεγάλο εύρος γωνιών ανύψωσης. Επομένως, με τη χρήση της μηχανής ομίχλης έγινε μία απόπειρα μείωσης των απωλειών κατά τη μετάδοση των σημάτων υπό τις δύο διαμορφώσεις ώστε να εκτιμηθούν οι επιδόσεις για καθένα σχήμα διαμόρφωσης σε αραιό και πυκνό μέσο. Κατά τη διάρκεια της χρήσης της μηχανής ομίχλης, έγινε προσπάθεια να διατηρηθούν οι συνθήκες σταθερές καλύπτοντας με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ομοιογένεια το μέσο με την τεχνητή ομίχλη.

Όταν εμφανίστηκε τεχνητά ομίχλη μέσα στο μέσο, οι περιπτώσεις ζεύξεων που επιλέχθηκαν να εξεταστούν κάλυπταν σε γενικές γραμμές δύο συνθήκες οι οποίες ήταν ο σχετικά υψηλός ρυθμός σφαλμάτων bits υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας και η λειτουργία χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη στα 265 nm. Οι αποστάσεις ήταν μέχρι 20 μέτρα. Προφανώς, οι δύο συνθήκες δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Το όριο 10^{-4} θεωρήθηκε ως η υψηλή τιμή του BER υπό καθεστώς αραιού μέσου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε σε αυτή τη σειρά πειραμάτων ήταν ίδια για όλες τις περιπτώσεις ζεύξεων και ρυθμών που δοκιμάστηκαν.

Για την επίδραση της επίδρασης της ομίχλης στο BER, η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη τέθηκε στα 10 μέτρα, η γωνία ανύψωσης του πομπού ρυθμίστηκε να είναι ίση με 40° , ενώ αντίστοιχα η γωνία ανύψωσης του δέκτη ρυθμίστηκε στις 30° . Το κέρδος του PMT τέθηκε $G_{PMT} \approx 7.05 \times 10^5$. Ο ρυθμός μετάδοσης bits ήταν $R_b = 10$ kbit/s. Με τέτοιες γωνίες ανύψωσης, μπορούν να δομηθούν ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή πομπού και δέκτη και χωρίς υπερβολικά υψηλές απώλειες, όπως φάνηκε και στο Σχήμα 3.41(β). Όλες οι μετρήσεις σε αυτή την ομάδα μετρήσεων λαμβάνονταν σε πραγματικό χρόνο και ταυτόχρονα χιζόνταν οι σχετικές καμπύλες. Η αξιολόγηση του BER σε τμήματα των καμπυλών έγινε μετά την ολοκλήρωση της διάδοσης. Το Σχήμα 3.42 δείχνει τη μορφή της ζεύξης με την ταυτόχρονη ύπαρξη της μηχανής ομίχλης.

Τα αποτελέσματα για το Flip-OFDM, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.50(α), όπου τα συσσωρευμένα σφάλματα (για τα bits που μεταδόθηκαν) απεικονίζονται συναρτήσει του

πλήθους των μεταδιδόμενων bits. Στον οριζόντιο άξονα, απεικονίζεται το πλήθος των bits που έχουν μεταδοθεί από την εκκίνηση των μεταδόσεων. Κάθε τιμή του κατακόρυφου άξονα αντιπροσωπεύει το πλήθος των σφαλμάτων κατά τη φώραση. Επομένως, ένα σημείο της καμπύλης έχει ως τετμημένη το πλήθος των bits που αντιστοιχούν στο πλήθος των συμβόλων (ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που έχει εφαρμοσθεί) που έχουν μεταδοθεί και ληφθεί από το δέκτη, ενώ η τεταγμένη αντιστοιχεί στα συσσωρευμένα σφάλματα που συνέβησαν για το πλήθος των bits που έχουν μεταδοθεί στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η κλίση της καμπύλης σε ένα τέτοιο διάγραμμα αντιπροσωπεύει το BER. Ο λόγος που παρουσιάζονται κατ' αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα είναι για να αποδοθεί μία καλύτερη εικόνα της χρονικής εξέλιξης της επίδοσης του συστήματος με την αλλαγή των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Επομένως, όταν επήλθε κάποια αλλαγή στο ρυθμό μεταβολής της καμπύλης των συσσωρευμένων σφαλμάτων bits λόγω αλλαγής των συνθηκών στο περιβάλλον, δηλαδή λόγω της εμφάνισης ομίχλης, η εκτίμηση της κλίσης της καμπύλης τοπικά πριν και μετά την αλλαγή των συνθηκών έδωσε την επίδραση αυτής της αλλαγής που συνέβη στο BER. Η εκτίμηση γινόταν απομονώνοντας τμήματα της καμπύλης όπου η κλίση παρέμενε όσο το δυνατό σταθερότερη. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα στο Σχήμα 3.50(α), ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει τα συσσωρευμένα σφάλματα σε χιλιάδες. Αυτό σημαίνει ότι μία τιμή 10 στον άξονα αντιστοιχεί σε 10000 συσσωρευμένα εσφαλμένα bits, γι' αυτό και υπάρχει ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας 10^3 εντός της παρένθεσης.



Σχήμα 3.50. Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων bits για $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ, \theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, απόσταση πομπού-δέκτη $r = 10 \text{ m}$ και ρυθμό μετάδοσης bits $R_b = 10 \text{ kbit/s}$, όταν μεταδόθηκε (α) Flip-OFDM και (β) 4-PPM.

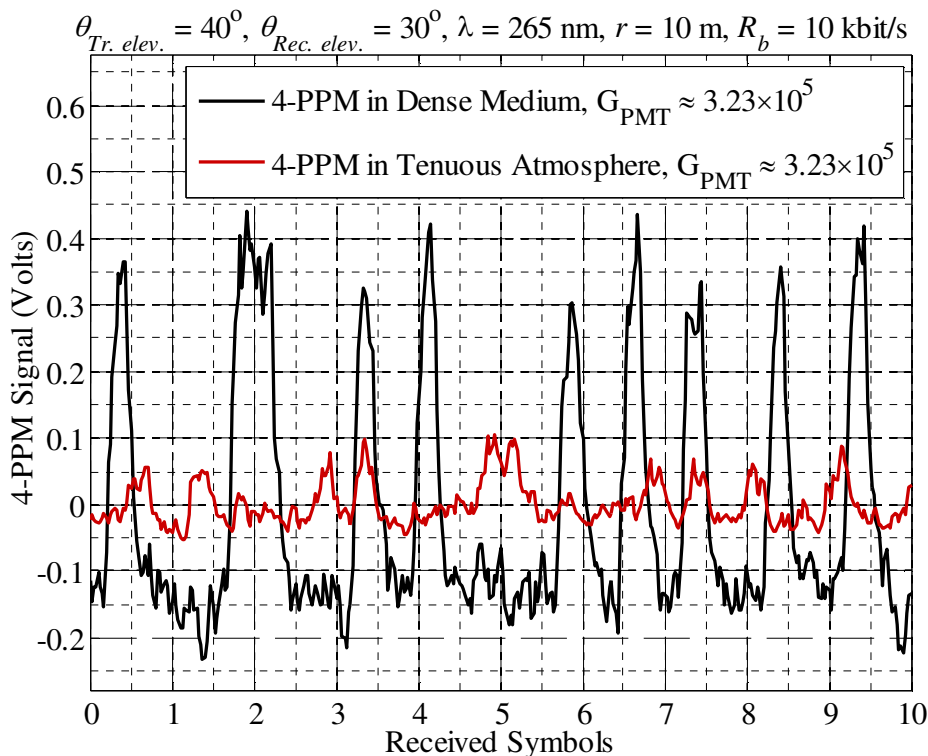
Η λειτουργία της μηχανής ομίχλης εκκίνησε μετά από τη μετάδοση 172000 bits (Σχήμα 3.50(α)). Το μπλε παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύει το τμήμα των συσσωρευμένων σφαλμάτων bits για περίπου 1345000 bits που έλαβε ο δέκτης. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, έγιναν 1529 σφάλματα σε bits, αποδίδοντας τοπικά μία τιμή BER περίπου 1.14×10^{-3} . Έπειτα η μηχανή παραγωγής ομίχλης σταμάτησε και η ομίχλη άρχισε να διαλύεται γρήγορα. Το υπόλοιπο πλήθος bits που μεταδόθηκαν καλύπτεται από το κόκκινο παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές. Η κλίση γι' αυτό το συγκεκριμένο τμήμα ήταν τοπικά 1.48×10^{-2} , καθώς εκτιμήθηκαν 16553 bits εσφαλμένα για 1118000 bits που έλαβε ο δέκτης. Αυτή η τιμή BER είναι κοντά σε αυτή που δόθηκε στο Σχήμα 3.47, για το ίδιο σετ γωνιών ανύψωσης και για ίδιες τις υπόλοιπες παραμέτρους (απόσταση, ρυθμός) σε περιβάλλον με καθαρή ατμόσφαιρα.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για το 4-PPM υπό την ίδια ακριβώς διευθέτηση με αλλαγή στο κέρδος του πολλαπλασιαστή σε τιμή $G_{\text{PMT}} \approx 3.23 \times 10^5$, προέκυψε το Σχήμα 3.50(β). Μετά την εκκίνηση της λειτουργίας της μηχανής παραγωγής ομίχλης, για ένα τμήμα από 1350000 bits που αντιπροσωπεύεται από το πρώτο μπλε παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες γραμμές, εμφανίστηκαν μόλις 3 λάθη, τα οποία έδωσαν τοπικά BER κατά προσέγγιση ίσο με 2.22×10^{-6} . Κατά τη διάρκεια της επαναχρησιμοποίησης της μηχανής ομίχλης που αντιστοιχεί στο δεύτερο μπλε παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες γραμμές, προέκυψε μόνο ένα σφάλμα για 600000 bits, δίνοντας $\text{BER} \approx 1.67 \times 10^{-6}$. Αυτή η συμπεριφορά δείχνει ότι η βελτίωση στις επιδόσεις μπορεί να αναπαραχθεί. Η δεύτερη επαναχρησιμοποίηση της μηχανής ομίχλης μετά από τη μετάδοση 2450000 bits συνολικά δεν απέδωσε τα ίδια αποτελέσματα με τις προηγούμενες δύο χρήσεις της μηχανής. Το πρόβλημα δεν ήταν κάποια υποβάθμιση των επιδόσεων από την εμφάνιση της τεχνητής ομίχλης, αλλά η γρήγορη διάλυσή της λόγω απότομης εμφάνισης ριπής ανέμου. Έτσι, παρά το γεγονός ότι για περισσότερα από 200000 bits δεν προέκυψε σφάλμα κατά τη δεύτερη επαναχρησιμοποίηση της μηχανής, η λειτουργία της διεκόπη και η ομίχλη διαλύθηκε τάχιστα. Μετά τη διάλυση της ομίχλης, μετρήθηκε $\text{BER} \approx 1.02 \times 10^{-4}$, αφού για 627000 bits συνέβησαν 64 σφάλματα στα bits. Τα 627000 bits περιλαμβάνονται εντός του κόκκινου παραλληλογράμμου με τις διακεκομμένες-διάσπικτες γραμμές που βρίσκεται στο πάνω δεξιά τμήμα της γραφικής παράστασης στο Σχήμα 3.50(β). Η τιμή του BER που μετρήθηκε ήταν λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή στο διάγραμμα Σχήμα 3.47, για $\theta_{\text{Tr. elev.}} = 40^\circ$ και $\theta_{\text{Rec. elev.}} = 30^\circ$. Αυτή η ασυμφωνία αποδίδεται σε κάποια πιθανόν κακή ευθυγράμμιση (στην αρχική μέτρηση στο Σχήμα 3.47), σε κάποιο λάθος κατά τον καθορισμό των γωνιών ανύψωσης κ.α. Το πείραμα επαναλήφθηκε για τις ίδιες συνθήκες για το 4-PPM και υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας ο ρυθμός σφαλμάτων bits εκτιμήθηκε περίπου στο 10^{-4} και πάλι, ενισχύοντας το επιχείρημα της κακής ευθυγράμμισης ή την κακή ρύθμιση των γωνιών ανύψωσης, καθώς οι μετρήσεις στο Σχήμα 3.50 πραγματοποιήθηκαν διαφορετική μέρα από αυτή κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στο Σχήμα 3.47. Τα αποτελέσματα στο Σχήμα 3.50 έχουν προκύψει από τη νέα βαθμονόμηση του συστήματος.

Μένοντας στο 4-PPM και στις συνθήκες υπό τις οποίες προέκυψε το Σχήμα 3.50(β), αξίζει να εξεταστεί πώς επηρεάστηκε το σήμα στο πεδίο του χρόνου από την παρουσία της ομίχλης. Αυτή η επίδραση φαίνεται στο Σχήμα 3.51. Δέκα διαδοχικά 4-PPM σύμβολα που αναπαριστώνται από τη μαύρη καμπύλη αντιστοιχούν σε τμήμα της καμπύλης συσσωρευμένων σφαλμάτων bits από το Σχήμα 3.50(β) όπου η ομίχλη επηρεάζει θετικά το ρυθμό BER και δεν εμφανίζεται σφάλμα (η κλίση της καμπύλης μηδενίζεται). Στο ίδιο σχήμα, 10 συνεχόμενα σύμβολα που αναπαριστώνται από την κόκκινη καμπύλη αντιστοιχούν σε ένα τμήμα της καμπύλης στο Σχήμα 3.50(β) όπου η ομίχλη είχε διαλυθεί. Πρόκειται για λαμβανόμενα σήματα μετά τον TIA (Σχήμα 3.39) και πιο συγκεκριμένα είναι τα σήματα που πέρασαν στον υπολογιστή και τα οποία θα έβλεπε κανείς στον παλμογράφο. Ωστόσο, είναι τα σήματα που πέρασαν μέσω της κάρτας ήχου στον υπολογιστή και αποθηκεύτηκαν σε αυτόν. Ο κατακόρυφος άξονας αφορά την μετρούμενη τάση του σήματος. Ο οριζόντιος άξονας αφορά τη χρονική εξέλιξη των λαμβανόμενων συμβόλων, αλλά όχι υπό μορφή μονάδων χρόνου. Με αυτή τη μορφή είναι ευδιάκριτη η εξέλιξη των συμβόλων και η μορφή του 4-PPM με θυρίδες με και χωρίς παλμό. Για παράδειγμα, στη μαύρη καμπύλη που αντιστοιχεί στο

* Επισημαίνεται ότι για το πρώτο τμήμα της καμπύλης συσσωρευμένων σφαλμάτων bits πριν την εκκίνηση της λειτουργίας της μηχανής παραγωγής ομίχλης στο Σχήμα 3.50(β), 20 από τα 88800 bits εκτιμήθηκαν λανθασμένα και η τιμή BER ήταν περίπου 2.25×10^{-4} . Ωστόσο, θεωρήθηκε μικρό το πλήθος το bits για την εκτίμηση του BER. Όμοια, μικρό ήταν το πλήθος των bits για την εκτίμηση του BER μετά την αρχική και την πρώτη επαναχρησιμοποίηση της μηχανής, όπου και πάλι το BER ήταν της τάξης του 10^{-4} τοπικά.

λαμβανόμενο σήμα για πυκνό μέσο, το πέμπτο εικονιζόμενο σύμβολο ξεκινάει με παλμό για να ακολουθήσουν τρεις κενές θυρίδες. Όμοια, στην κόκκινη καμπύλη που αντιστοιχεί στο λαμβανόμενο σήμα για αραιό μέσο, το όγδοο σύμβολο ξεκινάει με κενή θυρίδα, ακολουθεί ένα παλμός για να ακολουθήσουν δύο κενές θυρίδες. Η χρονική απεικόνιση του οριζόντιου άξονα θα προέκυπτε αν απλά λαμβανόταν υπόψη ότι για ρυθμό 10 kbit/s, η διάρκεια ενός συμβόλου είναι 200 μsec . Από τις ροές των συμβόλων για τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας του καναλιού, γίνεται φανερό ότι η εντονότερη σκέδαση εξαιτίας της εμφάνισης ομίχλης έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο ισχυρό λαμβανόμενο σήμα που μπορεί εύκολα να αποδιαμορφωθεί χωρίς έπειτα να προκύψουν σφάλματα. Όταν η ομίχλη εξαφανίστηκε, το σήμα υπέστη σοβαρή εξασθένηση από το κανάλι εξαιτίας της αύξησης των απωλειών και η επιτυχής αποδιαμόρφωση έγινε δυσκολότερη καταλήγοντας σε χειρότερη επίδοση.

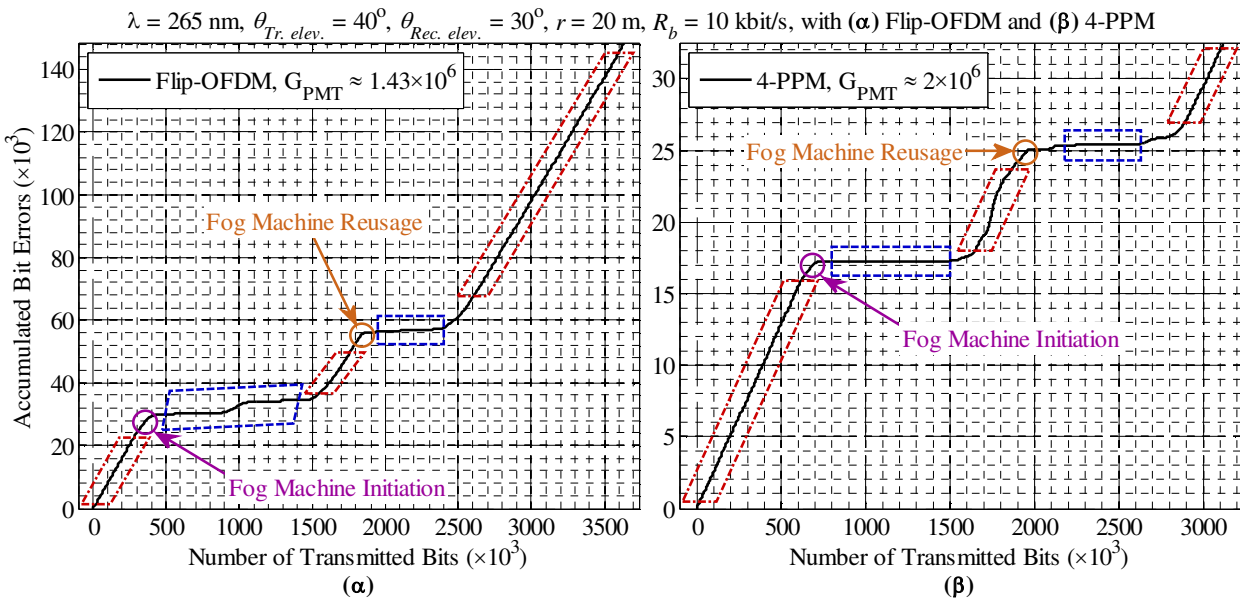


Σχήμα 3.51. Δέκα 4-PPM σύμβολα σαν σήμα τάσης, μετά από διάδοση σε ένα μέσο πυκνό σε σκεδαστές λόγω ομίχλης (μαύρη καμπύλη). Η μετάδοση σε ένα αραιό μέσο οδήγησε σε σήμα σημαντικά μικρότερου πλάτους. Οι συνθήκες με και χωρίς ομίχλη ήταν αυτές υπό τις οποίες προέκυψε το Σχήμα 3.50(β). $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ, \theta_{Rec. elev.} = 30^\circ, r = 10 \text{ m}, R_b = 10 \text{ kbit/s}$.

Τα αποτελέσματα στα 10 μέτρα έδωσαν μία ενδιαφέρουσα εικόνα όσον αφορά την ελάττωση του BER εξαιτίας της εμφάνισης ομίχλης. Ένας αντικειμενικός στόχος θα ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς κάθε σχήματος διαμόρφωσης υπό την παρουσία ή την απουσία ή ύστερα από τη διάλυση της ομίχλης στα 20 μέτρα. Η διερεύνηση επικεντρώθηκε σε ζεύξεις υπό καθεστώς έλλειψης οπτικής επαφής, για ενδιάμεσες γωνίες ανύψωσης για τις οποίες μετρήθηκε υψηλό BER. Οι ενδιάμεσες γωνίες εξασφάλισαν τον αναγκαίο συγχρονισμό του συστήματος, παρά την τιμή BER της τάξης του 10^{-2} που επιτυγχάνεται για τέτοιες γωνίες, όπως φάνηκε στο Σχήμα 3.49(γ) και (δ).

Παραμένοντας σε ρυθμό 10 kbit/s, αρχικά για το Flip-OFDM, με $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ, \theta_{Rec. elev.} = 30^\circ, r = 20 \text{ m}$ και κέρδος του PMT $G_{PMT} \approx 1.43 \times 10^6$, προέκυψε το Σχήμα 3.52(α). Τοπικά μετρήθηκε μία τιμή BER 8.04×10^{-2} υπό καθαρή ατμόσφαιρα, καθώς για λίγο πάνω από 260000 bits, προέκυψαν 20914 λάθη στις αποφάσεις για τα bits που έλαβε ο δέκτης και η τιμή είναι πολύ κοντά στην τιμή 7.60×10^{-2} που δίνεται στο Σχήμα 3.47 και στο Σχήμα 3.49(γ). Αυτή η περιοχή έχει απομονωθεί από το πρώτο κόκκινο παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές κάτω αριστερά στο σχήμα.

Με την λειτουργία της μηχανής ομίχλης, το BER βελτιώθηκε και έπεσε σε μία τιμή 4.88×10^{-3} όπως τονίζεται από το πρώτο μπλε παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες γραμμές. Αυτή η τιμή BER αντιστοιχεί σε 4393 σφάλματα μετά από τη μετάδοση 900000 bits και είναι πάνω από μία τάξη μεγέθους μικρότερη σε σχέση με την τιμή BER για τη μετάδοση στην αραιή ατμόσφαιρα. Μετά τη γρήγορη διάλυση της ομίχλης, για 210000 bits προέκυψαν 13414 λάθη, αποδίδοντας τοπικά μία τιμή BER $\approx 6.39 \times 10^{-2}$ και αυτή η περιοχή έχει απομονωθεί από το δεύτερο κόκκινο παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές. Μετά από τη μετάδοση περίπου 1850000 bits συνολικά, η μηχανή ομίχλης χρησιμοποιήθηκε ξανά και εκτιμήθηκε μία τοπική τιμή BER περίπου 2.53×10^{-3} (1139 λάθη σε 450000 bits) και αφορά τα τμήμα που έχει απομονωθεί από το δεύτερο μπλε παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες γραμμές. Αυτή η τιμή είναι πολύ κοντά σε αυτή που εκτιμήθηκε κατά την αρχική χρήση της μηχανής ομίχλης. Αυτό είναι μία καθαρή επιβεβαίωση ότι τα αποτελέσματα επαναλήφθηκαν για τη συγκεκριμένη τοπολογία πομπού-δέκτη ως προς την απόσταση μεταξύ τους και τις γωνίες ανύψωσης. Επιπλέον, η βελτίωση εμφανίζεται και σε απόσταση 20 μέτρων υπό το καθεστώς μη οπτικής επαφής πομπού και δέκτη. Στο τελευταίο τμήμα (πάνω δεξιά στο τελικό τμήμα της καμπύλης), εκτιμήθηκε μία τιμή BER $\approx 7.81 \times 10^{-2}$ με 78084 bits να έχουν εκτιμηθεί λανθασμένα για 1000020 bits που μεταδόθηκαν στο διάστημα που έχει απομονωθεί από το κόκκινο παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές. Αυτό το διάστημα αντιστοιχεί σε μετάδοση μετά τη διάλυση της ομίχλης από το τέλος της δεύτερης χρήσης της.



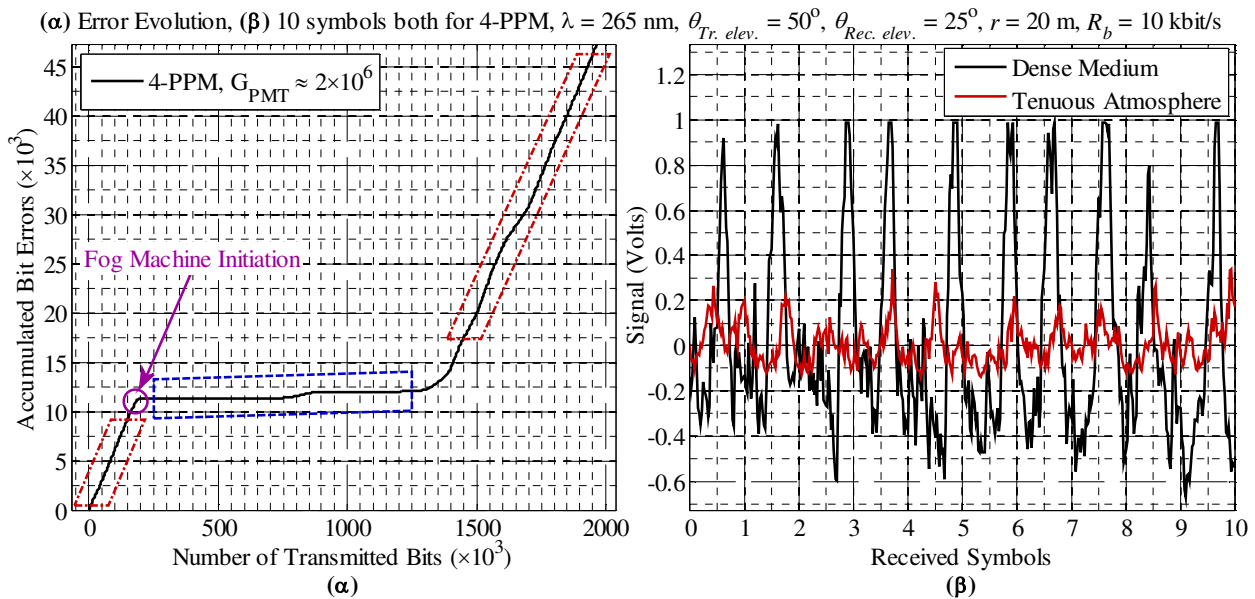
Σχήμα 3.52. Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων μετά από μετάδοση (α) Flip-OFDM και (β) 4-PPM με $\theta_{Tr, elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec, elev.} = 30^\circ$, απόσταση πομπού-δέκτη $r = 20 \text{ m}$, $R_b = 10 \text{ kbit/s}$.

Διατηρώντας τη διάταξη πομπού και δέκτη και όλες τις παραμέτρους και μεταβάλλοντας μόνο το σχήμα διαμόρφωσης και το κέρδος του ενισχυτή σε τιμή $G_{PMT} \approx 2.00 \times 10^6$, για το 4-PPM προέκυψε το Σχήμα 3.52(β). Σημειώνεται ότι η συσσώρευση λαθών στον κατακόρυφο άξονα μετράται όπως και στο Σχήμα 3.52(α), δηλαδή οι αναγραφόμενες τιμές στον κατακόρυφο άξονα είναι σε χιλιάδες λάθη, πχ τιμή 20 σημαίνει 20000 σφάλματα. Αρχικά, υπό καθαρή ατμόσφαιρα, για 600000 bits που μεταδόθηκαν, προέκυψαν 15393 λάθη κατά τη φώραση του σήματος. Τοπικά, αυτό το τμήμα που εστιάζεται από το κόκκινο παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές έδωσε BER περίπου 2.57×10^{-2} μία τιμή πολύ κοντά στην τιμή 2.61×10^{-2} που δόθηκε στο Σχήμα 3.47 και στο Σχήμα 3.49(δ). Λίγο πριν τη μετάδοση συνολικά 700000 bits, εκκίνησε η λειτουργία της μηχανής παραγωγής ομίχλης. Κατά τη λειτουργία της μηχανής έγιναν συνολικά 20 λάθη σε συνολικά 700200 bits που αντιστοιχούν στο τμήμα

που καλύπτεται από το πρώτο μπλε παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες γραμμές στην αριστερή πλευρά του Σχήμα 3.52(β). Αυτό σημαίνει ότι υπό την παρουσία ομίχλης τοπικά ο ρυθμός σφαλμάτων bit διαμορφώθηκε σε μία τιμή περίπου 2.86×10^{-5} , δηλαδή τρεις τάξεις μεγέθους κάτω από την αρχική τιμή. Αυτή η μεταβολή δείχνει μία τάση σημαντικής μείωσης του ρυθμού σφαλμάτων bits με την αλλαγή των συνθηκών. Δεν ήταν δυνατό να μετρηθούν περισσότερα bits, ώστε να φανεί αν θα παρέμενε ίδια η κλίση (και άρα το BER), καθώς το περιβάλλον δεν παρέμεινε σταθερό για περισσότερο χρόνο. Ωστόσο, τα 20 λάθη συνέβησαν ύστερα από τη μετάδοση μεγαλύτερου πλήθους bits από ότι στο αρχικό κομμάτι υπό καθαρή ατμόσφαιρα. Μετά τη διάλυση της ομίχλης, για 219600 bits συνέβησαν 5702 bits, αποδίδοντας τοπικά $BER \approx 2.60 \times 10^{-2}$ και αυτό το τμήμα απομονώθηκε από το κεντρικό κόκκινο παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές. Στη συνέχεια, μετά από 1950000 bits επαναχρησιμοποιήθηκε η μηχανή ομίχλης και η κατάσταση στο μέσο παρέμεινε σταθερή για 450000 bits. Η μη ομοιόμορφη κάλυψη του χώρου δεν οδήγησε στα ίδια αποτελέσματα με την πρώτη χρήση της μηχανής, καθώς συνέβησαν 86 σφάλματα και το BER ήταν περίπου 1.91×10^{-4} . Αυτή η μεταβολή που έδωσε βελτιωμένα αποτελέσματα κατά δύο τάξεις μεγέθους, δεν αναιρεί την προηγούμενη μέτρηση υπό καθεστώς ομίχλης, καθώς η αστάθεια του μέσου δεν επέτρεψε να επιτευχθεί για δεύτερη φορά η αρχική τάση βελτίωσης κατά περισσότερο από δύο τάξεις μεγέθους. Η αστάθεια φαίνεται και μετά τα 2700000 bits όπου υπάρχει μία τάση να σταθεροποιηθεί η κλίση σε μικρότερη τιμή μετά το μικρό ανέβασμα στα 2630000 bits. Τέλος, μετά τη διάλυση της ομίχλης και της σταθεροποίησης της κλίσης στο τελευταίο τμήμα της καμπύλης, για λίγο πάνω από 215000 bits προέκυψαν 5239 εσφαλμένα bits και το BER εκτιμήθηκε τοπικά περίπου ίσο με 2.43×10^{-2} . Φαίνεται, λοιπόν, ότι ακόμα και με την αστάθεια του μέσου, ήταν δυνατή η βελτίωση κατά δύο τάξεις όσον αφορά το BER υπό τη λειτουργία της μηχανής ομίχλης. Έτσι, και για τα 20 μέτρα ήταν δυνατή η επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων και για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης, παρά τα όποια πιθανά προβλήματα κατά την προσπάθεια ομοιογενούς κάλυψης του μέσου λόγω της μεγαλύτερης απόστασης. Ο τρόπος φώρασης και η διαφορετική κλίση της καμπύλης του BER συναρτήσεως του ηλεκτρικού SNR του παλμικού σήματος ευνόησαν το παλμικό σχήμα 4-PPM να πετύχει μεγαλύτερες μεταβολές του BER υπό τη λειτουργία της μηχανής ομίχλης και στη μεγαλύτερη απόσταση.

Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι στα δύο προηγούμενα παραδείγματα για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης στα 20 μέτρα, όταν χρησιμοποιούνταν η μηχανή παραγωγής ομίχλης ο δέκτης έμπαινε οριακά στον κόρο, αλλά μόνο κατά τμήματα της μετάδοσης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να κόβεται τμήμα του θορύβου βολής από τις κυματομορφές και από τους παλμούς, όταν μεταδίδεται Flip-OFDM και 4-PPM, αντίστοιχα. Τα προηγούμενα σχόλια σχετικά με τη βελτίωση λόγω της εμφάνισης ομίχλης εξακολουθούν να ισχύουν, αλλά υπάρχει και μία «πρόσθετη βοήθεια» από το γεγονός ότι εξαντλείται η περιοχή γραμμικής λειτουργίας του δέκτη. Αυτός ο περιορισμός εμφανίστηκε από την κάρτα ήχου του υπολογιστή που δέχεται σήματα στην είσοδό της (line-in) με πλάτος μέχρι 1 Volt (και εύρος τάσεων από -1 Volt ως 1 Volt). Όταν η εισερχόμενη τάση ήταν πάνω από 1 Volt, το σήμα ψαλιδιζόταν. Αυτός ο ψαλιδισμός με προσεκτική απόδοση τάσεων στον PMT ήταν δυνατό να αποφευχθεί στις μεταδόσεις μέχρι 10 μέτρα. Στα 20 μέτρα, όμως, τα χαμηλά επίπεδα ισχύος εκπομπής επέβαλλαν υψηλές τάσεις στον PMT για την επιτυχή κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων. Μεγαλύτερο κέρδος σημαίνει και μεγαλύτερη διακύμανση για το θόρυβο βολής, όπως φαίνεται και από τις σχέσεις (3.21), (3.22). Αυτό σημαίνει ότι ήταν αναπόφευκτο να εμφανιστούν τάσεις στο ηλεκτρικό επίπεδο για το σήμα που ήταν μεγαλύτερες από το μέγιστο όριο του 1 Volt. Άρα, προέκυψε ένα επίπλαστο «κέρδος» καθώς από τον ψαλιδισμό καθάριζαν ελαφρώς οι κορυφές των σημάτων. Αυτό μπορεί να φανεί με ένα παράδειγμα σαν αυτά που εξετάστηκαν ως τώρα, έχοντας ως επίκεντρο το 4-PPM. Στο 4-PPM, αν εξαιρεθεί ο

θόρυβος βολής από τις κορυφές των παλμών στις σχετικές θυρίδες, οι παλμοί θα αποκτήσουν τετράγωνη μορφή στην κορυφή τους. Βέβαια, επειδή η λειτουργία του δέκτη υπό καθεστώς κόρου κάλυπτε τμήματα των μεταδόσεων με τη μηχανή ομίχλης σε λειτουργία, στις περιπτώσεις στα 20 μέτρα που δοκιμάστηκαν, πρώτα ξεκινούσε η μεταβολή του BER με αλλαγή της κλίσης των καμπυλών των συσσωρευμένων σφαλμάτων και έπειτα εισερχόταν κατά τμήματα των μεταδόσεων στον κόρο ο δέκτης. Επομένως, τα αποτελέσματα και οι βελτιώσεις στο BER που εμφανίστηκαν δεν καθορίζονταν από τον ψαλιδισμό των σημάτων, αλλά ο ψαλιδισμός έδινε μία πρόσθετη βελτίωση για κάποια διαστήματα κατά τα οποία διατηρούνταν χαμηλότερα το ήδη χαμηλό BER λόγω της εμφάνισης της ομίχλης.



Σχήμα 3.53. (α) Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων μετά από μετάδοση 4-PPM και (β) δέκα 4-PPM σύμβολα σαν σήμα τάσης, μετά από διάδοση σε ένα μέσο πυκνό σε σκεδαστές λόγω ομίχλης (μαύρη καμπύλη). Η μετάδοση σε ένα αραιό μέσο οδήγησε σε σήμα σημαντικά μικρότερου πλάτους. Τα αποτελέσματα προέκυψαν για $\theta_{Tr. elev.} = 50^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 25^\circ$, απόσταση πομπού-δέκτη $r = 20$ m, $R_b = 10$ kbit/s.

Για να φανεί ποια είναι η επίδραση στη μορφή των παλμών, η γεωμετρική διάταξη τροποποιήθηκε για το 4-PPM ώστε η αρχική τιμή του BER που θα εκτιμηθεί να είναι κοντά σε αυτή που μετρήθηκε προηγουμένως για το Flip-OFDM ($\sim 8 \times 10^{-2}$). Παρατηρώντας το Σχήμα 3.49(δ), BER για αραιή ατμόσφαιρα αρκετά πάνω από 10^{-2} επιτεύχθηκε για το ζεύγος $\theta_{Tr. elev.} = 50^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 25^\circ$ (4.29×10^{-2}). Γι' αυτή την τοπολογία πομπού και δέκτη εξακολουθεί να δομείται μία ζεύξη χωρίς οπτική επαφή μεταξύ των δύο άκρων. Το κέρδος του PMT ήταν σχεδόν ίσο με 2.00×10^6 . Υπό καθαρή ατμόσφαιρα, αρχικά εκτιμήθηκε μία τιμή BER περίπου ίση με 6.17×10^{-2} (8632 σφάλματα σε 139800 σταλμένα bits) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.53(α), μία τιμή ελαφρώς υψηλότερη από αυτή που μετρήθηκε και απεικονίστηκε στο Σχήμα 3.49(δ). Η μικρή απόκλιση από την αρχική τιμή και πάλι μπορεί να αποδοθεί σε κάποια κακή ευθυγράμμιση ή κακό καθορισμό των γωνιών ανύψωσης, καθώς η νέα τιμή BER είναι κοντά σε αυτή που μετρήθηκε για γωνία ανύψωσης δέκτη 26.25° . Σ' αυτό το διάστημα, οι παλμοί έχουν μορφή όπως αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3.53(β) για τα δέκα σύμβολα 4-PPM με κόκκινο χρώμα. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυσδιάκριτα τα όρια μεταξύ θυρίδων με ενθόρυβους παλμούς και θυρίδων χωρίς παλμούς αλλά μόνο με θόρυβο, με αποτέλεσμα να δικαιολογείται η υψηλή τιμή για το BER τοπικά. Επιστρέφοντας στο Σχήμα 3.53(α), το μπλε παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες γραμμές απομονώνει ένα τμήμα της καμπύλης που αντιστοιχεί στη συσσώρευση σφαλμάτων υπό τη χρήση της μηχανής ομίχλης. Γι' αυτό το τμήμα, το BER τοπικά εκτιμήθηκε περίπου 7.99×10^{-4} , καθώς σε 1000200 bits προέκυψαν μόλις 799

λανθασμένες αποφάσεις bits. Μέσα από αυτό το διάστημα, κατά το οποίο το BER μειώθηκε κατά σχεδόν δύο τάξεις μεγέθους, απομονώθηκαν 10 διαδοχικά σύμβολα τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 3.53(β) με μαύρο χρώμα. Φαίνεται καθαρά ότι με την εμφάνιση ομίχλης οι απώλειες μειώθηκαν και το πλάτος των παλμών αυξήθηκε σημαντικά. Επιπλέον, είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι στη διάρκεια των συμβόλων 3, 4 και 5 οι εισερχόμενοι παλμοί στην κάρτα ήχου του υπολογιστή έχουν πλάτος μεγαλύτερο από 1 Volt και αυτό φαίνεται από τον τετραγωνισμό των κορυφών αυτών των παλμών. Αντίθετα, οριακά το 6ο, και τα σύμβολα 7 και 9 που είναι εκτός κόρου παρουσιάζουν έντονο θόρυβο βολής στις κορυφές των παλμών. Παρά τη μεγάλη αλλαγή λόγω της μείωσης απωλειών, ο τετραγωνισμός των κορυφών των παλμών διευκολύνει τη φώραση του 4-PPM. Μετά τη διακοπή της μηχανής, η ομίχλη και πάλι εξαφανίστηκε γρήγορα, και το BER αποκαταστάθηκε ξανά σε τιμή κοντά στην αρχική, αφού με 28876 bits λανθασμένες αποφάσεις για 500400 bits που μεταδόθηκαν στο συγκεκριμένο διάστημα που απομονώνεται από το κόκκινο παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές, τοπικά προκύπτει $BER \approx 5.77 \times 10^{-2}$.

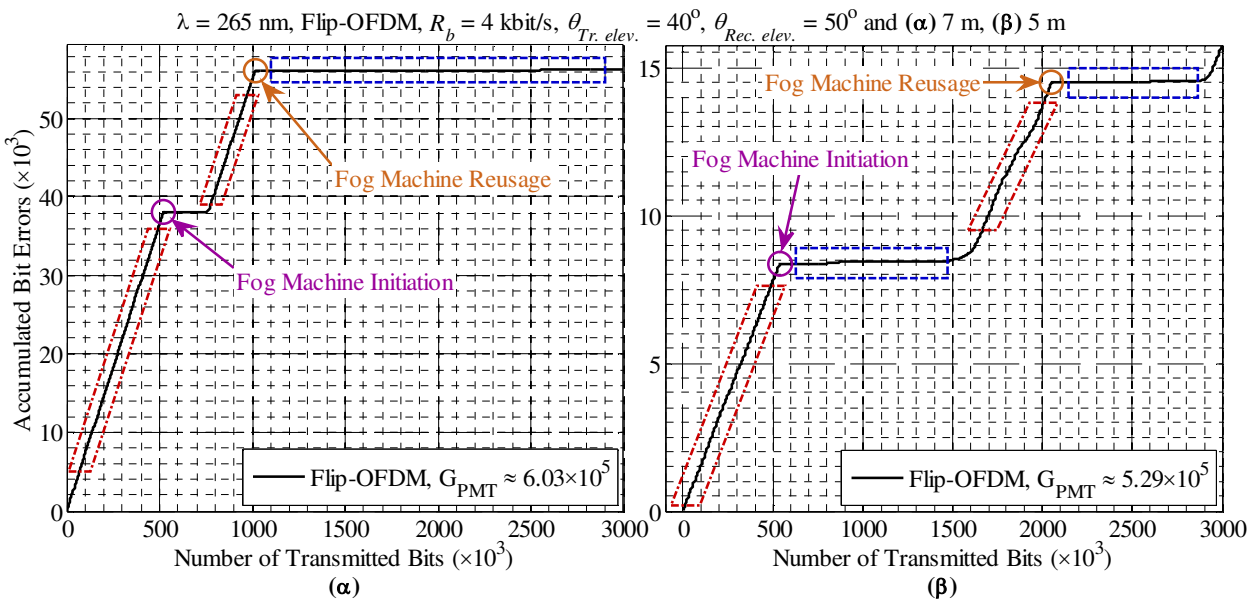
Αυτό που επιβεβαιώθηκε από τα συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα είναι ότι η αλλαγή στο BER προέρχεται από την τάση μείωσης των απωλειών με την εμφάνιση της ομίχλης. Επομένως, πρώτα θα υπάρξει αλλαγή του BER και έπειτα θα ακολουθήσουν κάποιες θυρίδες με παλμούς κατά τη διάρκεια των οποίων ο δέκτης ενδεχομένως να μπει σε καθεστώς κόρου.

Για να επιβεβαιωθεί ότι η βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί και υπό διαφορετικό ρυθμό δεδομένων, για το Flip-OFDM οι γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη τέθηκαν ίσες με $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 50^\circ$, αντίστοιχα, ενώ η απόσταση $r = 7$ m, το κέρδος του PMT $G_{PMT} \approx 6.03 \times 10^5$ και ο ρυθμός 4 kbit/s. Γι' αυτό το ρυθμό απαιτήθηκαν 12 υποφέροντα με Q-PSK ωφέλιμα σύμβολα. Τα υποφέροντα $6+4 \times i$, $i = 0, 1, \dots, 4$ χρησιμοποιήθηκαν ως πιλοτικά υποφέροντα, με το 22ο να είναι το τελευταίο πιλοτικό υποφέρον και τα ενδιάμεσα 12 υποφέροντα σε ομάδες των τριών μετά το 6ο υποφέρον να αποτελούν τα υποφέροντα με ωφέλιμα Q-PSK σύμβολα. Τα πρώτα 5 υποφέροντα (συμπεριλαμβανομένου του DC) δε χρησιμοποιούνταν και είχαν περιεχόμενο 0.

Τα αποτελέσματα φαίνονται και στο Σχήμα 3.54(α). Τα δύο κόκκινα παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές υποδεικνύουν τα τμήματα της καμπύλης συσσωρευμένων σφαλμάτων bit που αντιστοιχούν σε αραιή ατμόσφαιρα. Η κλίση και των δύο τμημάτων ήταν πάνω από 7×10^{-2} (31001 λανθασμένα bits για 423720 bits και 14000 εσφαλμένα bits για 197712 bits, αντίστοιχα). Όταν χρησιμοποιήθηκε η μηχανή ομίχλης, για 1800000 bits που υποδεικνύεται από το μπλε παραλληλόγραμμο με τα διακεκομμένες γραμμές εμφανίστηκαν μόνο 150 εσφαλμένα bits, αποδίδοντας τοπικά $BER \approx 8.33 \times 10^{-5}$.

Μένοντας στη διάταξη πομπού και δέκτη που μόλις περιγράφηκε, αξίζει να φανεί η μορφή των αστερισμών μετά τον FFT στο δέκτη και πριν την ανάκτηση των δεδομένων με τη διαίρεση με την απόκριση ανά υποφέρον ανάλογα με τις συνθήκες κατά τη μετάδοση. Αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 3.55(α). Πιο συγκεκριμένα, από το πρώτο τμήμα της καμπύλης στο Σχήμα 3.54(α) για μετάδοση υπό καθαρή ατμόσφαιρα, απομονώθηκαν 24000 Q-PSK σύμβολα από 2000 διαδοχικά Flip-OFDM σύμβολα (με 12 υποφέροντα ωφέλιμων Q-PSK συμβόλων ανά σύμβολο) και αυτά απεικονίζονται στο εσωτερικό διάγραμμα με κόκκινο χρώμα. Επιπλέον, οι τιμές των συμβόλων πολλαπλασιάστηκαν επί 5 ώστε να φανεί ποια είναι η επίδραση της αλλαγής των συνθηκών με τη λειτουργία των μηχανής παραγωγής ομίχλης. Το ίδιο διάγραμμα φαίνεται Σχήμα 3.55(β) στις πραγματικές διαστάσεις των συμβόλων μετά την εφαρμογή του FFT. Ο εσωτερικός αστερισμός αντιστοιχεί σε ένα τμήμα της μετάδοσης που έδωσε ρυθμό σφαλμάτων bits μεγαλύτερο από 7×10^{-2} , όπως ήδη επισημάνθηκε. Από την

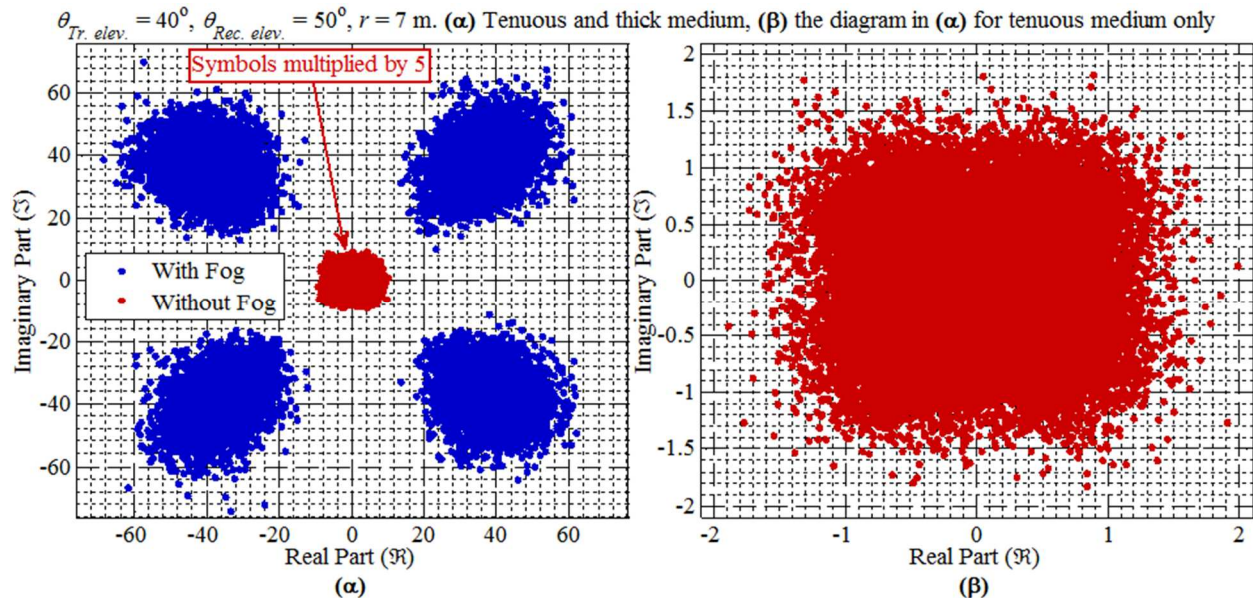
επίδραση των απωλειών, η υψηλή τιμή για το BER δικαιολογείται, αφού μετά βίας διακρίνεται η τετράγωνη μορφή του αστερισμού Q-PSK. Αντίθετα, ο εξωτερικός αστερισμός με μπλε χρώμα, που προέκυψε απομονώνοντας και πάλι 24000 bits, αντιστοιχεί σε ένα τμήμα της μετάδοσης περίπου στο μέσο της καμπύλης που περιβάλλεται από το μπλε παραλληλόγραμμο με τις διακεκομμένες γραμμές στο Σχήμα 3.54(α) και για το οποίο τμήμα δεν προέκυψαν λάθη. Φαίνεται καθαρά ότι ο αστερισμός είναι πιο καθαρός λόγω της εμφάνισης ομίχλης στο ασύρματο μέσο επιβεβαιώνοντας την μείωση του BER. Μόνο πρόβλημα παρέμεινε η αστάθεια των μετρήσεων υπό την εμφάνιση ομίχλης, μιας και το εξωτερικό διάγραμμα στο Σχήμα 3.55(α) αντιστοιχεί σε ένα από τα τμήματα των μεταδόσεων που δεν έδωσαν σφάλματα (από το Σχήμα 3.54(α)), ενώ κατά τη διάρκεια της μέτρησης υπήρξαν περιπτώσεις κατά τις οποίες μειωνόταν το άνοιγμα του αστερισμού λόγω μείωσης της ισχύος από αστάθεια στο μέσο, έχοντας ως αποτέλεσμα την εμφάνιση λαθών κατά της διαδικασίας της φώρασης. Ωστόσο, η τάση βελτίωσης είναι έκδηλη.



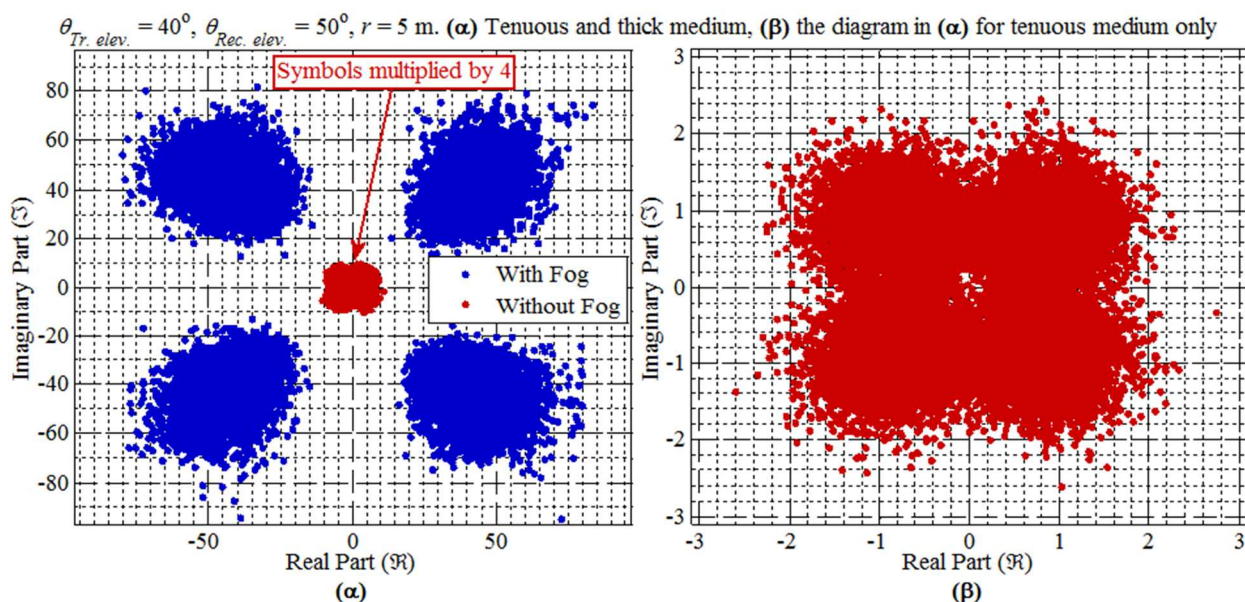
Σχήμα 3.54. Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων μετά από μετάδοση Flip-OFDM σε ρυθμό 4 kbit/s με γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 50^\circ$, αντίστοιχα, για αποστάσεις πομπού-δέκτη (α) $r = 7$ m, (β) $r = 5$ m.

Κλείνοντας αυτό το τμήμα εξέτασης των επιδόσεων των μεταδόσεων υπό διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης με και χωρίς ομίχλη, μειώνοντας την απόσταση στα 5 μέτρα και το κέρδος του PMT σε τιμή $G_{PMT} \approx 5.29 \times 10^5$ και διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους ως έχουν, προέκυψε το Σχήμα 3.54(β). Η μείωση της απόστασης οδήγησε σε μικρή πτώση των απωλειών έχοντας ως αποτέλεσμα τη μικρή μείωση του BER σε μία τιμή περίπου 1.55×10^{-2} . Στο πρώτο τμήμα της καμπύλης των συσσωρευμένων σφαλμάτων bit συναρτήσε των bits που μεταδόθηκαν που καλύπτεται από το παραλληλόγραμμο με τις κόκκινες διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές ελήφθησαν λανθασμένες αποφάσεις για 7400 bits για λίγο πάνω από 476000 bits που έλαβε ο δέκτης. Σε αυτό το διάστημα απομονώθηκαν 24000 Q-PSK σύμβολα από 2000 διαδοχικά Flip-OFDM σύμβολα και τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 3.56(α) ως το εσωτερικό διάγραμμα με τα κόκκινα μιγαδικά σύμβολα πολλαπλασιασμένα επί 4. Στο Σχήμα 3.56(β), τα ίδια σύμβολα απεικονίζονται χωρίς παρεμβάσεις στους άξονες όπως έγινε και προηγουμένως στο παράδειγμα για τα 7 μέτρα. Η μικρή βελτίωση στο BER για το πρώτο τμήμα της καμπύλης σε σχέση με την περίπτωση απόστασης 7 μέτρων που εξετάστηκε νωρίτερα φαίνεται συγκρίνοντας και τα αντίστοιχα διαγράμματα των αστερισμών στο Σχήμα 3.55(β) και στο Σχήμα 3.56(β) για τις δύο αποστάσεις. Ο θόρυβος γύρω από τα σύμβολα είναι πιο περιορισμένος για τις μετρήσεις στα 5 μέτρα.

Η λειτουργία της μηχανής ομίχλης ξεκίνησε μετά από περίπου 537480 bits. Η μείωση της κλίσης της καμπύλης και πάλι είναι προφανής. Αναλύοντας ποσοτικά τη μεταβολή, στη διάρκεια περίπου 844000 bits, έγιναν 77 σφάλματα, αποδίδοντας τοπικά μία τιμή BER $\approx 9.12 \times 10^{-5}$. Αυτό το τμήμα της μετάδοσης απομονώθηκε από το πρώτο μπλε παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες γραμμές στο Σχήμα 3.54(β). Η μείωση είναι λίγο μεγαλύτερη από δύο τάξεις μεγέθους σε σχέση με την καθαρή ατμόσφαιρα. Στο Σχήμα 3.56(α) απεικονίζεται το διάγραμμα αστερισμού μπλε χρώματος από 24000 Q-PSK σύμβολα που αντιστοιχούν σε 2000 διαδοχικά Flip-OFDM σύμβολα. Τα αντίστοιχα bits βρίσκονται στο τμήμα της καμπύλης των συσσωρευμένων σφαλμάτων που προέκυψε από τη χρήση της μηχανής ομίχλης. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι δεν προέκυψαν σφάλματα για το συγκεκριμένο πλήθος συμβόλων που μεταδόθηκαν υπό καθεστώς ομίχλης. Το διάστημα κατά το οποίο μεταδόθηκαν τα 2000 διαδοχικά σύμβολα ανήκει σε ένα από τα τμήματα της μετάδοσης όπου τα αποτελέσματα ήταν τα καλύτερα και δε μετρήθηκαν σφάλματα για περισσότερα από τα 2000 διαδοχικά σύμβολα που αντιστοιχούν σε αυτό το διάστημα. Με τη διακοπή της μηχανής και τη σχετικά άμεση διάλυση της ομίχλης, η κλίση της καμπύλης αποκαταστάθηκε σε μία τιμή περίπου 1.26×10^{-2} , αφού εμφανίστηκαν 4300 λάθη μετά τη μετάδοση λίγο πάνω από 340000 bits. Αυτό το τμήμα απομονώθηκε στο Σχήμα 3.54(β) από το δεύτερο κόκκινο παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές. Μετά από περίπου 2051000 bits, χρησιμοποιήθηκε ξανά η μηχανή ομίχλης. Στο τμήμα της καμπύλης που καλύπτεται από το μπλε ορθογώνιο με τις διακεκομμένες γραμμές πάνω δεξιά στο σχήμα, προέκυψαν 43 λάθη για σχεδόν 725000 bits. Αυτό σημαίνει ότι τοπικά προέκυψε BER $\approx 5.93 \times 10^{-5}$. Αυτή η τιμή είναι λίγο μικρότερη από αυτή που προέκυψε από την πρώτη χρήση της μηχανής ομίχλης (9.12×10^{-5}), αλλά είναι ίδιας τάξης μεγέθους. Η μέση τιμή του BER λόγω της χρήσης της μηχανής ομίχλης γι' αυτή τη ζεύξη και γι' αυτό το ρυθμό μετάδοσης ήταν περίπου 7.53×10^{-5} , λίγο μικρότερη από τη βελτίωση που επήλθε για την ζεύξη με τις ίδιες παραμέτρους στα 7 μέτρα κατά την εμφάνιση ομίχλης (8.33×10^{-5} από το Σχήμα 3.54(α)).



Σχήμα 3.55. Διαγράμματα αστερισμών για τα σύμβολα μετά τον FFT στο δέκτη μετά από μετάδοση Flip-OFDM σε ρυθμό 4 kbit/s με γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, αντίστοιχα, για απόσταση πομπού-δέκτη $r = 7$ m. (α) Το εσωτερικό διάγραμμα περιλαμβάνει τα Q-PSK σύμβολα που έλαβε ο δέκτης με μεταδόσεις σε καθαρή ατμόσφαιρα και το εξωτερικό διάγραμμα περιλαμβάνει τα Q-PSK σύμβολα υπό καθεστώς εμφάνισης ομίχλης. Τα εσωτερικά σύμβολα έχουν πολλαπλασιαστεί επί 5. (β) Διάγραμμα αστερισμού των Q-PSK συμβόλων στο Σχήμα 3.55(α) για την περίπτωση αραιού μέσου χωρίς ομίχλη χωρίς παρέμβαση στις διαστάσεις των αξόνων.



Σχήμα 3.56. Διαγράμματα αστερισμών για τα σύμβολα μετά τον FFT στο δέκτη μετά από μετάδοση Flip-OFDM σε ρυθμό 4 kbit/s με γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη, $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$, αντίστοιχα, για απόσταση πομπού-δέκτη $r = 5$ m. (α) Το εσωτερικό διάγραμμα περιλαμβάνει τα Q-PSK σύμβολα που έλαβε ο δέκτης με μεταδόσεις σε καθαρή ατμόσφαιρα και το εξωτερικό διάγραμμα περιλαμβάνει τα Q-PSK σύμβολα υπό καθεστώς εμφάνισης ομίχλης. Τα εσωτερικά σύμβολα έχουν πολλαπλασιαστεί επί 4. (β) Διάγραμμα αστερισμού των Q-PSK συμβόλων στο Σχήμα 3.56(α) για την περίπτωση αραιού μέσου χωρίς ομίχλη χωρίς παρέμβαση στις διαστάσεις των αξόνων.

Αυτό που αναμενόταν και τελικά παρατηρήθηκε υπό την παρουσία της ομίχλης ήταν η αλλαγή της κλίσης των καμπυλών των συσσωρευμένων σφαλμάτων συναρτήσεως των bits που έχουν μεταδοθεί. Πιο συγκεκριμένα, η κλίση μειώθηκε σε σύγκριση με την περίπτωση της καθαρής ατμόσφαιρας. Η βελτίωση του ρυθμού σφαλμάτων bits κατά τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης και τις παραμέτρους που περιγράφουν την εκάστοτε ζεύξη, δηλαδή γωνίες ανύψωσης, απόσταση πομπού-δέκτη, ρυθμός μετάδοσης, δείχνει ότι οι μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή ευνοούνται καθαρά από την παρουσία ομίχλης για μικρές αποστάσεις. Λόγω της αδυναμίας διατήρησης της ομοιογενούς κάλυψης του μέσου με τεχνητή ομίχλη, ειδικά κατά την εμφάνιση ριπών ανέμου και κυρίως για τη μεγαλύτερη απόσταση, το μεγαλύτερο βάρος δόθηκε στην απεικόνιση της βελτίωσης αποτιμώντας τη με την εκτίμηση της μείωσης του BER που υπολογίστηκε υπό κάθε καθεστώς μετάδοσης, καθώς και με την παρουσίαση συμβόλων 4-PPM ή αστερισμών συμβόλων Q-PSK σε αραιό και πυκνό μέσο, ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε. Κύριος μέλημα ήταν η παρουσίαση της πτώσης του BER και οι τάξεις μεγέθους αυτής της πτώσης σε σχέση με την καθαρή ατμόσφαιρα, ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο. Σκοπός ήταν να αποδοθεί η τάση βελτίωσης και όχι η άμεση συσχέτιση απόλυτων τιμών BER με την εμφάνιση ομίχλης για την εκάστοτε ζεύξη, παρά το γεγονός ότι οι επαναλήψεις των μετρήσεων έδωσαν παραπλήσιες τιμές BER για καθένα σενάριο που εξετάστηκε υπό συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας και κυρίως υπό συνθήκες ομίχλης.

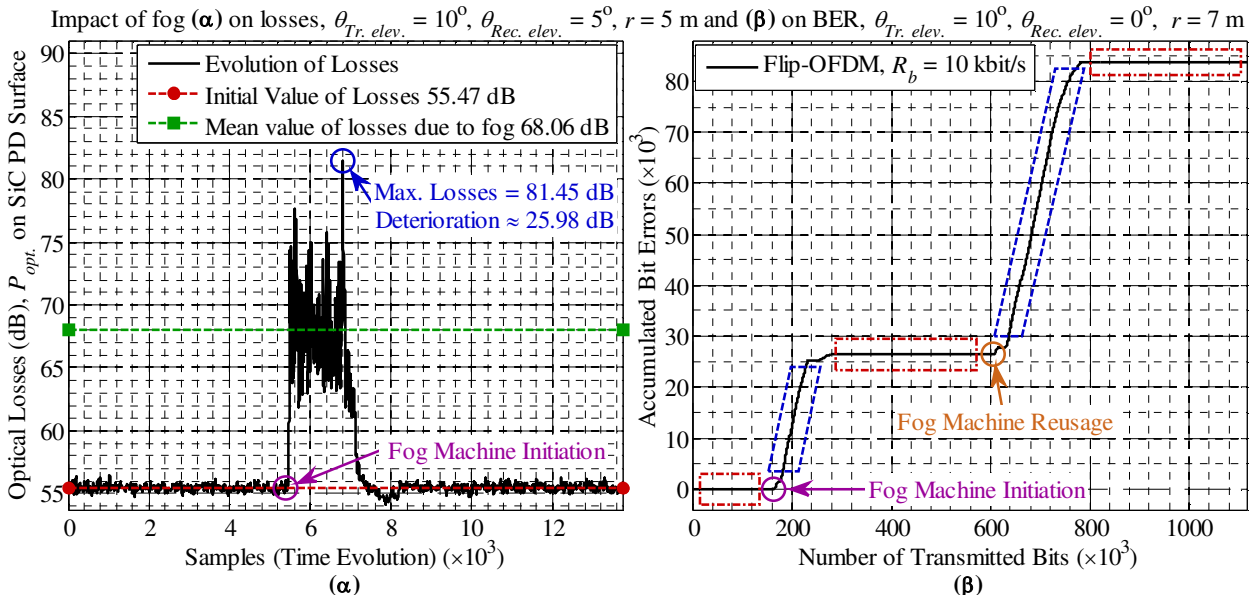
3.3.3 Απώλειες καναλιού και επιδόσεις συστήματος για δέκτη με SiC φωτοδίοδο

Παρά το γεγονός ότι το ενδογενές κέρδος του PMT είναι κρίσιμο για την ανάπτυξη ενός δέκτη με επικρατούσα συνιστώσα θορύβου το θόρυβο βολής ξεπερνώντας την επίδραση του θερμικού θορύβου, ο συγκεκριμένος PMT που χρησιμοποιήθηκε και οι υπόλοιποι PMTs που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχα πειράματα που έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία, αποκρίνονται σε ένα φασματικό εύρος που περιλαμβάνει και τμήμα της UV-B μπάντας. Επομένως, απαιτείται ένα τμήμα

φιλτραρίσματος πριν από τον συνήθως ογκώδη και εύθραυστο PMT για τη μείωση του θορύβου από το περιβάλλον και τη λειτουργία στην ηλιακά τυφλή περιοχή μειώνοντας ταυτόχρονα το πλήθος των λαμβανόμενων φωτονίων εξαιτίας της απόδοσης (transmittance) του φίλτρου που είναι μικρότερη από τη μονάδα. Η ανάγκη για εξωτερικό φιλτράρισμα μπορεί εξαλειφθεί αν ο φωτοφωρατής είναι ευαίσθητος αποκλειστικά στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα. Επιπλέον, είναι επιθυμητό να διατηρηθεί το ενδογενές κέρδος. Μία λύση θα ήταν η χρήση APD με ευαισθησία στη συγκεκριμένη μπάντα. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν διαθέσιμες APDs από SiC, έχουν πολύ μικρή επιφάνεια, επιβάλλοντας την χρήση πολλών APDs για τη λήψη ικανοποιητικού επιπέδου ισχύος. Για την αποφυγή μίας πολύπλοκης δομής στο δέκτη, επιλέχθηκε μία φωτοδιόδος SiC με ενεργό επιφάνεια 7.6 mm^2 χωρίς ενδογενές κέρδος. Σε αυτό το πλαίσιο, πραγματοποιήθηκαν κάποιες ενδεικτικές μετρήσεις αντικαθιστώντας τον PMT με το οπτικό φίλτρο από τη φωτοδιόδο SiC και ένα επιπεδόκυρτο (planoconvex) φακό μπροστά από τη φωτοδιόδο για την αύξηση των φωτονίων πάνω στην επιφάνεια της φωτοδιόδου. Η φωτοδιόδος αποκρίνεται μόνο στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα (από μοναδιαία κανονικοποιημένη αποκρισιμότητα στα 275 nm, αυτή γίνεται μικρότερη από 10^{-3} στα 300 nm). Πρόκειται για τη SG01XL-C5 της sg-lux [194], με FOV = 60° . Ο φακός ήταν της Edmund [195], με 50 mm διάμετρο, 75 mm εστιακή απόσταση (Effective Focal Length – EFL) και αριθμητικό άνοιγμα 0.33. Ο αρχικός TIA αντικαταστάθηκε από άλλον με $R_{TIA} = 50 \text{ M}\Omega$. Εξαιτίας της έλλειψης ενδογενούς κέρδους στη φωτοδιόδο, οι γωνίες ανύψωσης που ήταν δυνατό να εφαρμοσθούν σε αυτό το σετ μετρήσεων ήταν χαμηλότερες, περιορίζοντας τις ζεύξεις σε ένα καθεστώς όπου τα λαμβανόμενα σήματα αποτελούνταν από ισχυρές συνιστώσες από οπτική επαφή. Ωστόσο, δεν υπήρχε η ανάγκη αυστηρής ευθυγράμμισης μέσα σε ένα εύρος λίγων μοιρών και ο λόγος που πραγματοποιήθηκε αυτή η σειρά πειραμάτων ήταν για να φανεί η επίδραση της αλλαγής των συνθηκών στις απώλειες για χαμηλές γωνίες ανύψωσης σε ένα σύστημα με ένα δέκτη που δε μπορεί να αποδώσει το κέρδος του PMT. Αυτό που αναμενόταν ήταν η αντίθετη επίδραση της ομίχλης σε σχέση με τις ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή παρά το ίδιο μήκος κύματος. Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία που εφαρμόστηκε και για την περίπτωση του PMT, το επίπεδο της οπτικής ισχύος από κορυφή-σε-κορυφή στην επιφάνεια της φωτοδιόδου (μετά την εστίαση που προκαλεί ο φακός) υπολογιζόταν κάθε χρονική στιγμή διαιρώντας τα επίπεδα των τάσεων από κορυφή-σε-κορυφή με το κέρδος του TIA και την αποκρισιμότητα της φωτοδιόδου ($\mathfrak{R} \approx 0.108 \text{ A/W}$ στα 265 nm). Το εκπεμπόμενο επίπεδο οπτικής ισχύος (κι αυτό από κορυφή-σε-κορυφή) ήταν ίδιο με αυτό που έχει τεθεί ως τώρα στην υποενότητα 3.3.1. Οι απώλειες ισχύος εκτιμήθηκαν διαιρώντας την εκτίμηση της οπτικής ισχύος στην εκπομπή με την εκτίμηση της οπτικής ισχύος στη λήψη ακριβώς πάνω στην επιφάνεια του φωτοφωρατή (αναφέρεται ως P_{opt} στα σχήματα που ακολουθούν).

Οι γωνίες ανύψωσης του πομπού και του δέκτη τέθηκαν στις 10° και 5° , αντίστοιχα, και η απόσταση τους στα 5 μέτρα. Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.3.1 σχετικά με τη χρήση της μηχανής ομίχλης η οποία τοποθετήθηκε στη μέση της ζεύξης όπως και στα προηγούμενα σενάρια, η επίδραση της ομίχλης ήταν καταστροφική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.57(α). Πιο συγκεκριμένα, υπό καθαρή ατμόσφαιρα, οι απώλειες συνέκλιναν σε μία μέση τιμή περίπου 55.47 dB. Μετά από 5370 δείγματα, η παραγωγή ομίχλης ξεκίνησε προκαλώντας μία απότομη αύξηση των απωλειών. Στιγμιαία, στη χειρότερη περίπτωση για το συγκεκριμένο παράδειγμα, οι απώλειες αυξήθηκαν κατά περίπου 400 φορές ($\sim 26 \text{ dB}$). Υπό τη χρήση της μηχανής ομίχλης, κατά μέσο όρο οι απώλειες εκτιμήθηκαν λίγο πάνω από 68 dB, δηλαδή κατά 13.59 dB υψηλότερες σε σχέση με την αραιή ατμόσφαιρα. Όταν διακόπηκε η λειτουργία της μηχανής, οι απώλειες αποκαταστάθηκαν στις αρχικές τιμές. Η μικρή κυμάτωση μετά τη διακοπή της μηχανής που έδωσε περίπου 1 dB βελτίωση, κράτησε για λιγότερο από

400 δείγματα, δηλαδή λιγότερο από 2 sec (5 ms ανά δείγμα). Αυτή η βελτίωση δεν μπορεί να θεωρηθεί αρκετή ώστε να υποστηριχθεί ότι για τη συγκεκριμένη τοπολογία πομπού και δέκτη, τη συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους και τις συνθήκες που επιβάλλει η σύνθεση της τεχνητής ομίχλης* προκύπτει αύξηση της ισχύος υπό συνθήκες. Η δραματική αύξηση των απωλειών οφείλεται στις συνιστώσες οπτικής επαφής της δέσμης, οι οποίες αποκλίνουν από την αρχική τους κατεύθυνση προς το δέκτη κατά την έντονη σκέδαση υπό καθεστώς ομίχλης, οδηγώντας σε αύξηση των απωλειών. Επομένως, η σκέδαση λειτουργεί με αντίστροφο τρόπο σε σχέση με τις ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή και με PMT στο δέκτη.

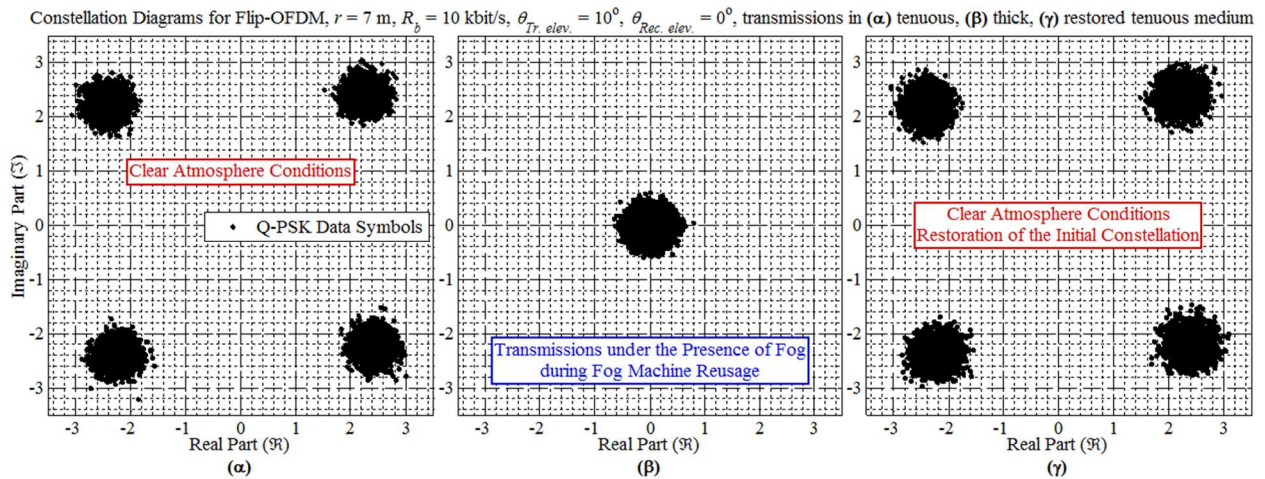


Σχήμα 3.57. (α) Χρονική εξέλιξη της οπτικής ισχύος όταν το μέσο ήταν αραιό και όταν εμφανίστηκε τεχνητή ομίχλη χρησιμοποιώντας τη σχετική μηχανή για $\theta_{Tr. elev.} = 10^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 5^\circ$. Η εμβέλεια της ζεύξης ήταν 5 μέτρα. (β) Εξέλιξη της συσσώρευσης σφαλμάτων μετά από μετάδοση Flip-OFDM, για $\theta_{Tr. elev.} = 10^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 0^\circ$, με την εμβέλεια της ζεύξης στα 7 μέτρα. Η μηχανή ομίχλης τοποθετήθηκε στη μέση της ζεύξης και στις δύο περιπτώσεις.

Η δυσμενής επίδραση της ομίχλης στις απώλειες μία ζεύξης με ισχυρές συνιστώσες οπτικής επαφής υποδεικνύει ότι η παρουσία ομίχλης σε τέτοιες ζεύξεις σίγουρα θα επηρεάσει αρνητικά τις επιδόσεις των μεταδιδόμενων σημάτων. Ακολουθώντας τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.3.2, εκτιμήθηκαν τιμές του BER υπό την παρουσία και την απουσία ομίχλης σε ζεύξη με ισχυρές συνιστώσες οπτικής επαφής. Η απόσταση του πομπού από το δέκτη τέθηκε στα 7 μέτρα, με $\theta_{Tr. elev.} = 10^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 0^\circ$. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ήταν και πάλι 10 kbit/s. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται Σχήμα 3.57(β). Πιο συγκεκριμένα, από το πρώτο απομονωμένο τμήμα που καλύπτεται από το παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές, για 120000 bits δεν προέκυψε κάποιο σφάλμα. Μετά από περίπου 164300 bits, εκκίνησε η λειτουργία της μηχανής ομίχλης, οποία ήταν τοποθετημένη στη μέση της ζεύξης. Η ομίχλη που παρήχθη επέδρασε καταστροφικά, άμεσα και με αναμενόμενο τρόπο. Το πρώτο μπλε παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχεί σε 46200 bits. Σε αυτό το μπλοκ δεδομένων, 20504 bits εκτιμήθηκαν λανθασμένα. Αυτό σημαίνει ότι η ζεύξη δε λειτουργεί εξαιτίας του ότι σχεδόν τα μισά από bits που μεταδόθηκαν δεν εκτιμήθηκαν ορθά. Έπειτα, η λειτουργία της μηχανής ομίχλης διακόπηκε, και σύμφωνα με την καμπύλη των συσσωρευμένων σφαλμάτων, η λειτουργία χωρίς σφάλματα για τη ζεύξη αποκαταστάθηκε μετά την

* Δεν υπάρχουν πληροφορίες από τους κατασκευαστές του υγρού της μηχανής ομίχλης σχετικά με τη σύνθεση, λόγω θεμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Οι θεωρήσεις που έχουν γίνει έχουν προκύψει από τις γενικές πληροφορίες που υπάρχουν και έχουν συμπεριληφθεί στις αναφορές.

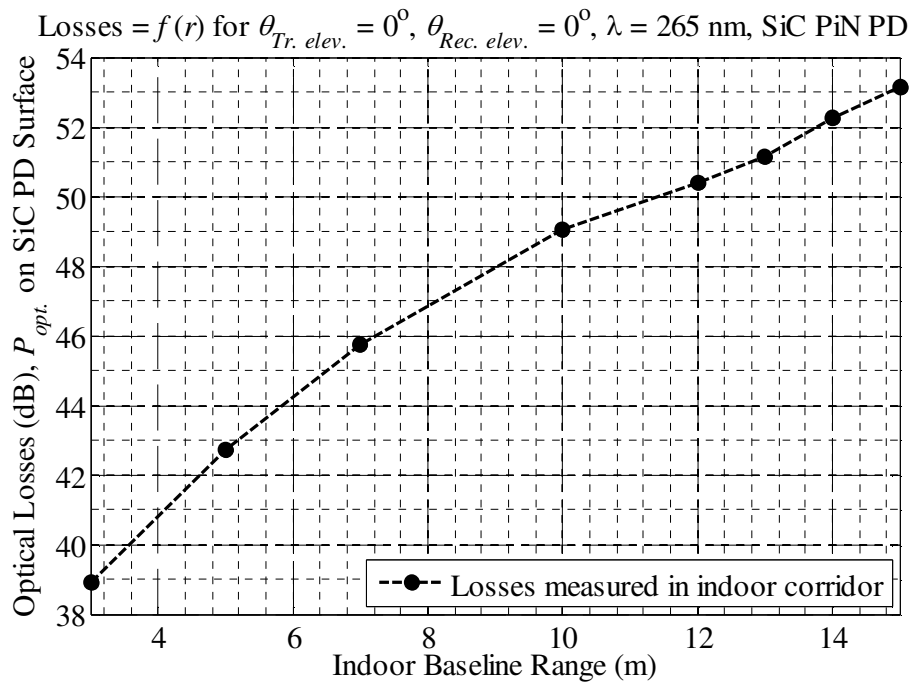
άμεση διάλυση της ομίχλης. Χρειάστηκε πολύ μικρό διάστημα για τη σύγκλιση στην αρχική τιμή του BER υπό καθαρή ατμόσφαιρα. Για λίγο πάνω από 280000 bits δεν εμφανίστηκαν σφάλματα, όπως προέκυψε από το δεύτερο κόκκινο παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες-διάστικτες γραμμές στη μέση του γραφήματος. Μετά από σχεδόν 605600 bits, η μηχανή ομίχλης επαναχρησιμοποιήθηκε και η ζεύξη έπαψε να λειτουργεί αξιόπιστα και πάλι, καθώς για σχεδόν 135000 διαδοχικά bits, ο ρυθμός BER ήταν τοπικά κοντά σε μία τιμή 0.4, καθώς συνέβησαν 52514 σφάλματα. Τέλος, η λειτουργία της μηχανής ομίχλης διακόπηκε, η διάλυση της ομίχλης ολοκληρώθηκε πάλι άμεσα και για περισσότερα από 300000 bits (μετά από συνολικά 800000 bits που μεταδόθηκαν), η επικοινωνία πραγματοποιήθηκε χωρίς σφάλματα. Φαίνεται καθαρά ότι αυτή η ζεύξη με ισχυρές συνιστώσες οπτικής επαφής θα τεθεί εκτός λειτουργίας όταν εμφανιστεί ομίχλη στην ατμόσφαιρα. Επιπροσθέτως, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η απουσία ενδογενούς κέρδους στην πλευρά του δέκτη ανέδειξε το θερμικό σε επικρατούσα συνιστώσα θορύβου. Αυτό το γεγονός είναι ένας πρόσθετος περιορισμός που οδήγησε σε περαιτέρω υποβάθμιση των επιδόσεων σε σύγκριση με μία αντίστοιχη περίπτωση όπου ο δέκτης θα είχε κέρδος [158].



Σχήμα 3.58. Διαγράμματα αστερισμού για Q-PSK σύμβολα υπό (α) συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας, (β) την παρουσία τεχνητής ομίχλης, (γ) συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας μετά τη διάλυση της ομίχλης. Η γεωμετρική τοπολογία για τη ζεύξη ήταν αυτή για την οποία προέκυψε το διάγραμμα συσσώρευσης σφαλμάτων συναρτήσει των bits που μεταδόθηκαν και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.57(β).

Μένοντας στη συγκεκριμένη ζεύξη για την οποία προέκυψε το Σχήμα 3.57(β), υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας πριν την εκκίνηση της μηχανής ομίχλης, απομονώθηκαν 1000 σύμβολα ανά υποφέρον με Q-PSK σύμβολα δεδομένων μετά την εφαρμογή του FFT στο δέκτη, δηλαδή 30000 σύμβολα από 1000 διαδοχικά Flip-OFDM σύμβολα, καθώς έχει ήδη αναφερθεί ότι για 10 kbit/s ρυθμό δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν 30 υποφέροντα. Απεικονίζοντας τα σύμβολα προέκυψε το διάγραμμα αστερισμού στο Σχήμα 3.58(α). Η μορφή του αστερισμού δικαιολογεί την ανυπαρξία σφαλμάτων στο τμήμα του γραφήματος στο Σχήμα 3.57(β) για μεταδόσεις υπό καθαρή ατμόσφαιρα και με ισχυρές συνιστώσες οπτικής επαφής. Όπως φάνηκε, η εμφάνιση ομίχλης οδήγησε σε αύξηση των απωλειών και κατ' επέκταση σε αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων bits τοπικά στη σχετική καμπύλη των συσσωρευμένων σφαλμάτων bits, όπως πχ στα τμήματα της καμπύλης που απομονώνονται από τα μπλε παραλληλόγραμμο με διακεκομμένες γραμμές στο Σχήμα 3.57(β). Από τη δεύτερη χρήση της μηχανής ομίχλης προέκυψε τοπικά ρυθμός σφαλμάτων bits περίπου 0.4. Από αυτό το τμήμα της μετάδοσης, για 30000 Q-PSK σύμβολα όπως ακριβώς προέκυψαν μετά τον FFT (καθενός από τα 1000 Flip-OFDM σύμβολα) εξήχθη το διάγραμμα αστερισμού στο Σχήμα 3.58(β). Η αύξηση των απωλειών λόγω ομίχλης πέρασε και στον αστερισμό, κάνοντας της διάκριση των συμβόλων αδύνατη. Μετά τη

διακοπή της λειτουργίας της μηχανής και τη διάλυση της ομίχλης, η αποκατάσταση του BER σε τιμή 0 μπορεί να φανεί και με τη μορφή που αποκτά το διάγραμμα αστερισμού μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας της ζεύξης. Αυτή η αποκατάσταση σε λειτουργία μηδενικών σφαλμάτων μπορεί να φανεί και στο Σχήμα 3.58(γ), όπου απεικονίζονται και πάλι 30000 Q-PSK σύμβολα όπως προέκυψαν από τον FFT καθενός από τα 1000 διαδοχικά Flip-OFDM σύμβολα. Το «άνοιγμα» του αστερισμού στις αρχικές τιμές (πριν τη χρήση της μηχανής ομίχλης) του πραγματικού και του φανταστικού μέρους των συμβόλων δείχνει καθαρά την άριστη λειτουργία της ζεύξης γι' αυτό το τμήμα της μετάδοσης. Η μόνη μεταβολή σε σχέση με το Σχήμα 3.58(α) είναι η πολύ μικρή αύξηση του θορύβου που δεν εμποδίζει τη λειτουργία χωρίς σφάλματα.



Σχήμα 3.59. Απώλειες ισχύος συναρτήσει της απόστασης της ζεύξης για μεταδόσεις σε εσωτερικό διάδρομο υπό καθεστώς οπτικής επαφής πομπού και δέκτη και μηδενικές γωνίες ανύψωσης. Στο δέκτη χρησιμοποιήθηκε η φωτοδίοδος SiC μαζί με το φακό.

Παρά το γεγονός ότι η έλλειψη κέρδους και οι μικρές διαστάσεις του φωτοφωρατή δεν επιτρέπουν τη χρήση τέτοιων μεμονωμένων δεκτών σε ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή με μεταδόσεις στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα, δεν είναι απαγορευτική η επικουρική χρήση σε μεταδόσεις με διάχυτη οπτική επαφή υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας σε εσωτερικό ή εξωτερικό περιβάλλον. Πραγματοποιήθηκαν κάποιες τυπικές μετρήσεις σε εσωτερικό διάδρομο σε απόσταση μέχρι και 15 μέτρα. Οι μετρήσεις αφορούσαν την εκτίμηση των απωλειών σε ζεύξη με μηδενικές γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη και με μόνη μεταβαλλόμενη παράμετρο την απόσταση. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις μέτρησης των απωλειών, έγινε προσπάθεια διατήρησης μίας ομοεπίπεδης γεωμετρίας, όσον αφορά τον άξονα της οπτικής πηγής και τον άξονα του δέκτη, για κάθε μήκος που εξετάστηκε. Στο δέκτη διατηρήθηκε η φωτοδίοδος SiC PD με τον κατάλληλο φακό. Οι απώλειες μετρήθηκαν όπως και στην περίπτωση της ζεύξης για την οποία προέκυψε το Σχήμα 3.57(α). Η καμπύλη των απωλειών συναρτήσει του μήκους φαίνεται στο Σχήμα 3.59. Οι απώλειες για απόσταση κάλυψης από 3 μέχρι και 15 μέτρα υπολογίστηκαν μεταξύ των τιμών 38.91 dB και 53.16 dB. Σχετικά με τις απώλειες που μετρήθηκαν για τα 15 μέτρα διαδρόμου, αντίστοιχες τιμές μετρήθηκαν σε εξωτερικό περιβάλλον υπό καθαρή ατμόσφαιρα, για αποστάσεις 5 και 7 μέτρων με μικρές γωνίες ανύψωσης για τον πομπό και το δέκτη. Γι' αυτές τις αποστάσεις και για τον ίδιο ρυθμό, οι τιμές BER που μετρήθηκαν σε εξωτερικό περιβάλλον ήταν αρκετά κάτω από 10^{-4} , αλλά μετά από πρόσθετη μικρή αύξηση των γωνιών ανύψωσης έπαυε η αξιόπιστη

λειτουργία της ζεύξης, λόγω της εξαφάνισης της/των συνιστώσας/ωσών της δέσμης σε οπτική επαφή με το δέκτη. Επομένως, επανερχόμενοι στη μέτρηση σε εσωτερικό χώρο, η αναμενόμενη εξέλιξη των απωλειών με το μήκος της ζεύξης δείχνει ότι η υποστήριξη ζεύξεων σε χαμηλούς ρυθμούς είναι δυνατή σε ένα εσωτερικό περιβάλλον όπου εκτός από την απόσβεση που αυξάνει τις απώλειες κατά τη διάδοση, ο μηχανισμός των ανακλάσεων μπορεί να συμβάλλει στη μικρή αύξηση της λαμβανόμενης ισχύς.

3.4 Συμπεράσματα – Συγκρίσεις

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάστηκε η δυνατότητα δόμησης ενός ασύρματου συστήματος οπτικών επικοινωνιών σε εξωτερικό περιβάλλον σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Ο στόχος που τέθηκε ήταν ο έλεγχος της λειτουργίας ενός ασύρματου συστήματος υπό ένα καθεστώς διάχυτων μεταδόσεων καλύπτοντας μικρές αποστάσεις, με ελαχιστοποιημένες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ελάχιστη κινητικότητα, εγγυημένη ασφάλεια των μεταδόσεων και μειωμένο θόρυβο από το περιβάλλον λόγω των εξωτερικών μεταδόσεων. Μία μπάντα μηκών κύματος που μπορεί να ικανοποιήσει ταυτόχρονα όλες τις παραμέτρους που τέθηκαν βρίσκεται μεταξύ 200 και 280 nm και πρόκειται για την ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα. Λόγω της απορρόφησης κυρίως από το όζον σ' αυτή την περιοχή μηκών κύματος, η ακτινοβολία από το περιβάλλον και συγκεκριμένα από τον ήλιο ελαχιστοποιείται, η ηθελημένη παρεμβολή ή υποκλοπή από απόσταση επίσης ελαχιστοποιείται λόγω της αυξημένης απορρόφησης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, επιτρέποντας την διαμόρφωση ζεύξεων πομπού με δέκτη χωρίς οπτική επαφή με δυνατότητα ελέγχου των γωνιών ανύψωσής τους διερευνώντας τα όρια των αποστάσεων και των γωνιών ανύψωσης που μπορούν να υποστηριχθούν για χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων.

Ο κύριος μηχανισμός πάνω στον οποίο βασίζεται η δυνατότητα επικοινωνίας δύο σημείων μέσω διάχυτης μετάδοσης σε σχετικά μικρές αποστάσεις είναι η σκέδαση από τα μόρια και τα μικροσωματίδια της ατμόσφαιρας. Δεδομένου ότι μία ζεύξη μπορεί να λειτουργήσει υπό ένα καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας όπου η πυκνότητα των μορίων και των μικροσωματιδίων δεν είναι πολύ μεγάλη, ένα πρόσθετο ερώτημα που γεννάται είναι αν αυτή η ατμόσφαιρα πυκνώσει, θα εξακολουθεί να είναι δυνατή η λειτουργία της ζεύξης με ικανοποιητικές επιδόσεις;

Λαμβάνοντας υπόψη τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά των σκεδάσεων Rayleigh και Mie για μόρια και μικροσωματίδια, αντίστοιχα, στη συγκεκριμένη περιοχή του φάσματος, αρχικά εξετάστηκαν θεωρητικά τα χαρακτηριστικά των καναλιών που μπορούν να δημιουργηθούν κατά τις μεταδόσεις σημείου-προς-σημείο, όσον αφορά τις απώλειες και το εύρος ζώνης. Το κανάλι μοντελοποιήθηκε εφαρμόζοντας τόσο ένα μοντέλο μονής σκέδασης όσο και ένα μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων μέσω της τεχνικής Monte Carlo. Το μοντέλο μονής σκέδασης εφαρμόστηκε σε σενάρια όπου ο δέκτης έχει ευρύ FOV. Φάνηκε ότι αύξηση της πυκνότητας του μέσου, με την αύξηση των σχετικών συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης, έδωσε μειωμένες απώλειες και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν από την εφαρμογή του ακριβέστερου μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων για πιο ρεαλιστικές τιμές παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, φάνηκε ότι οι απώλειες μειώνονται όταν θεωρηθεί ότι στο μέσο εμφανίζεται ομίχλη, αρκεί οι αποστάσεις να είναι σχετικά μικρές και η πυκνότητα σε συνδυασμό με το μέγεθος των σταγονιδίων ομίχλης να προκαλούν ένα συμβιβασμό υπέρ των σκεδάσεων μειώνοντας τις απώλειες. Επίσης, εξετάστηκαν τα περιθώρια των δύο μοντέλων και κυρίως οι περιορισμοί του μοντέλου μονής σκέδασης. Η επιλογή του μοντέλου πολλαπλών σκεδάσεων είναι μονόδρομος σε περιβάλλοντα με μεγάλη πυκνότητα σωματιδίων όπου η θεώρηση μονής σκέδασης γίνεται ανεπαρκής.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα για τα κανάλια που προέκυψαν από το μοντέλο μονής σκέδασης εφαρμόστηκαν για τη μελέτη ζεύξεων σημείου-προς-σημείου. Το πυκνότερο

μέσο για το οποίο είχαν προκύψει μικρότερες απώλειες και μεγαλύτερο εύρος ζώνης έδωσε τη δυνατότητα επίτευξης των ίδιων ρυθμών σφαλμάτων bits για μικρότερα επίπεδα ισχύος εκπομπής τόσο για παλμικά όσο και για σχήματα διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων. Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα του BER συναρτήσεως του ηλεκτρικού SNR από τις προσομοιώσεις ήταν ελαφρώς χειρότερα από τα αντίστοιχα αποτελέσματα μέσω αναλυτικών τύπων όταν ελήφθη υπόψη αποκλειστικά η επίδραση του θορύβου βολής. Αυτό ήταν λογικό και αναμενόμενο δεδομένου ότι στις προσομοιώσεις ενσωματώθηκε η επίδραση του θερμικού θορύβου του δέκτη, του θορύβου σκότους του PMT και του χαμηλού θορύβου του περιβάλλοντος στο θόρυβο βολής του δέκτη.

Τα κανάλια που προέκυψαν από το μοντέλο μονής σκέδασης εφαρμόστηκαν σε κάποιες εκδοχές μικρών δικτύων. Εξετάστηκε η ανοδική κίνηση από κάποιους κόμβους προς ένα κεντρικό κόμβο. Θεωρώντας την εφαρμογή ενός σχήματος CDMA για την πολλαπλή πρόσβαση των κόμβων του δικτύου στο ασύρματο μέσο, οι απαιτήσεις σε εκπεμπόμενη ισχύ αυξήθηκαν υπό καθαρή ατμόσφαιρα. Εκτός από τις απώλειες, η υψηλή τιμή του FOV επέβαλε πρόσθετους περιορισμούς επειδή τα κωδικοποιημένα σήματα με αυξημένο εύρος ζώνης μεταδίδονταν σε ένα αντίστοιχου εύρους ζώνης κανάλι. Η αύξηση του πλήθους των υποστηριζόμενων κόμβων στο δίκτυο οδήγησε σε ακόμα υψηλότερα επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος. Εκτός από το θόρυβο βολής, η μη αποδοτική αποκωδικοποίηση των σημάτων είναι πρόσθετος παράγοντας με αρνητική επίδραση. Το πυκνότερο μέσο επέτρεψε τη μείωση των απαιτούμενων επιπέδων ισχύος για την επίτευξη των επιθυμητών επιπέδων BER, όχι μόνο λόγω της μείωσης των απωλειών, αλλά και λόγω της αύξησης του εύρους ζώνης του καναλιού.

Κλείνοντας την ενότητα των θεωρητικών μελετών, για ένα ζεύγος γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη σε μία ζεύξη δύο σημείων, η απόπειρα συσχέτισης του ηλεκτρικού SNR στο δέκτη με το μέγεθος των σταγονιδίων ομίχλης και την πυκνότητα των τελευταίων κάνοντας κάποιες απλοποιήσεις* έδειξε ότι ήταν δυνατή η βελτίωση του SNR στο δέκτη με την πύκνωση του μέσου μέσα σε κάποια όρια πυκνότητας και μεγέθους των σταγονιδίων της ομίχλης. Από κάποια τιμή ακτίνας και πάνω, η επίδραση των σταγονιδίων ομίχλης στις ιδιότητες σκέδασης του ασύρματου μέσου γινόταν συντριπτική. Ταυτόχρονα, η πολύ μεγάλη αύξηση του μεγέθους των σταγονιδίων οδήγησε σε υποβάθμιση του ηλεκτρικού SNR λόγω αύξησης των απωλειών. Η αλλαγή στη συμπεριφορά με αύξηση των απωλειών και μείωση του SNR για ένα πολύ πυκνό μέσο ήταν αποτέλεσμα του συνδυασμού μεγάλης ακτίνας σταγονιδίων και πυκνότητας αυτών.

Σε γενικές γραμμές, όσον αφορά την χρησιμότητα των μοντέλων του ασύρματου καναλιού, μπορεί να μην ενδείκνυται η εφαρμογή των μοντέλων μονής σκέδασης υπό συνθήκες αυξημένης πυκνότητας στο κανάλι ή υπό γεωμετρικές ζεύξεων στις οποίες η επίδραση των σκεδάσεων μεγαλύτερης τάξης έχουν μη αμελητέα επίδραση ακόμα και για αραιά κανάλια σε πυκνότητα κέντρων σκέδασης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα υποτιμούσαν οι επιδράσεις των πολλαπλών σκεδάσεων εκτιμώντας μεγαλύτερες απώλειες με ένα μοντέλο μονής σκέδασης. Όσον αφορά τα θεωρητικά αποτελέσματα υπό τις μεταδόσεις που εξετάστηκαν, φαίνεται ότι η εγκατάσταση ζεύξεων προς πειραματική διερεύνηση όπου δε θα υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη με μεταδόσεις σε μήκη κύματος γύρω από τα 265 nm είναι εφικτή. Η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών είναι ένας πρόσθετος παράγοντας που χρήζει εξέτασης,

* Οι απλοποιήσεις αφορούσαν το γεγονός ότι για μία συγκεκριμένη πυκνότητα σταγονιδίων ομίχλης, η επιλογή κάποιας ακτίνας για τα σταγονίδια καθόριζε το ίδιο μέγεθος για όλα τα σταγονίδια, καθώς δεν επιλέχθηκε κάποια κατανομή μεγέθους των σταγονιδίων.

καθώς σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών πύκνωσης του μέσου, τα θεωρητικά αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα θεωρητικά ευρήματα, υλοποιήθηκαν ένας πομπός με χρήση LEDs και ένας δέκτης αποτελούμενος από ένα φίλτρο και ένα PMT στο οπτικό τους τμήμα, ώστε να εκτελεστεί μία σειρά πειραματικών μετρήσεων που θα δώσουν μία εικόνα των δυνατοτήτων του μέσου και της συγκεκριμένης μπάντας μηκών κύματος στο «χτίσιμο» ζεύξεων χωρίς οπτική επαφή με ικανοποιητικές επιδόσεις. Ταυτόχρονα, πρόσθετος στόχος ήταν και η πιθανή αξιοποίηση κάποιων ενδείξεων για κάποια περαιτέρω βήματα ερευνητικής δραστηριότητας στο συγκεκριμένο πεδίο. Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο σε εξωτερικό περιβάλλον και αφορούσαν ζεύξεις δύο σημείων. Οι δύο άξονες που ακολουθήθηκαν ήταν από τη μία η εκτίμηση των απωλειών και ο χαρακτηρισμός του ασύρματου μέσου για μεταδόσεις στα 265 nm και από την άλλη η εκτίμηση των επιδόσεων του συστήματος υπό τη διάδοση σημάτων στο ίδιο μήκος κύματος. Και στους δύο άξονες, η πυκνότητα του μέσου ήταν μία παράμετρος της οποίας η επίδραση εξετάστηκε. Για την μεταβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε μία μηχανή παραγωγής ομίχλης για την τεχνητή μεταβολή της σύστασης του περιβάλλοντος.

Όσον αφορά τις μετρήσεις που αφορούσαν τις απώλειες, ο χαρακτηρισμός του μέσου κατέδειξε τους σημαντικούς περιορισμούς που εισάγονται με την αύξηση των αποστάσεων και των γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη, επιτυγχάνοντας μεν την διάχυτη μετάδοση, αλλά με ιδιαίτερα αυξημένες απώλειες, κάνοντας αρκετά δύσκολη τη μετάδοση σημάτων χωρίς αυξημένα επίπεδα ισχύος που θα απαιτούσαν και μεγαλύτερο πλήθος πηγών ανά κόμβο. Με την ενσωμάτωση της μηχανής ομίχλης και της τεχνητής μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών, επιβεβαιώθηκε πειραματικά ότι η παρουσία ομίχλης σε μία οπτική ασύρματη ζεύξη χωρίς οπτική επαφή η οποία λειτουργεί στην «ηλιακά τυφλή» UV-C μπάντα, έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των απωλειών. Αυτή η μείωση εξαρτάται από τις γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη και την απόσταση αυτών. Για το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και των γεωμετρικών τοπολογιών που αξιολογήθηκαν, η πτώση των απωλειών ήταν δυνατό να φθάσει μέχρι και τα 12 dB για αποστάσεις μέχρι 10 μέτρα και υψηλές γωνίες ανύψωσης τόσο του πομπού όσο και του δέκτη, μεταξύ 50° και 70°. Για την μεγαλύτερη απόσταση των 20 μέτρων και για γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη ίσες με 50°, η μέση βελτίωση έφθασε τα 7.70 dB. Για ακόμα μεγαλύτερες γωνίες ανύψωσης, δηλαδή για 70° τόσο για τον πομπό όσο και για το δέκτη, η μέση τιμή των απωλειών υπό την παρουσία ομίχλης ήταν μειωμένη κατά περίπου 6 dB. Τέτοια συμπεριφορά αποδίδεται στην επίδραση των σκεδάσεων οι οποίες αντισταθμίζουν την απορρόφηση μέχρι κάποια εμβέλεια της ζεύξης που καλύπτει τις μερικές δεκάδες μέτρα. Αυτή η υπόθεση επιβεβαιώθηκε και από τα θεωρητικά μοντέλα, τόσο από το ημι-αναλυτικό όσο και από το λεπτομερέστερο αριθμητικό μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων που βασίζεται στην τεχνική Monte Carlo, υποδηλώνοντας ότι για πυκνή ατμόσφαιρα μία μείωση των απωλειών είναι αναμενόμενη.

Από το δεύτερο σκέλος των μετρήσεων, η πειραματική διερεύνηση από την πλευρά των επιδόσεων ζεύξεων σημείου-προς-σημείο χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη στην περιοχή της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας έδειξε ότι είναι δυνατή η δόμηση ζεύξεων εφαρμόζοντας παλμικά σχήματα διαμόρφωσης και σχήματα διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων, όπως το 4-PPM και το Flip-OFDM, αντίστοιχα, για τη μετάδοση σημάτων σε χαμηλό ρυθμό δεδομένων. Υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας, ο ρυθμός σφαλμάτων bits για καθένα σχήμα διαμόρφωσης μετρήθηκε για μεγάλο πλήθος γωνιών ανύψωσης του πομπού και του δέκτη, για ρυθμό 10 kbit/s και για αποστάσεις μέχρι 20 μέτρα. Το 4-PPM ήταν πιο εύρωστο από το Flip-OFDM για εμβέλειες πάνω από 5 μέτρα. Ο βέλτιστος τρόπος φώρασης και η ίδια η φύση του καναλιού κάνουν το

συγκεκριμένο παλμικό σχήμα διαμόρφωσης καταλληλότερο για κανάλια με υψηλά επίπεδα απωλειών όπου γίνεται έκδηλη η κβαντική φύση του φωτός. Ωστόσο, το έλλειμμα ισχύος φάνηκε με την αύξηση των γωνιών ανύψωσης και των αποστάσεων περιορίζοντας σημαντικά το πλήθος των γωνιών ανύψωσης για το οποίο οι επιδόσεις, δηλαδή ο ρυθμός BER, ήταν μέσα στα αποδεκτά όρια.

Η επίδραση της πυκνής ατμόσφαιρας μελετήθηκε για κάποια από τα σενάρια για τα οποία υπολογίστηκε προηγουμένως ο ρυθμός BER υπό αραιή ατμόσφαιρα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε την περίπτωση μέτρησης υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας και υπό καθεστώς πυκνής ατμόσφαιρας, με χρήση της μηχανής ομίχλης χωρίς την αλλαγή της γεωμετρικής τοπολογίας της ζεύξης και χωρίς διακοπή της πειραματικής διαδικασίας με το πέρασμα από το ένα καθεστώς στο άλλο. Στα 10 μέτρα και για ρυθμό 10 kbit/s, μία σημαντική βελτίωση του BER κατά τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους επιτεύχθηκε για το Flip-OFDM για $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$ και $\theta_{Rec. elev.} = 30^\circ$. Η βελτίωση για το 4-PPM ήταν δύο τάξεις μεγέθους. Διατηρώντας όλες τις παραμέτρους σταθερές εκτός από την απόσταση η οποία τέθηκε στα 20 μέτρα, βελτιώσεις του BER επανεμφανίστηκαν και για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης. Η αντίστοιχη βελτίωση για το Flip-OFDM ήταν μεγαλύτερη από μία τάξη μεγέθους, ενώ για το 4-PPM ξεπέρασε τις δύο τάξεις μεγέθους όταν το επέτρεψαν οι συνθήκες κατά τη μέτρηση. Η μείωση του BER κατά δύο τάξεις μεγέθους επαναλήφθηκαν για το 4-PPM και για ακόμα μία τοπολογία στα 20 μέτρα που έδινε υπό καθαρή ατμόσφαιρα παραπλήσιο BER με αυτό που επιτεύχθηκε για το Flip-OFDM στην ίδια απόσταση (αλλά υπό άλλο συνδυασμό γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη, γεγονός που κάνει δύσκολη την άμεση σύγκριση των δύο σεναρίων όπου εφαρμόστηκαν διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης). Το μόνο πρόβλημα ήταν ότι η είσοδος του δέκτη ελαφρώς στον κόρο λόγω του αυξημένου θορύβου βολής, χωρίς αυτό να αναιρεί τη βελτίωση. Θέτοντας μικρότερες αποστάσεις και μικρότερους ρυθμούς και πιο συγκεκριμένα για $\theta_{Tr. elev.} = 40^\circ$, $\theta_{Rec. elev.} = 50^\circ$ και απόσταση $r = 7$ m για 4 kbit/s ρυθμό, η βελτίωση του BER για το Flip-OFDM ήταν τρεις τάξεις μεγέθους υπό την παρουσία ομίχλης.

Τα πειράματα επαναλήφθηκαν ώστε να εξεταστεί η επαναληψιμότητα της βελτίωσης. Από τα παραδείγματα που δόθηκαν, η επανεμφάνιση της βελτίωσης του BER κατά ίδια τάξη μεγέθους αποτέλεσε την επαλήθευση της ορθότητας των ισχυρισμών ότι κατά τη λειτουργία των ζεύξεων σε πυκνότερο μέσο θα προκύψουν βελτιωμένες επιδόσεις. Επομένως, επιβεβαιώθηκε πειραματικά και με συστηματικό τρόπο ότι για την ανάπτυξη πλήρως λειτουργικών οπτικών ασύρματων ζεύξεων με μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη σε μικρή εμβέλεια, με χαμηλό ρυθμό δεδομένων και υπό δριμείς ατμοσφαιρικές συνθήκες, το τμήμα της UV-C μπάντας μεταξύ 200 και 280 nm είναι ένας ισχυρός υποψήφιος.

Παρά τα χαμηλά επίπεδα ισχύος εκπομπής, οι μεταδόσεις χωρίς οπτική επαφή ήταν δυνατό να επιτευχθούν λόγω της εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων σκέδασης του μέσου, αλλά και λόγω της δομής του PMT με το ενδογενές κέρδος που παρέχει. Αφαιρώντας τον PMT και το φίλτρο και αντικαθιστώντας τα από μία φωτοδίοδο SiC και ένα κατάλληλο φακό, δημιουργήθηκε μία ζεύξη με διαφορετικά χαρακτηριστικά στο κομμάτι της λήψης. Από το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε σε εξωτερικό και εσωτερικό περιβάλλον, φάνηκε ότι η απουσία του ενδογενούς κέρδους κατά τη φώραση φωτονίων και οι μικρές διαστάσεις της φωτοδίοδου περιόρισαν την ικανοποιητική λειτουργία της ζεύξης μόνο σε ένα καθεστώς όπου δέκτης και πομπός βρίσκονται σε οπτική επαφή με ταυτόχρονο περιορισμό των γωνιών ανύψωσης σε μικρές τιμές. Σε ένα τέτοιο καθεστώς επιβεβαιώθηκε ότι η εμφάνιση ομίχλης ή κέντρων σκέδασης γενικότερα μέσα στο ασύρματο μέσο θα προκαλέσει σημαντικότερους περιορισμούς στο σύστημα το οποίο παρουσιάζει φτωχές επιδόσεις.

Από τις πειραματικές μετρήσεις είναι εύκολο να διακρίνει κανείς ότι ο βασικός περιορισμός για τη μετάδοση σημάτων σε χαμηλούς ρυθμούς με διάχυτες μεταδόσεις και με ένα PMT στη λήψη είναι οι απώλειες του μέσου. Χωρίς την εκπομπή υψηλών επιπέδων οπτικής ισχύος, η κάλυψη πολλών δεκάδων μέτρων δεν είναι εύκολη. Η αντιστάθμιση των απωλειών με την πύκνωση του μέσου σε σκεδαστές δίνει τη δυνατότητα βελτίωσης των επιδόσεων ή τη μείωση της ισχύος εκπομπής για την επίτευξη ίδιων επιδόσεων. Λαμβάνοντας υπόψη και τα θεωρητικά αποτελέσματα, η ανάπτυξη βελτιωμένων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης με την ταυτόχρονη υλοποίηση μίας πειραματικής δικτυακής υποδομής με πολλαπλούς κόμβους θα μπορούσε να είναι ένας βασικός μελλοντικός στόχος. Αυτό θα συνδεόταν με πρόσθετα βήματα σύνδεσης του φυσικού επιπέδου και με θέματα που αφορούν πρωτόκολλα του επιπέδου ζεύξης δεδομένων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της ανάπτυξης δικτυακών υποδομών για την κάλυψη μικρών αποστάσεων χρησιμοποιώντας οπτικά μέσα, εξετάστηκαν ενσύρματες και ασύρματες οπτικές ζεύξεις έχοντας διαφορετικούς στόχους σε κάθε περίπτωση.

Σε ένα περιβάλλον εντός ενός σπιτιού ή γραφείου, οι ενσύρματες επιλογές δικτύωσης πρέπει να καλύπτουν κάποιες προϋποθέσεις που έχουν να κάνουν με την ευελιξία στο χειρισμό του εξοπλισμού, την δυνατότητα εύκολης διόρθωσης πιθανών καταστροφών από μη εξειδικευμένο προσωπικό και το χαμηλό κόστος, μαζί με τη δυνατότητα υποστήριξης ρυθμών μετάδοσης δεδομένων που θα απαιτηθούν στο κοντινό μέλλον. Ταυτόχρονα, μία ακόμα παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι και ο περιορισμός της ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ δεν πρέπει να παραλείπεται και η λειτουργία υπό χαμηλές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η ενσύρματη επιλογή που μπορεί να καλύψει σε ικανοποιητικό βαθμό αυτές τις προϋποθέσεις είναι η δικτύωση με εφαρμογή ζεύξεων σημείου-προς-σημείο με τη χρήση πλαστικών οπτικών ινών κατασκευασμένες από υλικό PMMA βηματικού προφίλ του δείκτη διάθλασης, με διάμετρο πυρήνα 980 μm, μανδύα μαζί με πυρήνα 1000 μm και τυπικό περίβλημα που δεν ήταν πυρίμαχο. Παρά τα προτερήματα των πλαστικών οπτικών, οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί δεν είναι αρκετά υψηλοί αν δεν εφαρμοστούν κάποιες πρόσθετες τεχνικές στην πλευρά του πομπού ή/και του δέκτη. Αυτό που εξετάστηκε ήταν η δυνατότητα επέμβασης απευθείας στο κανάλι, σε ποιο βαθμό αυτή η επέμβαση είναι εφικτή και ποια η τελική αλλαγή που ήταν δυνατό να προκύψει. Αυτό που δοκιμάστηκε ήταν η θέρμανση πλαστικών ινών διαφορετικών κατασκευαστών με μία συγκεκριμένη ακολουθία βημάτων. Προηγουμένως, εκτός από τις ίνες που υπέστησαν τη συγκεκριμένη διαδικασία, από την ίδια καλούμπα κάθε διαφορετικού κατασκευαστή του οποίου οι ίνες μελετήθηκαν, κόπηκε και μία ακόμα ίνα ίδιων χαρακτηριστικών και μήκους η οποία κρατήθηκε ως ίνα αναφοράς. Δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο ζεύγη ινών ανά κατασκευαστή, ώστε να εφαρμοστεί μία δίκαιη συγκριτική πειραματική μελέτη που ξεπέρασε σε διάρκεια το ένα έτος. Αυτό που προέκυψε από το σύνολο των μετρήσεων ήταν μία σημαντική βελτίωση του εύρους ζώνης για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα καθενός κατασκευαστή σε σχέση με την αντίστοιχη ίνα αναφοράς. Αυτή η εικόνα προέκυψε υπό ένα καθεστώς άμεσης σύνδεσης της πηγής laser κόκκινου χρώματος που χρησιμοποιήθηκε με την οπτική ίνα. Επρόκειτο δηλαδή για πέρασμα της στενής οπτικής δέσμης μέσα στον πυρήνα της ίνας, όντας καλά κεντραρισμένη με τον άξονα διάδοσης. Ωστόσο, όταν η εισερχόμενη δέσμη κάλυπτε τη διατομή του πυρήνα στο άκρο εισόδου, το εύρος ζώνης των θερμικά κατεργασμένων ινών ήταν παραπλήσιο των ινών αναφοράς. Επιπλέον, οι απώλειες των θερμικά κατεργασμένων ινών παρουσίασαν μικρή μείωση σε σχέση με τις ίνες αναφοράς. Η μείωση των απωλειών εμφανίστηκε και στις δύο περιπτώσεις εισόδου της δέσμης εντός της ίνας. Οι πειραματικές μετρήσεις περιλάμβαναν την εκτίμηση των αποκρίσεων συχνότητας, την απευθείας μέτρηση των απωλειών και τη μέτρηση του προφίλ κοντινού και μακρινού πεδίου για τα ζεύγη ινών. Αυτές οι μετρήσεις επιβεβαίωσαν ότι όταν η σύνδεση πηγής laser και ίνας ήταν άμεση, εμφανιζόταν σημαντικό κέρδος στο εύρος ζώνης για τη θερμικά κατεργασμένη ίνα, ενώ επιβεβαιώθηκε και η μικρή αύξηση της αφικνούμενης ισχύος. Η τελική πειραματική διερεύνηση περιλάμβανε τη μετάδοση δεδομένων, τη μέτρηση BER και τη λήψη και αποθήκευση διαγραμμάτων οφθαλμού για τις θερμικά κατεργασμένες ίνες και για τις αντίστοιχες ίνες αναφοράς με μεταβαλλόμενη παράμετρο το ρυθμό μετάδοσης. Η είσοδος της στενής οπτικής δέσμης γινόταν κεντραρισμένα με τον άξονα της ίνας. Αυτή η ομάδα μετρήσεων έδειξε καθαρά τη βελτίωση που είχαν υποστεί οι θερμικά κατεργασμένες ίνες σε σχέση με τις ίνες αναφοράς από την ίδια καλούμπα υπό το συγκεκριμένο καθεστώς σύνδεσης της πηγής με την ίνα. Η θεωρητική δικαιολόγηση ήταν ότι κατά τη θέρμανση μειώνονται διαταραχές του δείκτη διάθλασης

εντός του πυρήνα, όπως συσσωρευμένες τάσεις, μικρο-ρωγμές, μικρο-φουσαλίδες, ακαθαρσίες που μπορεί να εγκλωβίστηκαν κατά τη διαδικασία κατασκευής, αλλά ταυτόχρονα εξομαλύνονται ελαφρώς και ανωμαλίες που μπορεί να υπάρχουν στα όρια του πυρήνα με το μανδύα, όπως κατασκευαστικές ατέλειες και διακυμάνσεις της διαμέτρου του πυρήνα. Επομένως, με τη θέρμανση μειώνονται τα κέντρα σκέδασης μέσα στην πλαστική ίνα, ενώ μειώνονται και οι απώλειες από ακτινοβολήση τρόπων. Για τη κατάλληλη μοντελοποίηση του καναλιού έγινε απόδοση των μεταβολών από τη θέρμανση που συμβαίνουν στο εσωτερικό της ίνας σε κατάλληλες παραμέτρους. Η παράμετρος που εξέφρασε το «επίπεδο» ομογενοποίησης του πυρήνα ήταν ο συντελεστή σύζευξης, ενώ το επίπεδο ομαλότητας των ορίων του πυρήνα με το μανδύα που εκφράστηκε μέσω των τιμών που αποδόθηκαν στο παράγοντα ανακλάσεων. Οι τιμές που τέθηκαν σε αυτές τις παραμέτρους έδωσαν αποτελέσματα αποκρίσεων συχνότητας που συμβάδισαν σε σημαντικό βαθμό με τις αντίστοιχες αποκρίσεις που μετρήθηκαν πειραματικά τόσο για την περίπτωση άμεσης σύνδεσης laser-POF, όσο και στην περίπτωση όπου η δέσμη εισόδου κάλυπτε πλήρως τη διατομή της θερμικά κατεργασμένης ίνας. Αυτή η συμφωνία προέκυψε και για τις τιμές που τέθηκαν στις παραμέτρους που αναφέρθηκαν για την προσομοίωση των αντίστοιχων ινών αναφοράς. Σαφέστερα, από τη θέρμανση θεωρήθηκε ότι προκύπτει μείωση του συντελεστή σύζευξης και μικρή αύξηση του παράγοντα ανακλάσεων. Αυτές οι μεταβολές έδωσαν αποκρίσεις συχνότητας εναρμονισμένες με τις πειραματικές αποκρίσεις για ίνες και των δύο κατασκευαστών που επιλέχθηκαν.

Αυτά που μπορούν να τεθούν σα ζητήματα προς μελλοντική διερεύνηση είναι η ακριβέστερη μοντελοποίηση της πλαστικής οπτικής ίνας και της δέσμης εισόδου στην ίνα και η απόδοση ακριβέστερων τιμών στις κρίσιμες παραμέτρους που έχουν σημαντική επίδραση στα θεωρητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, ο θεωρητικός και πειραματικός έλεγχος του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει μία θερμικά κατεργασμένη ίνα 50 μέτρων με εφαρμογή τεχνικών εξίσωσης θα μπορούσε να αποτελέσει ένα πρόσθετο βήμα, καθώς θα είναι δυνατό να επέλθει σημαντική αλλαγή του υποστηριζόμενου ρυθμού μόνο επειδή εφαρμόστηκε η σχετική διαδικασία θέρμανσης. Σε κάθε περίπτωση, αυτό που θα μπορούσε να διαλευκανθεί είναι αν είναι δυνατή μία καλύτερη κατασκευή για SI-POF χωρίς πρόσθετο κόστος που θα έδινε μόνιμα βελτιωμένα χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας απλές συνδέσεις με πηγές laser οι οποίες στην περιοχή του ορατού φάσματος έχουν ιδιαίτερα προσιτό κόστος. Περνώντας σε μη τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, η μελέτη των ορίων μίας τυπικής SI-POF ως αισθητήρας θερμοκρασίας θα είχε αξία, επειδή θα γινόταν εφικτή η ανάπτυξη ενός απλού και φθηνού αισθητήρα. Ωστόσο, μία τέτοια εφαρμογή έχει εκ των προτέρων δυσκολίες, καθώς αν η κρίσιμη παράμετρος της οποίας οι αλλαγές θα εξετάζονταν ήταν οι απώλειες, φάνηκε ότι οι απώλειες μειώνονται με τη θερμοκρασία κατά ένα μικρό επίπεδο. Οπότε τίθεται το ζήτημα του καθορισμού της δυναμικής περιοχής ενός τέτοιου αισθητήρα. Επιστρέφοντας σε τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον, με την απαίτηση αύξησης των ρυθμών μετάδοσης μεσοπρόθεσμα στο τμήμα της πρόσβασης, όπως και στο τμήμα του δικτύου εντός του σπιτιού, μία λύση Fiber-In-The-Home που έχει τα χαρακτηριστικά των πλαστικών ινών είναι οι λύσεις των GI-POFs στις διάφορες εκδοχές τους, με μικρή αύξηση του κόστους με τα τρέχοντα δεδομένα. Θα είχε ενδιαφέρον να εξεταστεί η επίδραση κάποιου αντίστοιχου μοτίβου θέρμανσης στα χαρακτηριστικά τέτοιων ινών, καθώς από πειράματα που έχουν γίνει προέκυψε αύξηση των απωλειών σε δείγματα PF-GI-POFs λόγω της θέρμανσης σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες [200].

Στο τμήμα των ασύρματων μεταδόσεων, ο στόχος ήταν η κάλυψη μικρών αποστάσεων σε εξωτερικό περιβάλλον ώστε να μεταδοθούν σήματα σε χαμηλούς ρυθμούς όταν μεταξύ πομπού και δέκτη δεν υπάρχει οπτική επαφή. Οι συμβατικές τεχνολογίες μικροκυμάτων έχουν βρει τεράστια εφαρμογή σε διάφορες εκδοχές συστημάτων με τις

οποίες καλύπτονται μικρές ή μεγάλες αποστάσεις με δυνατότητα μετάδοσης σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς. Παρά την επιτυχή λειτουργία, οι μεταδόσεις με μικροκύματα απαιτούν την αγορά άδειας για τη χρήση κάποιου φάσματος ή αν είναι δωρεάν η χρήση, συνήθως υπάρχει έντονη πυκνότητα χρηστών με αποτέλεσμα ένα τέτοιο δίκτυο να βρίσκεται σε κορεσμό και να είναι χαμηλή η ρυθμαπόδοση. Επιπλέον, οι μικροκυματικές συνδέσεις παρουσιάζουν διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών οι οποίες πια μπορούν να διακριθούν ή ακόμα και να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση των επιδόσεων, με κάποια, όμως, επιβάρυνση σε επεξεργασία σήματος. Ταυτόχρονα, τα μικροκυματικά συστήματα είναι ευάλωτα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές είτε λόγω πολλαπλής χρήσης του ίδιου φάσματος σε κοντινές αποστάσεις είτε από έντονη χρήση γειτονικού φάσματος, ενώ δεν πρέπει να παραβλέπεται και το γεγονός ότι υπάρχουν παρεμβολές από ηλεκτρικά κυκλώματα ή ακόμα και ηθελημένες παρεμβολές σκοπό την υποβάθμιση των επιδόσεων μίας ζεύξης. Τους περιορισμούς των μικροκυματικών συστημάτων αντιμετωπίζουν τα οπτικά ασύρματα συστήματα με μεταδόσεις στο κοντινό υπέρυθρο ή ακόμα και στο ορατό φως. Ωστόσο, αυτό συμβαίνει θέτοντας σε οπτική επαφή πομπή και δέκτη. Σε ένα καθεστώς διάχυτων μεταδόσεων οι συμβατικές μπάντες οπτικών επικοινωνιών αρχίζουν να εμφανίζουν περιορισμούς, καθώς η έλλειψη οπτικής επαφής που επιβάλλουν οι διάχυτες μεταδόσεις απαιτεί την «εγκαθίδρυση μονοπατιών» στο ασύρματο μέσο ώστε να καταστεί δυνατή η σύνδεση μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη. Το «όχημα» για να επιτευχθούν οι μεταδόσεις με μετάδοση φωτός χωρίς οπτική επαφή είναι η σκέδαση του φωτός. Όπως φάνηκε στο κεφάλαιο 3, στην ατμόσφαιρα, που αποτελείται από μόρια και μικροσωματίδια, η σκέδαση των μορίων (Rayleigh) γίνεται εντονότερη με την πτώση του μήκους κύματος, ενώ και οι συντελεστές σκέδασης λόγω των μικροσωματιδίων (Mie) είναι ελαφρώς πτωτικοί με την αύξηση του μήκους κύματος. Επιπλέον, στα μήκη κύματος που αναφέρθηκαν, υπάρχει και ο οπτικός θόρυβος από το περιβάλλον που πρέπει να αντιμετωπιστεί και προέρχεται σε μεγάλο βαθμό από την ακτινοβολία του ηλίου που φθάνει στην επιφάνεια της γης. Η απαίτηση για ανυπαρξία οπτικής επαφής μεταξύ πομπού-δέκτη και η ικανοποιητική σχέση μεταξύ σήματος και θορύβου από το περιβάλλον κατά τη λήψη για την επίτευξη αποδεκτών επιδόσεων κάνουν δύσκολη την υιοθέτηση των συμβατικών οπτικών μπαντών για διάχυτες μεταδόσεις.

Συγκεντρώνοντας τις απαιτήσεις για το επιθυμητό σύστημα ασύρματων μεταδόσεων αυτές είναι το δωρεάν φάσμα, το οποίο δεν έχει υποστεί κορεσμό από την έντονη χρήση, η ανυπαρξία διαλείψεων λόγω πολυδιόδευσης, η προστασία από ηθελημένες παρεμβολές, η ασφάλεια των μεταδόσεων με διάχυτο τρόπο και η επικοινωνία με μειωμένο θόρυβο από το εξωτερικό περιβάλλον. Μία περιοχή του φάσματος που καλύπτει όλες αυτές τις απαιτήσεις είναι η ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα που βρίσκεται μεταξύ 200 nm και 280 nm. Σε αυτή την περιοχή του φάσματος, η απορρόφηση από την ατμόσφαιρα είναι εντονότερη σε σχέση με άλλες μπάντες, αλλά τα χαμηλά μήκη κύματος επιτρέπουν την εντονότερη σκέδαση, που αποτελεί κρίσιμη παράμετρο που ικανοποιείται ώστε να δομηθούν ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή στον ελεύθερο χώρο. Σημαντικό πλεονέκτημα, όμως, είναι ότι ο θόρυβος σε αυτό το τμήμα του φάσματος που αφικνείται από τον ήλιο είναι πολύ χαμηλός ως μηδενικός, όπως υποδηλώνει και το όνομα της μπάντας, και ο λόγος είναι η απορρόφηση στα ανώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας κυρίως από το όζον πάνω από τα 250 nm και από το οξυγόνο στην περιοχή μεταξύ 200 και 250 nm. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη λήψη σε ένα δέκτη που έλαβε πληροφορία από κάποια πηγή εκτός οπτικής επαφής, η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος δε θα είναι ιδιαίτερα υποβαθμισμένη λόγω του θορύβου από το περιβάλλον. Επιπλέον, όσον αφορά τις απώλειες, αυτές θα είναι σχετικά υψηλές εξαιτίας της διάχυτης επικοινωνίας. Αυτό σημαίνει ότι επιβάλλεται η εφαρμογή χαμηλών ρυθμών, αλλά δεν πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι λόγω των υψηλών απωλειών προστατεύεται το μεταδιδόμενο σήμα από υποκλοπή από απόσταση. Όμοια, οι

αυξημένες απώλειες δεν επιτρέπουν τις ηθελημένες παρεμβολές από απόσταση. Επομένως, η ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα δίνει τη δυνατότητα κάλυψης της επικοινωνίας και απόκρυψης της μετάδοσης από απόσταση, αυξάνοντας την ασφάλεια του συστήματος. Πρόσθετος στόχος που τέθηκε ήταν η εξασφάλιση της λειτουργίας υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες, πχ υπό την εμφάνιση ομίχλης. Η εμφάνιση ομίχλης έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός πυκνότερου μέσου με περισσότερους σκεδαστές σε σχέση με την καθαρή ατμόσφαιρα, άρα είναι πιθανό το κανάλι που βασίζεται στη σκέδαση για την εγκατάσταση μίας ζεύξης να ευνοηθεί από την ύπαρξη περισσότερων σκεδαστών.

Αφού καθορίστηκαν οι απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτει το σύστημα των οπτικών ασύρματων μεταδόσεων σε εξωτερικό περιβάλλον, ακολούθησε μία απόπειρα μοντελοποίησης της διάδοσης φωτονίων εντός του ασύρματου μέσου, ώστε να προκύψουν κάποια πρώτα συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες που προσφέρει το μέσο, όσον αφορά τις απώλειες που προκύπτουν και το εύρος ζώνης που παρουσιάζει. Για την περιγραφή της διάδοσης των φωτονίων στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιήθηκε αρχικά ένα απλό μοντέλο μονής σκέδασης. Το μήκος κύματος τέθηκε στα 265 nm. Η θεωρητική μελέτη των απωλειών και του εύρους ζώνης που μπορεί να επιτευχθεί υπό γωνίες ανύψωσης που επιβάλλουν την έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη, ο οποίος είχε πολύ μεγάλη γωνία θέασης, έδειξε ότι σε ένα πυκνό μέσο προέκυψε πτώση των απωλειών και αύξηση του εύρους ζώνης σε μία εμβέλεια 50 μέτρων σε σχέση με την περίπτωση ενός αραιού μέσου, όπως είναι η καθαρή ατμόσφαιρα. Σε αυτό το σημείο, ο καθορισμός της πυκνότητας του μέσου γινόταν μέσω των συντελεστών απορρόφησης και σκέδασης Rayleigh και Mie από ενδεικτικές τιμές της βιβλιογραφίας. Οι απώλειες και οι αποκρίσεις συχνότητας που προέκυψαν εφαρμόστηκαν για τη θεωρητική μελέτη μεταδόσεων παλμικών σημάτων και σημάτων που ήταν διαμορφωμένα κατά τα σχήματα διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων ACO-OFDM και Flip-OFDM. Η πηγή θεωρήθηκε ότι ήταν LED στα 265 nm και ο δέκτης ένας PMT, για τον οποίο αναπτύχθηκε το μοντέλο ώστε να ενσωματώνονται κατάλληλα όλες οι συνιστώσες θορύβου ενοποιώντας την αλληλουχία της μετατροπής των φωτονίων σε ηλεκτρόνια και της ενίσχυσης των τελευταίων από τις δυνάμεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν την ανωτερότητα του παλμικού σχήματος 4-PPM για το χαμηλό ρυθμό των 10 kbit/s στις περιπτώσεις αραιής και πολύ πυκνής ατμόσφαιρας. Στο πολύ πυκνό μέσο, οι απαιτήσεις σε ισχύ εκπομπής για όλα τα σχήματα διαμόρφωσης μειώθηκαν λόγω της πτώσης των απωλειών, ενώ περαιτέρω βελτίωση προέκυψε για το παλμικό σχήμα OOK με εφαρμογή NRZ παλμών λόγω της μείωσης της διάχυσης του καναλιού, η οποία φάνηκε να επηρεάζει το συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης περισσότερο, παρά το χαμηλό ρυθμό. Επιπλέον, στο πολύ πυκνό μέσο, η μελέτη του BER συναρτήσεως του SNR έδειξε ότι υπάρχει ένα μικρό κέρδος στο SNR για τα σχήματα πολλαπλών φερόντων σε σχέση με τις εκδοχές του παλμικού OOK, παρά το γεγονός ότι θεωρήθηκε η ίδια ισχύς εκπομπής.

Μένοντας στο σενάριο όπου ο δέκτης έχει πολύ ευρύ FOV, θεωρήθηκαν οι μεταδόσεις περισσότερων του ενός πομπού που δημιουργούν μία δικτυακή υποδομή από μία μικρή ομάδα κόμβων στο ίδιο μήκος κύματος που θεωρήθηκε ως τώρα. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μονής σκέδασης ανά ζεύξη που δημιουργείται μεταξύ καθενός πομπού και του κεντρικού δέκτη με τον οποίο είναι όλοι οι κόμβοι ευθυγραμμισμένοι. Μελετήθηκαν διάφορα σενάρια μεταδόσεων παλμικών σημάτων κωδικοποιημένων κατά CDMA, ώστε να εξεταστούν οι απαιτήσεις σε εκπεμπόμενη ισχύ για κάποιον από τους κόμβους που θεωρείται επιθυμητός. Τα σήματα που υπέστησαν την κωδικοποίηση ήταν αρχικά διαμορφωμένα κατά OOK ή 4-PPM. Οι ρυθμοί δεδομένων πριν την κωδικοποίηση ήταν 10 kbit/s. Βάσει των αποτελεσμάτων, το εύρος ζώνης του αραιού καναλιού, αρχίζει να είναι πρόσθετος παράγοντας που επιβάλλει την

αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος εκτός από τις απώλειες, καθώς τα εκπεμπόμενα κωδικοποιημένα σήματα έχουν διευρυμένο φάσμα. Επιπλέον, η ταυτόχρονη χρήση του μέσου από πολλούς κόμβους επιβάλλει την ανάγκη αύξησης των εκπεμπόμενης ισχύος ώστε να επιτευχθεί η τιμή BER που είχε τεθεί ως στόχος στο δέκτη. Με αυξανόμενη την πιθανότητα εκπομπής κάποιων κόμβων των οποίων οι μεταδόσεις αποτελούν παρεμβολές για τον επιθυμητό, απαιτείται και υψηλότερο επίπεδο εκπεμπόμενης ισχύος. Υπό καθεστώς πυκνότερης ατμόσφαιρας, οι απαιτήσεις σε εκπεμπόμενη ισχύ μειώθηκαν σημαντικά καθώς οι απώλειες μειώθηκαν και ταυτόχρονα το διευρυμένο φάσμα του καναλιού επέτρεψε τη μετάδοση των διευρυμένων σημάτων με μικρότερη αλληλοπαρεμβολή συμβόλων. Συγκριτικά, το σχήμα ΟΟΚ έδωσε καλύτερα αποτελέσματα από το 4-PPM, ειδικότερα στο αραιό κανάλι όπου τα φασματικά στενότερα (κωδικοποιημένα) ΟΟΚ σήματα επηρεάζονται λιγότερο από ζητήματα αλληλοπαρεμβολής συμβόλων. Στο πολύ πυκνό κανάλι, οι διαφορές είναι σημαντικά μειωμένες, και πάλι όμως υπέρ του ΟΟΚ, παρά τη βέλτιστη φώραση του 4-PPM. Η διάρκεια των chips είναι ο βασικός περιορισμός του 4-PPM, καθώς είναι μικρότερη κατά την κωδικοποίηση των θυρίδων του 4-PPM σε σχέση με τη διάρκεια των chips κατά την κωδικοποίηση των bits. Για ένα μη μηδενικό chip, το μέσο πλήθος των φωτοηλεκτρονίων που αντιστοιχούν στη διάρκεια του chip μετά την ολοκλήρωση στο δέκτη είναι μικρότερο για το 4-PPM σε σχέση με το ΟΟΚ. Με την αύξηση του πλήθους των κόμβων, οι απαιτήσεις σε ισχύ έγιναν ακόμα μεγαλύτερες για τις δύο περιπτώσεις κωδικοποιημένων σημάτων που μεταδόθηκαν. Και πάλι, οι απαιτήσεις μετριάστηκαν στην περίπτωση του πολύ πυκνού μέσου.

Η ανάπτυξη του μοντέλου που υποστηρίζει πολλαπλές σκεδάσεις κατά τη διάδοση των φωτονίων μέσα στο μέσο συνδυάστηκε με τη δυνατότητα υπολογισμού των συνθηκών που επικρατούν στο μέσο με μεγαλύτερη ελευθερία, καθώς ενσωματώθηκε η επίλυση των εξισώσεων της θεωρίας Mie, δίνοντας τη δυνατότητα υπολογισμού των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης μέσα σε αραιό, αλλά και σε πυκνότερο μέσο, προτού αυτοί εφαρμοστούν στο μοντέλο διάδοσης του φωτός. Επιπλέον, ενσωματώθηκε η δυνατότητα υπολογισμού των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης λόγω των αερολυμάτων, από μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας, λαμβάνοντας υπόψη συνθήκες σχετικής υγρασίας και ορατότητας. Τέτοια μοντέλα αερολυμάτων είναι για παράδειγμα το αστικό και αγροτικό μοντέλο, εκ των οποίων το αστικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης σε ένα καθεστώς αραιής ατμόσφαιρας με ορατότητα 15 km και σχετική υγρασία 30%.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων για τον υπολογισμό των απωλειών στα 265 nm υπό τη θεώρηση υψηλών γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη, ίσες με 70° , υποθέτοντας συμβατικές τιμές για τη γωνία απόκλισης της δέσμης της πηγής και το FOV του δέκτη, 10° και 30° , αντίστοιχα, και ταυτόχρονα θέτοντας στα 192 nm^2 την επιφάνεια του φωτοπολλαπλασιαστή φάνηκε και πάλι ότι όταν στο μέσο θεωρηθεί ότι εμφανίζεται ομίχλη, για αποστάσεις δεκάδων μέτρων, προκύπτει μείωση των απωλειών. Ωστόσο, η μείωση εμφανίζεται υπό την προϋπόθεση οι ακτίνες των σταγονιδίων νερού που αποτελούν την ομίχλη δεν ξεπερνούν κάποια τιμή. Το όριο της ακτίνας πέρα από το οποίο αρχίζουν οι απώλειες να αυξάνονται και πάλι εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά και από την πυκνότητα των σταγονιδίων. Σε αυτό το σημείο, τονίζεται ότι δε χρησιμοποιήθηκε κάποια κατανομή μεγέθους όταν εφαρμοζόταν κάποια τιμή ακτίνας σταγονιδίων και αυτό σημαίνει ότι όλα τα σταγονίδια ομίχλης είχαν την ίδια ακτίνα.

Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα καναλιού, στην περίπτωση όπου αναπόφευκτα οι πολλαπλές σκεδάσεις θα επηρεάσουν σημαντικά, πχ σε πολύ πυκνό μέσο ή ακόμα και στο αραιό μέσο όταν οι γωνίες ανύψωσης είναι πολύ υψηλές, φάνηκε ότι η καλύτερη

ανάδειξη των λεπτομερειών που προέκυψαν από τη διάδοση στο ασύρματο μέσο έγινε με το μοντέλο που προβλέπει πολλαπλές σκεδάσεις.

Η εικόνα που προέκυψε από τις εκτιμήσεις των απωλειών έδειξε ότι η πύκνωση του μέσου μπορεί να λειτουργήσει ευνοϊκά για τη ζεύξη μέχρι κάποια όρια μεγέθους σταγονιδίων και πυκνότητας αυτών. Μένοντας στην επίδραση των απωλειών, με γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη στις 70° και για γωνία απόκλισης της δέσμης και FOV του δέκτη 10° και 30° , αντίστοιχα, όπως πριν, στα 265 nm θεωρήθηκαν μεταδόσεις σημάτων διαμορφωμένων κατά 4-PPM και Flip-OFDM. Υπό τις υποτιθέμενες συνθήκες, και για ρυθμό 10 kbit/s, οι απώλειες θα καθορίσουν τις επιδόσεις σε μεγάλο βαθμό και όχι κάποιος περιορισμός στο εύρος ζώνης. Με την εμφάνιση ομίχλης, δηλαδή με την εμφάνιση πρόσθετων κέντρων σκέδασης που είναι τα σταγονίδια νερού, το SNR στο δέκτη αυξανόταν και για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης. Όπως αναμενόταν, από κάποια τιμή της ακτίνας των σταγονιδίων και πάνω, εμφανίστηκε μεταστροφή της συμπεριφοράς με μείωση του SNR. Αυτή η μεταστροφή πραγματοποιήθηκε σε μικρότερες ακτίνες σταγονιδίων για την μεγαλύτερη απόσταση (50 μέτρα) και για τη μεγαλύτερη πυκνότητα των σταγονιδίων (200 dr./cm^3).

Παρά τις απλουστευτικές θεωρήσεις, όπως στην περίπτωση των σταγονιδίων ομίχλης για τα οποία δε θεωρήθηκε κάποια κατανομή μεγέθους, οι ενδείξεις ότι το πυκνό μέσο επιτρέπει τη βελτίωση των επιδόσεων σε μία ζεύξη χωρίς οπτική επαφή και εφαρμογή μεταδόσεων UV-C ακτινοβολίας στα 265 nm ήταν ισχυρές. Η υπόθεση ότι οι έντονες σκεδάσεις υπερτερούν της απορρόφησης και μπορούν να δώσουν βελτίωση των επιδόσεων μέσω κυρίως της μείωσης των απωλειών είναι βάσιμες, αρκεί οι συντελεστές σκέδασης να μην έχουν ιδιαίτερα υψηλή τιμή. Αυτό συμβαίνει επειδή από τη μία σύμφωνα με το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων θα προκύψει αύξηση του συντελεστή απόσβεσης που θα επιβαρύνει αρνητικά τις τιμές της πιθανότητας επιτυχούς άφιξης των φωτονίων στο δέκτη μειώνοντάς τις, και από την άλλη θα αναδειχθεί η σκέδαση Mie εις βάρος της σκέδασης Rayleigh επιβάλλοντας το χαρακτηριστικό της υψηλής εμπρόσθιας κορυφής στη συνάρτηση φάσης.

Μετά τα ενθαρρυντικά θεωρητικά αποτελέσματα που αποτύπωναν όχι μόνο τη δυνατότητα εγκατάστασης ζεύξεων χωρίς οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας, αλλά και τη δυνατότητα βελτίωσης των αποτελεσμάτων υπό συνθήκες πύκνωσης της ατμόσφαιρας, ήταν αναμενόμενο να ακολουθήσει μία ομάδα μετρήσεων που θα επιβεβαίωνε ή θα αναιρούσε την τάση που παρατηρήθηκε στις προσομοιώσεις. Στο πειραματικό μέρος μελετήθηκαν ζεύξεις αποκλειστικά δύο σημείων. Σαν πηγή χρησιμοποιήθηκε ομάδα από 4 LEDs που εξέπεμπαν στα 265 nm, ενώ στο οπτικό του τμήμα, ο δέκτης αποτελούνταν από ένα φίλτρο ακολουθούμενο από τον φωτοπολλαπλασιαστή. Για αποστάσεις κάλυψης μέχρι 20 μέτρα, πραγματοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος μετρήσεων που αφορούσε τη μέτρηση των απωλειών. Προέκυψαν διαγράμματα μέτρησης των απωλειών συναρτήσει των γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη, αλλά και της απόστασης μεταξύ αυτών. Οι απώλειες του ασύρματου μέσου ήταν αρκετά υψηλές με μεγαλύτερη επιβάρυνση στις υψηλότερες γωνίες ανύψωσης. Ενδεικτικά, στα 5 μέτρα, τα 90 dB απωλειών ξεπεράστηκαν όταν πομπός και δέκτης τέθηκαν υπό γωνίες ανύψωσης 70° και 50° , αντίστοιχα. Στα 10 μέτρα, τα 90 dB απωλειών ξεπεράστηκαν όταν η γωνία ανύψωσης πομπού και δέκτη τέθηκαν στις 60° και 40° , αντίστοιχα. Στη μεγαλύτερη απόσταση των 20 μέτρων, τα 90 dB απωλειών ξεπεράστηκαν όταν τόσο πομπός και όσο δέκτης ήταν ανυψωμένοι στις 40° .

Επόμενο βήμα στη μελέτη ήταν ο έλεγχος της επίδρασης ενός πυκνότερου μέσου στις απώλειες. Για την πειραματική υλοποίηση της αλλαγής του μέσου χρησιμοποιήθηκε μία μηχανή παραγωγής τεχνητής ομίχλης. Η εμφάνιση ομίχλης συνοδεύτηκε από πτώση απωλειών. Για την επιβεβαίωση ότι οι αλλαγές δεν είναι τυχαίες αλλά μπορούν να

επαναληφθούν, η διαδικασία κατά την οποία οι μετρήσεις υπό την απουσία, την παρουσία, και την διάλυση της ομίχλης επαναλήφθηκαν, και οι αλλαγές και πιο συγκεκριμένα οι μειώσεις των απωλειών εμφανίστηκαν σε παρόμοιο επίπεδο ανά επανάληψη και γεωμετρικό σχηματισμό. Η δυσκολία στην περιγραφή των βελτιώσεων έχει να κάνει με το γεγονός ότι η μείωση των απωλειών είναι διαφορετική ανά γεωμετρικό σχηματισμό υπό την παρουσία ομίχλης. Επομένως, διαφορετικό επίπεδο πτώσης των απωλειών επιτεύχθηκε για τις ίδιες γωνίες ανύψωσης, αλλά σε διαφορετικές αποστάσεις ή στην ίδια απόσταση, αλλά για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης. Η μέση βελτίωση ξεπέρασε τα 10 dB σε πτώση των απωλειών για κάποιους γεωμετρικούς σχηματισμούς στα 10 μέτρα και τα 7 dB στα 20 μέτρα. Για μία συγκεκριμένη τοπολογία, δόθηκε και εικόνα του ημιτόνου που λαμβανόταν ώστε να εκτιμηθούν οι απώλειες υπό την απουσία και υπό την παρουσία ομίχλης. Φάνηκε πολύ καθαρά η επωφελής επίδραση της εμφάνισης πρόσθετων κέντρων σκέδασης στο μέσο, ώστε τελικά να μετρηθεί ένα εμφανώς καθαρότερο σήμα, καθώς η πτώση των απωλειών έδωσε αύξηση της αφικνούμενης ισχύος που θα δώσει υψηλότερο SNR στο ηλεκτρικό επίπεδο.

Αφού αξιολογήθηκε η συμπεριφορά του μέσου όσον αφορά τις απώλειες σε αραιή ατμόσφαιρα και υπό την εμφάνιση τεχνητής ομίχλης, αυτό το ασύρματο μέσο θα έπρεπε να «χρησιμοποιηθεί» για μεταδόσεις σημάτων ώστε να αξιολογηθούν οι δυνατότητες μετάδοσης σε χαμηλούς ρυθμούς. Τέθηκε, λοιπόν, η ανάγκη απάντησης σε ερωτήματα όπως μέχρι ποιες γωνίες ανύψωσης πομπού και δέκτη και μέχρι ποια απόσταση, μπορεί να εξασφαλιστεί η λειτουργία της ζεύξης σε αποδεκτά επίπεδα BER, όταν τα μεταδιδόμενα σήματα είναι διαμορφωμένα κατά τα σχήματα 4-PPM ή Flip-OFDM; Θα προκύψει μεταβολή του BER υπό ένα καθεστώς όπου έχει εμφανιστεί ομίχλη;

Για να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα, ακολούθησε η συλλογή μεγάλου πλήθους μετρήσεων, αρχικά υπό καθεστώς αραιής ατμόσφαιρας. Χρησιμοποιήθηκαν ο ίδιος πομπός και ο δέκτης όπως στη μέτρηση των απωλειών. Ο ρυθμός που εφαρμόστηκε ήταν 10 kbit/s. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το παλμικό 4-PPM απέδωσε καλύτερα σε μεγαλύτερο εύρος γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη, ειδικά μετά τα 10 μέτρα σε σχέση με το Flip-OFDM. Η σχετικά χαμηλή ισχύς εκπομπής και η μικρή δυναμική περιοχή του δέκτη δεν άφησε μεγάλα περιθώρια ώστε ακόμα και στα 20 μέτρα να ελεγχθούν οι δυνατότητες των σχημάτων διαμόρφωσης σε πολύ υψηλές γωνίες ανύψωσης. Σε ένα περιβάλλον διάχυτων μεταδόσεων όπου η αφικνούμενη ισχύς στο δέκτη είναι τόσο ασθενής ώστε ο δέκτης να λειτουργεί σε ένα καθεστώς μέτρησης φωτονίων, η βέλτιστη φώραση του παλμικού σχήματος 4-PPM είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη υλοποίηση τέτοιων ζεύξεων.

Η αναγκαιότητα ένα σύστημα διάχυτων μεταδόσεων σε εξωτερικό περιβάλλον να λειτουργεί και υπό αντίξοες συνθήκες οδήγησε σε μία σειρά πειραμάτων με τα οποία αξιολογήθηκαν τα δύο σχήματα διαμόρφωσης υπό καθαρή ατμόσφαιρα και υπό καθεστώς εμφάνισης τεχνητής ομίχλης. Τόσο το Flip-OFDM, όσο και το 4-PPM, απέδωσαν πολύ καλύτερα υπό την ύπαρξη ομίχλης. Από τις μετρήσεις, προέκυψε μία καθαρή πτώση του BER όταν έμπαινε σε λειτουργία η μηχανή παραγωγής ομίχλης. Η μείωση των απωλειών οδηγούσε σε αύξηση της λαμβανόμενης οπτικής ισχύος στο δέκτη και κατ' επέκταση σε βελτίωση του SNR, όπως συνέβη και με τα ημιονικά σήματα κατά τη μέτρηση των απωλειών. Αύξηση του SNR μεταφράζεται σε πτώση του BER. Όπως και κατά τη μέτρηση των απωλειών, έτσι και για τις εκτιμήσεις του BER με και χωρίς ομίχλη στο μέσο, οι διαφορετικοί γεωμετρικοί σχηματισμοί έδωσαν και διαφορετικές βελτιώσεις στο BER. Στις μικρές αποστάσεις, όπου ήταν ευκολότερη η πιο ομοιόμορφη κάλυψη του χώρου με ομίχλη, φάνηκαν οι σημαντικές αλλαγές που επήλθαν λόγω των εντονότερων σκεδάσεων στο πυκνό μέσο και οι οποίες επαναλήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

Οι αλλαγές καταδείχθηκαν και με διαγράμματα όπου απεικονίζονταν διαδοχικοί παλμοί 4-PPM υπό καθαρή ατμόσφαιρα και υψηλό BER, αλλά και υπό την παρουσία ομίχλης. Η αύξηση του SNR ήταν καθαρή για τα ισχυρότερα σήματα που λάμβανε ο δέκτης στο πυκνότερο μέσο. Όμοια, οι ιδιαίτερα ενθόρυβοι αστερισμοί στην περίπτωση του Flip-OFDM για υψηλές τιμές BER, έπαιρναν μία μορφή με πολύ πιο ευδιάκριτα όρια που επέτρεπαν τη μείωση των λαθών στο δέκτη. Η εικόνα όπου οι απώλειες μειώθηκαν και η αύξηση του SNR οδήγησε σε πτώση του BER στο πυκνό μέσο επαναλήφθηκε και στην περίπτωση διαφορετικού ρυθμού μετάδοσης για το Flip-OFDM, όπου και πάλι το κέρδος ήταν σημαντικό όταν το μέσο γινόταν πυκνότερο.

Η ανάπτυξη ζεύξεων στη UV-C μπάντα γύρω από τα 265 nm σε εξωτερικό περιβάλλον δεν θα οδηγήσει σε αποδοτική λειτουργία όταν πομπός και δέκτης τεθούν υπό οπτική επαφή και ταυτόχρονα εμφανιστούν πρόσθετα κέντρα σκέδασης μέσα στο μέσο. Σε αυτή την περίπτωση, η έντονη σκέδαση λειτουργεί καταστροφικά θέτοντας τη ζεύξη εκτός λειτουργίας με δριμύτατη αύξηση του BER, λόγω της ιδιαίτερα μεγάλης αύξησης των απωλειών. Αυτές οι θεωρήσεις επιβεβαιώθηκαν πειραματικά με την αντικατάσταση του φωτοπολλαπλασιαστή από μία pin φωτοδίοδο με ένα κατάλληλο φακό. Αστερισμοί Flip-OFDM που μετρήθηκαν πριν την εμφάνιση, κατά τη διάρκεια και μετά τη διάλυση της τεχνητής ομίχλης κατέδειξαν τους περιορισμούς του συστήματος όταν αυτό τέθηκε σε λειτουργία με οπτική επαφή.

Όσον αφορά τα ανοιχτά θέματα στη θεματική ενότητα των οπτικών ασύρματων μεταδόσεων στη UV-C μπάντα γύρω από τα 265 nm, η πιο λεπτομερής θεωρητική περιγραφή με χρήση πρόσθετων πειραματικών δεδομένων θα δώσει ακόμα μεγαλύτερη ώθηση στην κατανόηση και στην αξιοποίηση των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη σμήνους θεωρητικών καμπυλών είτε των απωλειών είτε του BER για κάποιο σχήμα διαμόρφωσης με τη βοήθεια από πειραματικά δεδομένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πλήρη περιγραφή του ασύρματου μέσου. Για παράδειγμα, από τη «χαρτογράφηση» των απωλειών συναρτήσει των γωνιών ανύψωσης πομπού και δέκτη και της απόστασης όπως έγινε στην ενότητα 3.3.1, με βοήθεια από πρόσθετο αλλά όχι ιδιαίτερα εξειδικευμένο και ακριβό εξοπλισμό, θα μπορούσαν να εξαχθούν οι παράμετροι του περιβάλλοντος, ώστε να μπορούν να προβλεφθούν θεωρητικά και με αξιόπιστο τρόπο οι εκτιμήσεις των απωλειών μέσω των μοντέλων είτε για μεγαλύτερες αποστάσεις είτε για διαφορετικούς γεωμετρικούς σχηματισμούς είτε για άλλες ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η σχετική υγρασία και η ορατότητα, χωρίς, όμως, το αποτέλεσμα να είναι μόνο ο καθορισμός των συντελεστών σκέδασης και απορρόφησης του μέσου. Παραμετρικά μοντέλα υπάρχουν ήδη στη βιβλιογραφία για τις απώλειες [149] και τις κρουστικές αποκρίσεις των καναλιών [151], αλλά περιορίζονται μόνο στις συνθήκες υπό τις οποίες προέκυψαν τα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον, η δυσκολία ενός τέτοιου εγχειρήματος, μπορεί να φανεί και από τη θεωρητική περιγραφή της ομίχλης που ήταν αρκετά απλουστευμένη. Παρά το ότι η δυναμική της βελτίωσης του BER υπό την παρουσία ομίχλης ήταν προφανής πειραματικά, η θεωρητική περιγραφή ήταν δύσκολη λόγω έλλειψης δεδομένων που αφορούσαν τα χαρακτηριστικά της παραγόμενης ομίχλης από τη μηχανή, όπως άγνωστη ήταν και η ορατότητα υπό καθεστώς αραιής ατμόσφαιρας. Η απουσία τέτοιων δεδομένων δυσκολεύει την ακριβή θεωρητική περιγραφή των φαινομένων και την ενσωμάτωση ρεαλιστικών συνθηκών και τιμών παραμέτρων στα θεωρητικά μοντέλα. Επομένως, ένας στόχος θα ήταν η ανάπτυξη μίας πλατφόρμας από βελτιωμένα θεωρητικά μοντέλα ασύρματων καναλιών και συνθηκών στο μέσο η οποία θα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί με συνδυασμό παραμέτρων για την εκτίμηση είτε των απωλειών ή/και την εκτίμηση του BER σαν αξιόπιστο θεωρητικό εργαλείο επιβεβαίωσης και ενίσχυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων. Σε αυτή την περίπτωση θα προέκυπτε ένα αξιόπιστο εργαλείο με επικαιροποιημένα δεδομένα που να δίνει είτε ρεαλιστικά

αποτελέσματα ακόμα και υπό διαφορετικές συνθήκες στο ασύρματο μέσο είτε μία σχετικά αξιόπιστη εικόνα των συνθηκών στο μέσο υπό τις οποίες προέκυψαν κάποια μετρούμενα αποτελέσματα.

Περνώντας στα πειραματικά αποτελέσματα, οι υψηλές απώλειες προκάλεσαν σημαντικούς περιορισμούς στα μεταδιδόμενα σήματα, περιορίζοντας τις γωνίες ανύψωσης για τις οποίες ο ρυθμός BER είχε αποδεκτές τιμές με την αύξηση της απόστασης. Επομένως, τίθεται το θέμα της βελτιστοποίησης των επιπέδων ισχύος εκπομπής μέσα σε αποδεκτά όρια ασφαλείας, για την κάλυψη όσο το δυνατό μεγαλύτερων αποστάσεων και υψηλότερων γωνιών ανύψωσης. Άλλο ζήτημα που μπορεί να προκαλέσει περιορισμούς είναι η δυναμική περιοχή λειτουργίας του δέκτη. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν το εύρος των τάσεων στο ηλεκτρικό επίπεδο μέσα στο οποίο λειτούργησε ο δέκτης περιοριζόταν στα όρια που έθετε η κάρτα ήχου του υπολογιστή. Όπως φάνηκε μπορεί να εμφανιστούν ψαλιδισμοί σε κάποιο λαμβανόμενο σήμα ειδικά με την αλλαγή των συνθηκών, όπως η πύκνωση του μέσου. Επομένως, η βελτίωση της δυναμικής περιοχής του δέκτη είναι ένα κρίσιμο θέμα.

Όσον αφορά τις συνθήκες στο ασύρματο κομμάτι, η βελτιστοποίηση της παραγωγής ομίχλης σε πειραματικό επίπεδο σε εξωτερικό περιβάλλον αποτέλεσε δύσκολη διαδικασία εξαιτίας της αστάθειας του μέσου κατά τη λειτουργία της μηχανής ομίχλης.

Επόμενο βήμα είναι η μελέτη και ανάπτυξη λειτουργικών δικτυακών υποδομών ώστε να μπορούν να υποστηριχθούν ρεαλιστικές τοπολογίες ασύρματων δικτύων στην περιοχή της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας. Δεδομένης της φύσης των καναλιών που προκύπτουν από τις διάχυτες μεταδόσεις, αυτού του είδους, η τεχνολογία θα μπορούσε να βρει εφαρμογή σε ad hoc δίκτυα με μεταδόσεις σε χαμηλούς ρυθμούς. Σε αυτή την περίπτωση, θέματα που θα τεθούν είναι η μορφή των κόμβων που θα επιτρέπουν την απρόσκοπτη λειτουργία ανεξάρτητα από την τοπολογία του δικτύου. Η συσχέτιση με πειραματικές μετρήσεις θα αποτελέσει παράγοντα καθοδήγησης κατά την ανάπτυξη των κόμβων, διότι θα πρέπει να αποφευχθούν παρεμβολές από γειτονικούς κόμβους ή ακόμα και από τον ίδιο τον κόμβο στον εαυτό του, να καλυφθούν αποστάσεις που θα καθοριστούν ως μέγιστες, να εξασφαλιστεί η λειτουργία λόγω περιορισμών από τη γεωμετρία στο περιβάλλον, πχ λόγω εμφάνισης εμποδίων, και να εξασφαλιστεί η λειτουργία υπό διαφορετικές συνθήκες στο περιβάλλον, πχ έντονη ηλιοφάνεια, εμφάνιση ομίχλης, βροχής κα. Αυτά θα καθορίσουν τις γωνίες ανύψωσης των πηγών και των φωτοφωρατών και την προσθήκη κατάλληλων φίλτρων. Αυτό συνεπάγεται και ένα έλεγχο κόστους, διότι θα πρέπει να καθοριστούν το πλήθος των πηγών, των φωτοφωρατών και τα ηλεκτρικά τμήματα των κόμβων. Επιπλέον, για τη λειτουργία του δικτύου τίθεται και το ζήτημα της πολλαπλής πρόσβασης των κόμβων στο μέσο. Θα πρέπει να εξεταστεί κατά πόσο οι ιδιαιτερότητες του ασύρματου μέσου στην συγκεκριμένη μπάντα μηκών κύματος επηρεάζουν το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης που θα πρέπει να υιοθετηθεί. Επομένως, η προσπάθεια ανάπτυξης και λειτουργίας ενός τέτοιου δικτύου θα αποτελούσε ένα βήμα που θα επέβαλε τον έλεγχο πολλών πρόσθετων παραμέτρων.

Η τεχνολογία που περιγράφηκε σε συνδυασμό με τη συγκεκριμένη μπάντα μηκών κύματος θα μπορούσε να βρει εφαρμογή σε κάποιο σύστημα επικοινωνίας είτε μεταξύ οχημάτων και κάποιας σταθερής υποδομής είτε μεταξύ οχημάτων είτε μεταξύ οχημάτων σε σχηματισμό. Για την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων ή μεταξύ οχήματος και σταθερής υποδομής, πχ κάποιο σημείο που εκπέμπει πληροφορίες ελέγχου για την κίνηση ή για κάποιο ατύχημα ώστε να πληροφορηθεί έγκαιρα ο οδηγός, προβλέπεται η δυνατότητα λειτουργίας συστημάτων επικοινωνίας που έχουν ήδη προδιαγραφεί, όπως το IEEE 802.15.7 που αποτελεί VLC τεχνολογία με δυνατότητα εφαρμογής σε εξωτερικό περιβάλλον για μεταδόσεις σε χαμηλούς ρυθμούς [130]. Ένα σύστημα επικοινωνίας στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα μπορεί να εφαρμοσθεί επικουρικά σε συμβατικά

συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Δεδομένων των περιορισμών που είναι δυνατό να προκύψουν από τη VLC τεχνολογία, η δυνατότητα χρήσης ενός βοηθητικού συστήματος που θα λειτουργεί στη μπάντα μεταξύ των 200 nm και των 280 nm προκαλεί ενδιαφέρον. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, σε αυτή τη μπάντα, ο θόρυβος από τον ήλιο που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι περιορισμένος, όπως πιο περιορισμένος είναι και ο θόρυβος από τεχνητές πηγές σε σχέση με το ορατό φως. Ταυτόχρονα, επειδή όπως φάνηκε πειραματικά, οι μεταδόσεις στη μπάντα μεταξύ των 200 και 280 nm δύνανται να υλοποιηθούν με διάχυτο τρόπο ή με τον πομπό και το δέκτη να είναι μεν σε οπτική επαφή, αλλά με χαλαρή την ανάγκη αυστηρής ευθυγράμμισης, μπορεί να ξεπεραστεί ο περιορισμός της στενής γωνίας θέασης του δέκτη (FOV) που επιβάλλεται στη VLC τεχνολογία για αντιμετώπιση του θορύβου χωρίς να υπάρχει ανάγκη χρήσης πρόσθετης επεξεργασίας κατά την εκπομπή και λήψη των σημάτων [201]. Ο συνδυασμός αυτών των οπτικών τεχνολογιών θα ενίσχυε τη δυνατότητα υιοθέτησης σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας και της ευρύτερης τεχνολογίας έξυπνων μεταφορών (intelligent transport). Ωστόσο, εισάγεται η ανάγκη μελέτης θεμάτων κινητικότητας. Η εφαρμογή επικοινωνίας οχημάτων σε σχηματισμό, πχ κάποιος στόλος οχημάτων του στρατού σε κάποιο πεδίο μάχης, είναι άλλη μία περίπτωση όπου μπορεί να αξιοποιηθεί το χαρακτηριστικό της κάλυψης και της αδυναμίας παρεμβολής από απόσταση που προβλέπεται για τις διάχυτες μεταδόσεις στην περιοχή των 200 nm με 280 nm. Εκτός από ομάδα οχημάτων, αντίστοιχα μπορεί θεωρηθεί και ομάδα ανθρώπων (στρατιωτών) που κινούνται ταυτόχρονα. Και πάλι, απαιτείται κάποιος έλεγχος της επίδρασης της κινητικότητας στη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος/δικτύου.

Λαμβάνοντας υπόψη την αλλαγή των χαρακτηριστικών σκέδασης του μέσου με την πυκνωση αυτού, ένα σύστημα διάχυτων μεταδόσεων στην περιοχή της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εκτός από τη μετάδοση δεδομένων σε χαμηλούς ρυθμούς, και για μία εκτίμηση της αλλαγής των καιρικών φαινομένων σε τοπική κλίμακα. Αυτό σημαίνει ότι και πάλι επικουρικά, μεταδόσεις στη συγκεκριμένη μπάντα θα ήταν δυνατό να αξιοποιηθούν σε τεχνικές πρόβλεψης καιρού σε τοπική κλίμακα (local weather prediction). Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, υπάρχει πλήθος συσκευών οπτικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις διαφόρων παραμέτρων που αφορούν συγκεντρώσεις μικροσωματιδίων και σταγονιδίων, συντελεστές σκέδασης, ορατότητα, ύψος σύννεφου και λειτουργούν στην περιοχή του κοντινού υπερύθρου [174] ή του ορατού φάσματος [202]. Η περιοχή της UV-C μπάντας θα άνοιγε ένα ακόμα φασματικό παράθυρο, ώστε βοηθητικά να δώσει ακόμα πιο ακριβή αποτελέσματα. Τέτοια συστήματα σε συμβατικές μπάντες μηκών κύματος έχουν ήδη εγκατασταθεί σε αερολιμένες, ενώ μπορούν να βρουν εφαρμογή και στη γεωργία. Πρόκειται για δύο τομείς όπου πρέπει να γίνονται γνωστές αλλαγές στις καιρικές συνθήκες σε τοπική κλίμακα λίγο προτού εμφανιστούν.

Τελικά, η UV-C μπάντα μεταξύ 200 και 280 nm δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης συστημάτων επικοινωνιών οπτικών ασύρματων μεταδόσεων για εφαρμογές όπου απαιτούνται χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης, μικρές αποστάσεις κάλυψης υλοποιώντας ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή και με αδυναμία υποκλοπής από απόσταση. Ταυτόχρονα, η έντονη σκέδαση που μπορεί να υποστηριχθεί αποτελεί προτέρημα, ώστε το σύστημα να λειτουργήσει ικανοποιητικά σε περιβάλλοντα ακραίων συνθηκών, πχ όταν το ασύρματο μέσο γίνεται πιο πυκνό όπως με την εμφάνιση ομίχλης, όπου συμβατικά συστήματα θα εμφάνιζαν αδυναμίες αποδοτικής λειτουργίας. Σε πυκνό μέσο, προέκυψε ότι η έντονη σκέδαση υπερτερεί της απορρόφησης δίνοντας βελτιωμένα αποτελέσματα, αφού μετρήθηκε πτώση των απωλειών και του ρυθμού σφαλμάτων bit για τα σχήματα διαμόρφωσης που εξετάστηκαν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Αγγλικός όρος	Ελληνικός όρος
Advection fog	Ομίχλη από κίνηση αέριων μαζών
Ambient temperature	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
Aqueous humor	Υδατικό διάλυμα
Body area network	Δίκτυο γύρω και πάνω στο ανθρώπινο σώμα
Calibration	Βαθμονόμηση
Clipping	Ψαλίδισμα, αποκοπή
Cluster	Μικρό δίκτυο από κόμβους
Condensation nuclei	Πυρήνας συμπύκνωσης
co-planar geometry	Ομοεπίπεδη γεωμετρία
Coupling length	Μήκος σύζευξης
Covertness	Κάλυψη-απόκρυψη
Down-sampling	Υπο-δειγματολήπτηση
Dust-like substances	Ουσίες τύπου σκόνης
Explicit finite difference method	Μέθοδος ρητών πεπερασμένων διαφορών
Far Field Pattern	Πρότυπο μακρινού πεδίου
Femto-cell	Φεμτο-κυψέλη
Full-duplex operation	Λειτουργία διπλής κατεύθυνσης
Implicit Finite Difference Method	Μέθοδος των Συνεπαγόμενων Πεπερασμένων Διαφορών
Intelligent transport	Τεχνολογία έξυπνων μεταφορών
Laser diode	Δίοδος laser
Local weather prediction	Πρόβλεψη καιρού σε τοπική κλίμακα
Maximum likelihood detection	Φώραση μέγιστης πιθανοφάνειας
Mie scattering	Σκέδαση Mie
Mode coupling	Σύζευξη τρόπων
Mode radius	Η συχνότερα εμφανιζόμενη τιμή ακτίνας στην κατανομή της τυχαίας μεταβλητής του μεγέθους των ακτίνων των μικροσωματιδίων της ατμόσφαιρας
Mode scrambler	Συμπλέκτης τρόπων
Mode-dependent coupling coefficient	συντελεστής σύζευξης που εξαρτάται από τον τρόπο
Multiple scattering channel model	Μοντέλο καναλιού πολλαπλών σκέδασης

Near Field Pattern	Πρότυπο κοντινού πεδίου
Overfilled launching condition	Συνθήκη πλήρους κάλυψης της έδρας εισόδου της ίνας με την οπτική δέσμη
Personal area network	Προσωπικό δίκτυο
Probability generating function	Γεννήτρια συνάρτηση πιθανοτήτων
Radiation fog	Ομίχλη από ακτινοβολήση
Rayleigh scattering	Σκέδαση Rayleigh
Reflection coefficient	Παράγοντας ανακλάσεων
Reflection mode photocathode	Φωτοκάθοδος τύπου ανάκλασης
Single scattering channel model	Μοντέλο καναλιού μονής σκέδασης
Solar Blind UV-C band	Ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα
Soot-like aerosols	Αερολύματα τύπου αιθάλης
Transit time	Χρόνος μετάβασης
Transmission mode photocathode	Φωτοκάθοδος τύπου μετάδοσης
Turbulence	Οπτική διαταραχή
Unipolar	Μονοπολικός
Advection fog	Ομίχλη από κίνηση αέριων μαζών

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

Όρος	Ανάλυση όρου
ACO-OFDM	Asymmetrically Clipped – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
AGDM	Angular Mode Group Diversity Multiplexing
AlGaN	Aluminum Gallium Nitride
APD	Avalanche Photodiode
BER	Bit Error Rate
CAP	Carrierless Amplitude and Phase modulation
CapEx	capital expenditures
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
Cs-Te	Cesium-Tellurium
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DC	Data Center
DFE	Decision Feedback Equalizer
DMT	Discrete Multi-Tone
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DUVAP	Deep Ultraviolet Avalanche Photodetector
EFL	Effective Focal Length
EL	Exposure Limit
EMD	Equilibrium Mode Distribution
EMI	Electromagnetic Interference
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FEC	Forward Error Correction
FFE	Feed-Forward Equalizer
FFP	Far Field Pattern
FFT	Fast Fourier Transform
FITH	Fiber-In-The-Home
Flip-OFDM	Flip – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
FOV	Field-of-View
FP-LD	Fabry-Perot Laser Diode
FTTBuilding	Fiber-To-The-Building
FTTHome	Fiber-To-The-Home

FWHM	Full Width at Half Maximum
GI	Graded-Index
GI-POFs	Graded-Index Plastic Optical Fibers
GPIB	General Purpose Interface Bus
HAF	Heavy Advection Fog
HDPE	High Density Polyethylene
HG	Henry-Greenstein
HP-EMB	High-Performance Effective Modal Bandwidth
HRF	Heavy Radiation Fog
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEC	International Electrotechnical Commission
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMDD	Intensity Modulation – Direct Detection
IP	Internet Protocol
ISI	Inter-Symbol-Interference
ITU	International Telecommunication Union
LED	Light Emitting Diode
LOMMF	Laser-Optimized Multimode Fiber
LOS	Line-of-Sight
MC-SI-POF	Multi-Core SI-POF
MMA	Methyl Methacrylate
MOST	Media Oriented Systems Transport
MRF	Moderate Radiation Fog
NFP	Near Field Pattern
NRZ	Non-Return-to-Zero
NRZ	Non-Return-to-Zero
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFL	Overfilled Launching
OLT	Optical Line Terminal
OM	Optical Multimode
OMA	Optical Modulation Amplitude
ONU	Optical Network Unit
OOC	Optical Orthogonal Code
OOK	On-Off Keying
OpEx	operational expenditures

OXC	Optical Cross-Connect
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PC	Personal Computer
PDF	Probability Density Function
PF	Perfluorinated Polymer
pin semiconductors	p-type – intrinsic – n-type semiconductors
PMF	Probability Mass Function
PMMA	Polymethyl Methacrylate
PMT	Photo-Multiplier Tube
PON	Passive Optical Network
PPM	Pulse-Position-Modulation
PtP	Point-to-Point
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality-of-Service
Q-PSK	Quadrature Phase Shift Keying
RC-LED	Resonant Cavity LED
RG	Residential Gateway
RH	Relative Humidity
ROF	Radio-Over-Fiber
RZ	Return-to-Zero
Sb-Cs	Antimony-Cesium
SB-UV-C band	Solar-Blind Ultraviolet C band
SETi	Sensor Electronic Technology, Inc.
SI	Step-Index
Si PD	Silicon Photodiode
SiC	Silicon Carbide
SI-POFs	Large Core Step-Index Plastic Optical Fibers
SIR	Signal-to-Interference-Ratio
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
SUVOS	Semiconductor UV Optical Source
SWDM	Short WDM
SWFs	Spectral Weighting Factors
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VDSL	Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line
VLC	Visible Light Communication

VLC	Visible Light Communications
VoD	Video-on-Demand
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WS-QAM	Wavelength-Sliced emulated QAM

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Οριακές συνθήκες για την επίλυση της εξίσωσης ροής ισχύος στις SI-POFs

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μία σύντομη αναφορά στις οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για την περίπτωση της αριθμητικής επίλυσης με τη μέθοδο Crank-Nicolson της εξίσωσης ροής ισχύος μέσα στην ίνα που περιγράφεται από την (2.11). Η επίλυση της εξίσωσης έχει περιγραφεί εκτενώς στη αναφορά [96]. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη αναφορά δε δόθηκε βαρύτητα στις οριακές συνθήκες. Χωρικά, οι οριακές συνθήκες αφορούν τις περιπτώσεις όπου οι γωνίες διάδοσης ως προς τον άξονα της ίνας έχουν σαν τιμή τις ακραίες τιμές που μπορούν να υποστηριχθούν για να είναι δυνατή η διάδοση φωτός μέσα στην ίνα. Υπό αυτές τις συνθήκες, απαιτείται η τροποποίηση της αριθμητικής επίλυσης της εξίσωσης. Όπως και στην [96], οι διαμερίσεις της γωνίας αντιστοιχούν σε ποσότητες θ_n ως προς τον άξονα διάδοσης (Σχήμα 2.6), ενώ οι αντίστοιχες διαμερίσεις του μήκους δημιουργούν μία «ομάδα» τιμών z_m για την κάλυψη ενός μήκους ίνας L . Από τη 2.4.1, Δz θεωρήθηκε το βήμα στο μήκος της ίνας και Δθ το βήμα στις γωνίες διάδοσης (μέσα στην ίνα) ως προς τον άξονα διάδοσης κατά μήκος της POF. Υπενθυμίζεται ότι στην (2.11), $P(\theta, z, \omega)$ είναι η κατανομή ισχύος στην γωνία, στην απόσταση διάδοσης και στη συχνότητα, αντίστοιχα. Διαμερίζοντας τις γωνίες και τις αποστάσεις, για μία κυκλική συχνότητα ω , η $P(\theta, z, \omega)$ παίρνει διακριτή μορφή $P(\theta_n, z_m, \omega)$. Εδώ θα αναφέρεται ότι $P(\theta_n, z_m, \omega) = P_{n,m}$, για συντομία. Αρχικά, πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση όπου $\theta \rightarrow 0$. Σε μία τέτοια περίπτωση, για το δείκτη n θα έχουμε $n = 0$. Επιπλέον, με τη βοήθεια της σχέσης (3.42) στην [96], από την πρώτη παράγωγο της $P(\theta, z, \omega)$ ως προς της γωνία θ στο δεύτερο όρο του δεξιού μέλους της (2.11), προκύπτει η εξής σχέση των διαμερίσεων:

$$D \times \frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = 0 \Rightarrow \frac{P_{n+1,m} - P_{n-1,m} + P_{n+1,m-1} - P_{n-1,m-1}}{2 \times 2 \times \Delta \theta} = 0 \Rightarrow$$

$$P_{n+1,m} - P_{n-1,m} + P_{n+1,m-1} - P_{n-1,m-1} = 0 \Rightarrow P_{n+1,m} + P_{n+1,m-1} - P_{n-1,m-1} = P_{n-1,m} \stackrel{n=0}{\Rightarrow} \quad (\text{Π.1})$$

$$\Rightarrow P_{1,m} + P_{1,m-1} - P_{-1,m-1} = P_{-1,m}$$

Η τιμή $P_{n-1,m}$ για $n = 0$ θα αντικατασταθεί στην εξίσωση με τις διαμερίσεις βάσει της (Π.1) για να εξασφαλιστεί η αντιστρεψιμότητα του πίνακα με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το τρέχον διάνυσμα στην απόσταση z_m που περιέχει τις τιμές $P_{n,m}$ για όλες τις επιτρεπτές γωνίες θ_m . Επιπλέον, και πάλι από τη σχέση (2.11), ο δεύτερος όρος στο δεξί μέλος χωρίς το συντελεστή σύζευξης που έχει θεωρηθεί σταθερός αριθμός, θα γίνει:

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\theta} \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\theta \times \frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta} \right) \right) = \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\theta} \times \frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta} \right) + \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\partial^2 P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta^2} \right) \stackrel{\text{de l' Hospital}}{=}$$

$$= \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta} \right)}{\frac{\partial \theta}{\partial \theta}} \right) + \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\partial^2 P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta^2} \right) = \quad (\text{Π.2})$$

$$= \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\partial^2 P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta^2} \right) + \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\partial^2 P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta^2} \right) =$$

$$= 2 \times \frac{\partial^2 P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta^2} \Big|_{\theta=0}$$

Παρατηρώντας συνολικά την εξίσωση (2.11), λαμβάνοντας υπόψη την (Π.2), για $\theta \rightarrow 0$ θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial z} &= -[a(\theta) + j \times \omega \times \tau_{tr,rel}(\theta)] \times P(\theta, z, \omega) + D \times \frac{1}{\theta} \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\theta \times \frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta} \right] \Big|_{\theta=0} \xrightarrow{(Π.2)} \\ &\Rightarrow \frac{\partial P(\theta, z, \omega)}{\partial z} = -[a(\theta) + j \times \omega \times \tau_{tr,rel}(\theta)] \times P(\theta, z, \omega) + D \times 2 \times \frac{\partial^2 P(\theta, z, \omega)}{\partial \theta^2} \end{aligned} \quad (Π.3)$$

Περνώντας σε επίπεδο διαμερίσεων και σε πεπερασμένες διαφορές για τις παραγώγους, η προηγούμενη σχέση με πολλαπλασιασμό και των δύο μελών με Δz θα γίνει:

$$\begin{aligned} \frac{P_{n,m} - P_{n,m-1}}{\Delta z} &= -[a(\theta_n) + j \times \omega \times \tau_{tr,rel}(\theta_n)] \times \frac{P_{n,m} + P_{n,m-1}}{2} + \\ &\quad + 2 \times D \times \frac{(P_{n+1,m} - 2 \times P_{n,m} + P_{n-1,m}) + (P_{n+1,m-1} - 2 \times P_{n,m-1} + P_{n-1,m-1})}{2 \times \Delta \theta^2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow P_{n,m} - P_{n,m-1} = -\Delta z \times [a(\theta_n) + j \times \omega \times \tau_{tr,rel}(\theta_n)] \times \frac{P_{n,m} + P_{n,m-1}}{2} + \\ &\quad + 2 \times \Delta z \times D \times \frac{(P_{n+1,m} - 2 \times P_{n,m} + P_{n-1,m}) + (P_{n+1,m-1} - 2 \times P_{n,m-1} + P_{n-1,m-1})}{2 \times \Delta \theta^2} \end{aligned} \quad (Π.4)$$

Εδώ απαιτείται η διαφοροποίηση από τη γενική περίπτωση της [96], διότι θέτονται τα εξής:

$$r(\theta_n) = \frac{-\Delta z \times [a(\theta_n) + j \times \omega \times \tau_{tr,rel}(\theta_n)]}{2}, \quad s(\theta_n) = 0, \quad t(\theta_n) = 2 \times \frac{\Delta z \times D}{2 \times \Delta \theta^2} \quad (Π.5)$$

Οπότε, η (Π.4) μετασχηματίζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} P_{n,m} - P_{n,m-1} &= \left\{ \begin{aligned} &r(\theta_n) \times (P_{n,m} + P_{n,m-1}) + \\ &+ t(\theta_n) \times (P_{n+1,m} - 2 \times P_{n,m} + P_{n-1,m} + P_{n+1,m-1} - 2 \times P_{n,m-1} + P_{n-1,m-1}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow -t(\theta_n) \times P_{n-1,m} + (1 - r(\theta_n) + 2 \times t(\theta_n)) \times P_{n,m} - t(\theta_n) \times P_{n+1,m} = \\ &= t(\theta_n) \times P_{n-1,m-1} + (1 + r(\theta_n) - 2 \times t(\theta_n)) \times P_{n,m-1} + t(\theta_n) \times P_{n+1,m-1} \xrightarrow{n=0} \\ &\Rightarrow -t_0 \times P_{-1,m} + (1 - r_0 + 2 \times t_0) \times P_{0,m} - t_0 \times P_{1,m} = \\ &= t_0 \times P_{-1,m-1} + (1 + r_0 - 2 \times t_0) \times P_{0,m-1} + t_0 \times P_{1,m-1} \end{aligned} \quad (Π.6)$$

Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη σχέση την τιμή $P_{-1,m}$ όπως υπολογίστηκε στην (Π.1), προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} -t_0 \times (P_{1,m} + P_{1,m-1} - P_{-1,m-1}) + (1 - r_0 + 2 \times t_0) \times P_{0,m} - t_0 \times P_{1,m} &= \\ &= t_0 \times P_{-1,m-1} + (1 + r_0 - 2 \times t_0) \times P_{0,m-1} + t_0 \times P_{1,m-1} \Rightarrow \\ \Rightarrow -t_0 \times P_{1,m} - t_0 \times P_{1,m-1} + \cancel{t_0 \times P_{-1,m-1}} + (1 - r_0 + 2 \times t_0) \times P_{0,m} - t_0 \times P_{1,m} &= \\ &= \cancel{t_0 \times P_{-1,m-1}} + (1 + r_0 - 2 \times t_0) \times P_{0,m-1} + t_0 \times P_{1,m-1} \Rightarrow \\ \Rightarrow (1 - r_0 + 2 \times t_0) \times P_{0,m} - 2 \times t_0 \times P_{1,m} &= (1 + r_0 - 2 \times t_0) \times P_{0,m-1} + 2 \times t_0 \times P_{1,m-1} \end{aligned} \quad (Π.7)$$

Τελικά, οι συντελεστές των $P_{0,m}$, $P_{1,m}$, $P_{0,m-1}$, $P_{1,m-1}$ πρέπει να χρησιμοποιηθούν στις πρώτες γραμμές των σχετικών πινάκων στην [96] που πρέπει να δημιουργηθούν στην απόσταση z_m .

Η επόμενη οριακή συνθήκη αφορά την περίπτωση όπου $\theta = \theta_c = \text{asin}(NA/n_{co}) = \theta_N$. Σε αυτή την περίπτωση, το σημείο εκκίνησης είναι το ίδιο με αυτό στην [96]. Σαφέστερα, για μία κυκλική συχνότητα ω και για $\theta = \theta_N$ τίθενται οι ποσότητες:

$$r(\theta_n) = \frac{-\Delta z \times [a(\theta_N) + j \times \omega \times \tau_{tr,rel}(\theta_N)]}{2}, \quad s(\theta_n) = \frac{\Delta z \times D}{2 \times 2 \times \Delta \theta} \times \frac{1}{\theta_N}, \quad t(\theta_n) = \frac{\Delta z \times D}{2 \times \Delta \theta^2} \quad (\text{Π.8})$$

Σύμφωνα με την [96], στη γενική περίπτωση, με αντικατάσταση των μερικών παραγώγων με πεπερασμένες διαφορές στις γωνίες και στο μήκος, η (2.11) μετασχηματίζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\left\{ \begin{aligned} & (s(\theta_n) - t(\theta_n)) \times P_{n-1,m} + \\ & + (1 - r(\theta_n) + 2 \times t(\theta_n)) \times P_{n,m} + (-s(\theta_n) - t(\theta_n)) \times P_{n+1,m} \end{aligned} \right\} = \left\{ \begin{aligned} & (-s(\theta_n) + t(\theta_n)) \times P_{n-1,m-1} + \\ & + (1 + r(\theta_n) - 2 \times t(\theta_n)) \times P_{n,m-1} + (s(\theta_n) + t(\theta_n)) \times P_{n+1,m-1} \end{aligned} \right\} \quad (\text{Π.9})$$

Για $n = N$, οι όροι $P_{n+1,m} = P_{N+1,m}$ και $P_{n+1,m-1} = P_{N+1,m-1}$ πρέπει να αφαιρεθούν από την εξίσωση, ώστε να αναπτυχθούν οι κατάλληλοι πίνακες. Για την αποφυγή απωλειών εξαιτίας της διάχυσης ισχύος μεταξύ τρόπων, τέθηκε $P_{N+1,m} = P_{N-1,m}$ και $P_{N+1,m-1} = P_{N-1,m-1}$ και η προηγούμενη σχέση γίνεται

$$\begin{aligned} & (s_N - t_N) \times P_{N-1,m} + (1 - r_N + 2 \times t_N) \times P_{N,m} + (-s_N - t_N) \times P_{N+1,m} = \\ & = (-s_N + t_N) \times P_{N-1,m-1} + (1 + r_N - 2 \times t_N) \times P_{N,m-1} + (s_N + t_N) \times P_{N+1,m-1} \xrightarrow{P_{N-1,m}=P_{N+1,m}} \\ & \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} & (\cancel{s_N} - t_N - \cancel{s_N} - t_N) \times P_{N-1,m} + \\ & + (1 - r_N + 2 \times t_N) \times P_{N,m} \end{aligned} \right\} = \left\{ \begin{aligned} & (-\cancel{s_N} + t_N + \cancel{s_N} + t_N) \times P_{N-1,m-1} + \\ & + (1 + r_N - 2 \times t_N) \times P_{N,m-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ & \Rightarrow -2 \times t_N \times P_{N-1,m} + (1 - r_N + 2 \times t_N) \times P_{N,m} = 2 \times t_N \times P_{N-1,m-1} + (1 + r_N - 2 \times t_N) \times P_{N,m-1} \end{aligned} \quad (\text{Π.10})$$

Τελικά, οι παράγοντες των $P_{N-1,m}$, $P_{N,m}$, $P_{N-1,m-1}$ και $P_{N,m-1}$ θα χρησιμοποιηθούν στην τελευταία γραμμή των πινάκων που απαιτούνται για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης ροής ισχύος με τη μέθοδο Crank-Nicolson για καθενμία συχνότητα. Τονίζεται και πάλι ότι με τη διάχυση/σύζευξη ισχύος μεταξύ των τρόπων θεωρήθηκε ότι δε χάνεται ισχύς, απομονώνοντας με αυτό τον τρόπο την επίδραση καθενός φαινομένου (απώλειες, σύζευξη ισχύων μεταξύ των τρόπων). Το ότι δε χάνεται ισχύς λόγω της διάχυσης φαίνεται στην (Π.10) από το ότι οι παράμετροι διάχυσης στο ίδιο μέλος στην οριακή συνθήκη αθροίζουν σε μηδέν, σε συμφωνία και με την [109]. Οι παράμετροι διάχυσης στην (Π.10) φαίνονται στο αριστερό μέλος με μωβ χρώμα και στο δεξί μέλος με καφέ χρώμα.

Π.2 Βοηθητικά θεωρήματα για Γεννήτριες Συναρτήσεις Πιθανοτήτων

Έστω μία διακριτή τυχαία μεταβλητή X , με συνάρτηση πιθανότητας μάζας $p_k = P(X = k)$, με $k = 0, 1, 2 \dots$. Ορίζεται ως γεννήτρια συνάρτηση πιθανοτήτων (probability generating function) της τυχαίας μεταβλητής X η ακόλουθη συνάρτηση

$$A_X(s) = E[s^X] = \sum_{k=0}^{\infty} s^k \times P(X = k) = \sum_{k=0}^{\infty} s^k \times p_k, \quad \text{με} \quad \sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1 \quad (\text{Π.11})$$

Βλέπουμε ότι $A_X(1) = E[1] = 1$ και η σειρά συγκλίνει για $|s| \leq 1$. Επιπλέον, $A_X(0) = p_0$.

Π.1.1 Θεώρημα. Έστω X και Y δύο ανεξάρτητες διακριτές τυχαίες μεταβλητές με γεννήτριες συναρτήσεις πιθανοτήτων $A_X(s)$ και $A_Y(s)$, αντίστοιχα. Έστω ότι $Z = X + Y$. Τότε,

$$A_Z(s) = A_{X+Y}(s) = A_X(s) \times A_Y(s) \quad (\text{Π.12})$$

Απόδειξη. $A_Z(s) = E[s^Z] = E[s^{X+Y}] = E[s^X \times s^Y] = E[s^X] \times E[s^Y] = A_X(s) \times A_Y(s)$.

Προφανώς ισχύει ότι $E[s^X \times s^Y] = E[s^X] \times E[s^Y]$, λόγω ανεξαρτησίας των X, Y .

Π.1.2 Πρόταση. Αν X_1, X_2, \dots, X_n είναι ανεξάρτητες διακριτές τυχαίες μεταβλητές με γεννήτριες συναρτήσεις πιθανοτήτων $A_{X_1}(s), A_{X_2}(s), \dots, A_{X_n}(s)$, αντίστοιχα, με n γνωστό ακέραιο, τότε

$$A_{X_1+X_2+\dots+X_n}(s) = A_{X_1}(s) \times A_{X_2}(s) \times \dots \times A_{X_n}(s) \quad (\text{Π.13})$$

Π.1.3 Θεώρημα. Έστω N, X_1, X_2, \dots ανεξάρτητες διακριτές τυχαίες μεταβλητές. Αν οι $\{X_i\}$ είναι όμοια κατανομημένες και καθεμία έχει γεννήτρια συνάρτηση πιθανοτήτων $A_X(s)$, τότε, η $S_N = X_1 + X_2 + \dots + X_N$ έχει γεννήτρια συνάρτηση πιθανοτήτων

$$A_{S_N}(s) = A_N(A_X(s)) \quad (\text{Π.14})$$

Απόδειξη. Έχουμε

$$\begin{aligned} A_{S_N}(s) &= E[s^{S_N}] = \sum_{n=0}^{\infty} E[s^{S_N} | N = n] \times P(N = n) = \sum_{n=0}^{\infty} E[s^{S_n}] \times P(N = n) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} E[s^{X_1+X_2+\dots+X_n}] \times P(N = n) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{X_1+X_2+\dots+X_n}(s) \times P(N = n) \stackrel{\text{Π.1.1}}{=} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \{A_{X_1}(s) \times A_{X_2}(s) \times \dots \times A_{X_n}(s)\} \times P(N = n) \stackrel{A_{X_i}(s)=A_X(s), \forall i=1,2,\dots,n}{=} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \{A_X(s) \times A_X(s) \times \dots \times A_X(s)\} \times P(N = n) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \{A_X(s)\}^n \times P(N = n) \stackrel{\text{Π.11}}{=} \\ &= A_N(A_X(s)) \end{aligned} \quad (\text{Π.15})$$

Κρίσιμο σημείο είναι η μετατροπή με βάση τη διακριτή τυχαία μεταβλητή N $E[s^{S_N}] = \sum_{n=0}^{\infty} E[s^{S_n} | N = n] \times P(N = n)$. Αξίζει να αναφερθεί ότι η τυχαία μεταβλητή S_n

περιγράφει την αλληλουχία των τυχαίων μεταβλητών N και των X_i . Σε κάθε στιγμή, η τιμή καθεμιάς από τις X_i είναι ανεξάρτητη από το πλήθος τους, αλλά το πλήθος τους καθορίζεται από την τυχαία μεταβλητή N που προηγείται. Για παράδειγμα, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 3.2.3.2, στην αλληλουχία των αφίξεων φωτονίων που ακολουθούν κατανομή Poisson και της εμφάνισης φωτοηλεκτρονίου για καθένα φωτόνιο που αφικνείται που ακολουθεί κατανομή Bernoulli δημιουργείται μία τυχαία μεταβλητή του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο. Το ενδεχόμενο για κάποιο φωτόνιο να γεννηθεί ένα φωτοηλεκτρόνιο είναι ανεξάρτητο από τα αντίστοιχα ενδεχόμενα για τα άλλα αφικνούμενα φωτόνια.

Π.1.4 Πρόταση. Μπορεί να αποδειχθεί ότι:

$$E[S_N] = E[N] \times E[X] \quad \text{και} \quad \text{Var}[S_N] = E[N] \times \text{Var}[X] + (E[X])^2 \times \text{Var}[N] \quad (\text{Π.16})$$

Απόδειξη. Αρχικά, για μία τυχαία μεταβλητή X είναι γνωστό ότι:

$$\begin{aligned} \text{Var}[X] &= \sigma_X^2 = E[(X - E[X])^2] = E[X^2 - 2 \times X \times E[X] + (E[X])^2] = \\ &= E[X^2] - (E[X])^2 \quad (\text{Π.17}) \\ E[X^2] &= \text{Var}[X] + (E[X])^2 \end{aligned}$$

Για την πρώτη και τη δεύτερη παράγωγο μίας γεννήτριας συνάρτησης πιθανοτήτων μίας διακριτής τυχαίας μεταβλητής X θα έχουμε:

$$\begin{aligned} A'_X(s) &= \frac{dA_X(s)}{ds} = \frac{dE[s^X]}{ds} = E[X \times s^{X-1}] = \sum_{k=0}^{\infty} k \times s^{k-1} \times P(X = k) \\ A''_X(s) &= \frac{d^2 A_X(s)}{ds^2} = \frac{d^2 E[s^X]}{ds^2} = \frac{dE[X \times s^{X-1}]}{ds} = E[X \times (X-1) \times s^{X-2}] = \quad (\text{Π.18}) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} k \times (k-1) \times s^{k-2} \times P(X = k) \end{aligned}$$

Επιπλέον,

$$\begin{aligned} A'_X(1) &= \sum_{k=0}^{\infty} k \times 1^{k-1} \times P(X = k) = \sum_{k=0}^{\infty} k \times P(X = k) = E[X] \\ A''_X(1) &= \sum_{k=0}^{\infty} k \times (k-1) \times 1^{k-2} \times P(X = k) = \sum_{k=0}^{\infty} (k^2 - k) \times P(X = k) = \quad (\text{Π.19}) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} k^2 \times P(X = k) - \sum_{k=0}^{\infty} k \times P(X = k) = E[X^2] - E[X] \stackrel{\text{Π.17}}{=} \\ &= \text{Var}(X) + (E[X])^2 - E[X] \end{aligned}$$

Οπότε, από την προτελευταία γραμμή της (Π.15), θα έχουμε:

$$A'_{S_N}(s) = \frac{dA_{S_N}(s)}{ds} = \sum_{n=0}^{\infty} n \times \{A_X(s)\}^{n-1} \times A'_X(s) \times P(N = n) \quad (\text{Π.20})$$

και

$$\begin{aligned} E[S_N] &= A'_{S_N}(1) = \sum_{n=0}^{\infty} n \times \{A_X(1)\}^{n-1} \times A'_X(1) \times P(N = n) \stackrel{\text{Π.19}}{=} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} n \times 1^{n-1} \times E[X] \times P(N = n) = \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} n \times P(N = n) \right\} \times E[X] = \quad (\text{Π.21}) \\ &= E[N] \times E[X] \end{aligned}$$

Επιπροσθέτως, από την (Π.20)

$$\begin{aligned}
 A''_{S_N}(s) &= \frac{d^2 A_{S_N}(s)}{ds^2} = \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ n \times (n-1) \times \{A_X(s)\}^{n-2} \times A'_X(s) \right\} \times A'_X(s) \times P(N=n) + \\
 &\quad + \sum_{n=0}^{\infty} n \times \{A_X(s)\}^{n-1} \times A''_X(s) \times P(N=n) = \quad (\Pi.22) \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} n \times (n-1) \times \{A_X(s)\}^{n-2} \times \{A'_X(s)\}^2 \times P(N=n) + \\
 &\quad + \sum_{n=0}^{\infty} n \times \{A_X(s)\}^{n-1} \times A''_X(s) \times P(N=n)
 \end{aligned}$$

Για $s = 1$, προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 A''_{S_N}(1) &= \sum_{n=0}^{\infty} n \times (n-1) \times \{A_X(1)\}^{n-2} \times \{A'_X(1)\}^2 \times P(N=n) + \\
 &\quad + \sum_{n=0}^{\infty} n \times \{A_X(1)\}^{n-1} \times A''_X(1) \times P(N=n) \stackrel{A_X(1)=1}{=} \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} n \times (n-1) \times (E[X])^2 \times P(N=n) + \sum_{n=0}^{\infty} n \times A''_X(1) \times P(N=n) = \\
 &= (E[X])^2 \times \sum_{n=0}^{\infty} (n^2 - n) \times P(N=n) + A''_X(1) \times \sum_{n=0}^{\infty} n \times P(N=n) \stackrel{\Pi.19}{=} \\
 &= (E[X])^2 \times \sum_{n=0}^{\infty} \{n^2 \times P(N=n) - n \times P(N=n)\} + \\
 &\quad + \{Var(X) + (E[X])^2 - E[X]\} \times \sum_{n=0}^{\infty} n \times P(N=n) = \\
 &= (E[X])^2 \times \{E[N^2] - E[N]\} + \{Var(X) + (E[X])^2 - E[X]\} \times E[N] \stackrel{\Pi.17}{=} \\
 &= (E[X])^2 \times \{Var(N) + (E[N])^2 - E[N]\} + \\
 &\quad + \{Var(X) + (E[X])^2 - E[X]\} \times E[N] = \\
 &= (E[X])^2 \times Var(N) + (E[X])^2 \times (E[N])^2 - \cancel{(E[X])^2 \times E[N]} + \\
 &\quad + Var(X) \times E[N] + \cancel{(E[X])^2 \times E[N]} - E[X] \times E[N] = \quad (\Pi.23) \\
 &= (E[X])^2 \times Var(N) + (E[X] \times E[N])^2 + \\
 &\quad + Var(X) \times E[N] - E[X] \times E[N]
 \end{aligned}$$

Από τη σχέση (Π.19), $A''_{S_N}(1) = Var(S_N) + (E[S_N])^2 - E[S_N]$. Οπότε,

$$\begin{aligned}
 Var(S_N) + (E[S_N])^2 - E[S_N] &= (E[X])^2 \times Var(N) + (E[X] \times E[N])^2 + \\
 &\quad + Var(X) \times E[N] - E[X] \times E[N] \quad (\Pi.24)
 \end{aligned}$$

Τέλος, από τη σχέση (Π.21), ολοκληρώνεται η απόδειξη της πρότασης, ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Var}(S_N) + \cancel{(E[S_N])^2} - \cancel{E[S_N]} &= (E[X])^2 \times \text{Var}(N) + \cancel{(E[S_N])^2} + \\ &+ \text{Var}(X) \times E[N] - \cancel{E[S_N]} \end{aligned} \quad (\text{Π.25})$$

Π.3 Υπολογισμοί για τη μέση οπτική ισχύ διαμορφωμένων σημάτων κατά ACO-OFDM και σύνδεση με την ηλεκτρική ισχύ του αντίστοιχου (αρχικού) DMT σήματος

Ξεκινώντας από ένα πραγματικό σήμα υπό Discrete Multi-Tone (DMT) διαμόρφωση με μέση τιμή μηδέν πριν την εφαρμογή κάποιας πόλωσης, η μετατροπή σε οπτικό σήμα, απαιτεί κάποια πόλωση (bias). Η πόλωση τέθηκε ίση με το διπλάσιο της τυπικής απόκλισης του μεταβαλλόμενου DMT σήματος [156] και η πόλωση αυτή καθορίζει τη μέση οπτική ισχύ του DMT σήματος. Δηλαδή,

$$\begin{aligned} P_{mean,opt.,DMT} &= 2 \times \sqrt{\sigma_{DMT}^2} = 2 \times \sqrt{E\left[\left\{x_{DMT}(t) - E[x_{DMT}(t)]\right\}^2\right]}^{E[x_{DMT}(t)]=0} \\ &= 2 \times \sqrt{E[x_{DMT}^2(t)]} = 2 \times \sqrt{P_{rms\ elec.,DMT}} \end{aligned} \quad (\text{Π.26})$$

όπου $x_{DMT}(t)$ είναι το ηλεκτρικό DMT σήμα πριν την πρόσθεση της πόλωσης και $P_{rms\ elec.,DMT}$ είναι η ηλεκτρική ισχύς του ηλεκτρικού DMT σήματος. Εδώ έγινε η υπόθεση ότι $P_{mean,opt.,DMT}$ είναι ίση με τη μέση λαμβανόμενη οπτική ισχύ και οποιαδήποτε επίδραση είτε του πομπού είτε του καναλιού είτε του δέκτη αντιστοιχεί σε μονάδα (τιμή 1) και δεν υποβαθμίζει το σήμα.

Έστω ότι το $x_{DMT}(t)$ έχει δημιουργηθεί με διαμόρφωση συγκεκριμένων υποφερόντων ώστε όταν περικοπεί το αρνητικό τμήμα, να δημιουργηθεί ένα ACO-OFDM σήμα. Αν για το σήμα $x_{DMT}(t)$ χρησιμοποιηθούν αρκετά υποφέροντα (>64) [156], τότε η κατανομή των σημείων του $x_{DMT}(t)$ προσεγγίζεται από τη Gaussian κατανομή. Τα σημεία του ACO-OFDM σήματος ακολουθούν περικομμένη Gaussian κατανομή (clipped Gaussian distribution) ή ημι-κανονική κατανομή (semi-normal distribution) κατά το ήμισυ, με τα υπόλοιπα μισά σημεία να είναι μηδέν με πιθανότητα 0.5 λόγω του clipping των αρνητικών τιμών. Πιο συγκεκριμένα, η περικομμένη Gaussian κατανομή που ακολουθούν τα σημεία (χρονικές τιμές) του ACO-OFDM σήματος έχει μορφή:

$$f_{x_{ACO}}(x) = \frac{1}{2} \times \delta(x) + \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_{DMT}^2}} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2}\right) \quad (\text{Π.27})$$

Σημειώνεται ότι $(\sigma_{DMT})^2$ είναι η διακύμανση του DMT σήματος πριν το clipping, δηλαδή προτού εφαρμοσθεί το clipping και προκύψει το ACO-DMT σήμα κόβοντας το αρνητικό τμήμα. Δηλαδή, η μεταβλητή x στο ολοκλήρωμα έχει τα χαρακτηριστικά του αρχικού DMT σήματος πριν το clipping των αρνητικών. Επίσης, είναι γνωστό ότι:

$$\frac{d\left\{\exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2}\right)\right\}}{dx} = \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2}\right) \times \left(-\frac{x}{\sigma_{DMT}^2}\right) \quad (\text{Π.28})$$

Η μέση τιμή του ACO-OFDM οπτικού σήματος, δηλαδή η μέση τιμή της οπτικής ισχύος θα είναι από την ορισμό της:

$$\begin{aligned} P_{mean} &= P_{mean,opt.,ACO} = E[X_{ACO}] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \times f_{x_{ACO}}(x) dx = \\ &= \frac{1}{2} \times 0 \times \delta(0) + \int_0^{+\infty} x \times \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_{DMT}^2}} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2}\right) dx \end{aligned} \quad (\text{Π.29})$$

Με τη βοήθεια των (Π.26), (Π.28) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned}
 P_{mean,opt.,ACO} &= -\frac{\sigma_{DMT}}{\sqrt{2 \times \pi}} \times \int_0^{+\infty} \left(-\frac{x}{\sigma_{DMT}^2} \right) \times \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right) dx = \\
 &= -\frac{\sigma_{DMT}}{\sqrt{2 \times \pi}} \times \int_0^{+\infty} \frac{d\left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right) \right\}}{dx} dx = \\
 &= -\frac{\sigma_{DMT}}{\sqrt{2 \times \pi}} \times \left[\exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right) \right]_{x \rightarrow 0}^{x \rightarrow +\infty} = \tag{Π.30} \\
 &= -\frac{\sigma_{DMT}}{\sqrt{2 \times \pi}} \times \left[\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right) \right) - 1 \right] = -\frac{\sigma_{DMT}}{\sqrt{2 \times \pi}} \times [0 - 1] = \\
 &= \frac{\sigma_{DMT}}{\sqrt{2 \times \pi}} = \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi}} \times \sqrt{P_{rms elec.,DMT}}
 \end{aligned}$$

Όσον αφορά την ηλεκτρική ισχύ του ACO-OFDM σήματος στο ηλεκτρικό επίπεδο, αυτή θα είναι:

$$\begin{aligned}
 P_{mean sq. elec., ACO} &= E[X_{ACO}^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \times f_{X_{ACO}}(x) dx = \\
 &= \frac{1}{2} \times 0 \times \delta(0) + \int_0^{+\infty} x^2 \times \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_{DMT}^2}} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right) dx = \\
 &= -\frac{\sigma_{DMT}^2}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_{DMT}^2}} \times \int_0^{+\infty} x \times \left(-\frac{x}{\sigma_{DMT}^2} \right) \times \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right) dx = \\
 &= -\frac{\sigma_{DMT}^2}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_{DMT}^2}} \times \int_0^{+\infty} x \times \frac{d\left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right) \right\}}{dx} dx = \\
 &= -\frac{\sigma_{DMT}^2}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_{DMT}^2}} \times \left\{ \left[\frac{x}{\exp\left(\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right)} \right]_{x \rightarrow 0}^{x \rightarrow +\infty} - \int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right) dx \right\} \tag{Π.31}
 \end{aligned}$$

Για το αποτέλεσμα του ολοκληρώματος (που αφορά τον πρώτο όρο μέσα στην αγκύλη), από τον κανόνα του L'Hospital, ο πρώτος όρος (για $x \rightarrow \infty$) θα είναι ίσος με 0, ενώ εύκολα προκύπτει ότι ο δεύτερος όρος θα είναι επίσης μηδέν (για $x = 0$). Αναλυτικότερα, αυτό φαίνεται αναλύοντας τον πρώτο όρο μέσα στην αγκύλη

$$\left[\frac{x}{\exp\left(\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right)} \right]_{x \rightarrow 0}^{x \rightarrow +\infty} = \left[\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{x}{\exp\left(\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2} \right)} \right) - 0 \right] = 0 \tag{Π.32}$$

Αλλάζοντας τα όρια ολοκλήρωσης στο ολοκλήρωμα της (Π.31) από $-\infty$ ως $+\infty$ και συνεχίζοντας με λίγες πράξεις, προκύπτει ότι:

$$P_{mean\ sq.\ elec., ACO} = \frac{\sigma_{DMT}^2}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_{DMT}^2}} \times \frac{1}{2} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times \sigma_{DMT}^2}\right) dx = \frac{\sigma_{DMT}^2}{2} = \frac{1}{2} \times P_{rms\ elec., DMT} \quad (\Pi.33)$$

Οπότε η (3.28) αποδεικνύεται

$$P_{mean, opt., ACO} = \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi}} \times \sqrt{P_{rms\ elec., DMT}} = \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi}} \times \sqrt{2 \times P_{mean\ sq.\ elec., ACO}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \times \sqrt{P_{mean\ sq.\ elec., ACO}} \quad (\Pi.34)$$

Εκ των προτέρων έχει τεθεί ενέργεια των συμβόλων $\times 2$, ώστε μετά το clipping να έχουν κατάλληλη ενέργεια στο ηλεκτρικό επίπεδο πριν την μετατροπή σε οπτικό σήμα, κάτι το οποίο δεν επηρεάζει τη σχέση μεταξύ της μέσης οπτικής ισχύος του ACO-OFDM σήματος και της ηλεκτρικής ισχύος του ACO-OFDM σήματος, όπως εύκολα μπορεί να αποδειχθεί.

Π.4 Τυπικές κατανομές μεγέθους σταγονιδίων ομίχλης, σχετικές συναρτήσεις φάσης, εκτίμηση και στάθμιση της συνάρτησης φάσης για καθαρή ατμόσφαιρα με εφαρμογή του αστικού μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε στις υποενότητες 3.2.4.2 και 3.2.5.5, η ενσωμάτωση της εμφάνισης ομίχλης έγινε θεωρώντας ότι εμφανίζονται σφαιρικά σταγονίδια με ίδια ακτίνα σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε. Οι ακτίνες που δοκιμάστηκαν βρίσκονταν σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 1 μm και 10 μm . Φυσικά, ίδια ακτίνα για όλα τα σταγονίδια δεν εμφανίζεται σε πραγματικές συνθήκες εμφάνισης ομίχλης, αλλά αυτή η απλοϊκή προσέγγιση ακολουθήθηκε λόγω έλλειψης δεδομένων που έχουν να κάνουν με τη μηχανή παραγωγής ομίχλης που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Όπως είναι αναμενόμενο, τα σταγονίδια θα ακολουθούν κάποια κατανομή μεγέθους, γεγονός το οποίο έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά από μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορες περιοχές [196].

Όσον αφορά τα μοντέλα ομίχλης που χρησιμοποιούνται συνήθως, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.2.4.2, για τις κατανομές μεγέθους των σταγονιδίων εφαρμόζεται η τροποποιημένη κατανομή γάμμα. Πιο συγκεκριμένα, η κατανομή σε μονάδες ($\text{cm}^{-3} \times \mu\text{m}^{-1}$)* εκφράζεται μέσω της σχέσης

$$n(r) = Ar^a \exp(-b \times r^y) \quad (\Pi.35)$$

Ενδεικτικά, ο Πίνακας Π - 1 περιλαμβάνει τις τιμές των παραμέτρων στην (Π.35) για τις περιπτώσεις πυκνής ομίχλης από κίνηση αέριων μαζών, πυκνής ομίχλης από ακτινοβολία και για λιγότερο έντονη ομίχλη από ακτινοβολία των οποίων οι mode τιμές και πυκνότητες σταγονιδίων αναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.2.4.2. Στο Σχήμα Π - 1(α) απεικονίζονται οι κατανομές των τριών εκδοχών ομίχλης που προαναφέρθηκαν. Γι' αυτόν τον τύπο κατανομής, οι mode τιμές των ακτίνων των σταγονιδίων που περιλαμβάνονται στην προτελευταία στήλη του πίνακα είναι ευδιάκριτες στα διαγράμματα. Το ολοκλήρωμα των κατανομών ως προς dr δίνει, όπως αναμένεται, την τελευταία στήλη του πίνακα. Συσχετίζοντας τη μορφή των κατανομών από την (Π.35) με τις σταθερές ακτίνες που θεωρήθηκαν ανά εξεταζόμενο σενάριο στις υποενότητες 3.2.4.2 και 3.2.5.5, ενώ η σφοδρότητα της ομίχλης συνδέθηκε με την ακτίνα των

* Ορθότερα, οι μονάδες θα έπρεπε να είναι $dr \times (\text{cm}^{-3} \times \mu\text{m}^{-1})$. Στην υποενότητα 3.2.5.5, "dr." αντιστοιχεί σε σταγονίδια.

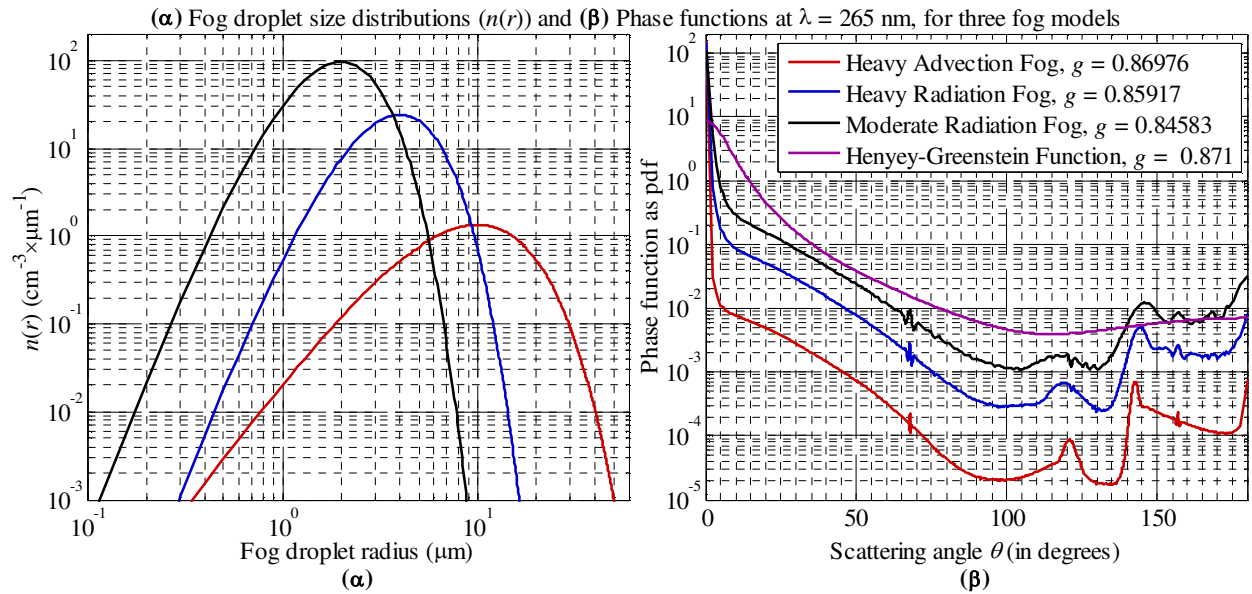
σταγονιδίων και την πυκνότητα των σταγονιδίων ανά σενάριο, η έλλειψη πληροφορίας για την κατανομή μεγέθους των σταγονιδίων τεχνητής ομίχλης δεν επέτρεψε την άμεση σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τις πειραματικές μετρήσεις.

Πίνακας Π - 1. Τιμές παραμέτρων στην (Π.35) για περιπτώσεις ομίχλης από κίνηση αέριων μαζών και από ακτινοβολήση [170].

Τύπος και ένταση ομίχλης	Παράμετροι μοντέλου				Mode τιμή ακτίνας (μm)	Πυκνότητα σταγονιδίων N_0 (dr./cm^3)
	A	a	b	γ		
Πυκνή ομίχλη από κίνηση αέριων μαζών	0.027	3	0.3	1	10	20
Πυκνή ομίχλη από ακτινοβολήση	2.3705	6	1.5	1	4	100
Μέτριας πυκνότητας ομίχλη από ακτινοβολήση	607.5	6	3	1	2	200

Η έλλειψη σχετικής πληροφορίας για τα μεγέθη των μικροσωματιδίων τεχνητής ομίχλης δημιούργησε πρόσθετο περιορισμό, καθώς ήταν η αιτία εφαρμογής της συνάρτησης Henyey-Greenstein για τη σκέδαση Mie που αφορούσε αποκλειστικά τα σταγονίδια ομίχλης. Όπως αναφέρθηκε στις υποενότητες 3.2.5.5 και 3.2.4.2, οι τιμές του παράγοντα ασυμμετρίας g που εκτιμήθηκαν από την τρίτη εξίσωση στην (3.31) της θεωρίας Mie, εφαρμόστηκαν στην συνάρτηση της (3.2) με $f = 0.5$. Ενδεικτικά, για ακτίνα $r_D = 10 \mu\text{m}$ και για $g = 0.871$ από την τρίτη εξίσωση στην (3.31), προέκυψε η καμπύλη με μωβ χρώμα που απεικονίζεται στο Σχήμα Π - 1(β). Αυτή η συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε στις υποενότητες 3.2.5.5 και 3.2.4.2 για τη συγκεκριμένη τιμή ακτίνας σταγονιδίων, ώστε να προκύψει η τελική συνάρτηση φάσης στην (3.32) και να δομηθεί η τελική αθροιστική συνάρτηση κατανομής που χρησιμοποιήθηκε στον αλγόριθμο Monte Carlo για τη γέννηση των γωνιών σκέδασης στο σχετικό βήμα του αλγορίθμου. Στο Σχήμα Π - 1(β), απεικονίζονται επίσης και οι συναρτήσεις φάσης $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ που προέκυψαν από την επίλυση του τέταρτου ολοκληρώματος στην (3.31). Αυτό που φαίνεται από τη σχετική (μωβ) καμπύλη είναι το αναμενόμενο γεγονός ότι η συνάρτηση Henyey-Greenstein αποτυγχάνει να «ακολουθήσει» τις συναρτήσεις φάσης $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ που προέκυψαν απευθείας από την αριθμητική ολοκλήρωση της (3.31). Καθώς η ομίχλη γίνεται εντονότερη, τα σταγονίδια από τα οποία αποτελείται θα έχουν μεγαλύτερες ακτίνες. Η μεγάλες ακτίνες σταγονιδίων θα είναι η αιτία να προκαλείται εντονότερη σκέδαση Mie κατά την αλληλεπίδραση του φωτός με τέτοιου μεγέθους σταγονίδια. Αυτό μεταφράζεται σε εντονότερη εμπρόσθια σκέδαση (σε σχέση με την τρέχουσα κατεύθυνση του εκάστοτε φωτονίου), δηλαδή σε μία έντονη «μύτη» για τη συνάρτηση φάσης στις μικρές γωνίες. Αυτή η εικόνα φαίνεται καθαρά στις συναρτήσεις φάσης για τις εκδοχές ομίχλης που περιγράφηκαν. Όσο μεγαλώνει η mode τιμή της κατανομής, παρατηρούμε ότι γίνεται εντονότερα «κατευθυντική» η συνάρτηση φάσης. Για παράδειγμα, για πυκνή ομίχλη από κίνηση αέριων μαζών με mode τιμή ακτίνας $10 \mu\text{m}$, φαίνεται ότι στις πρώτες 5° η τιμή της συνάρτησης φάσης πέφτει από τη μέγιστη τιμή κατά λίγο πάνω από τέσσερις τάξεις μεγέθους. Στο αντίστοιχο εύρος γωνιών, για πυκνή ομίχλη από ακτινοβολήση με mode τιμή ακτίνας $4 \mu\text{m}$, η πτώση είναι σχεδόν τρεις τάξεις μεγέθους. Αντίθετα, η συνάρτηση Henyey-Greenstein δεν καλύπτει τέσσερις τάξεις μεγέθους από την μεγαλύτερη στην μικρότερη τιμή της συνάρτησης συνολικά. Βέβαια, στην περίπτωση της λιγότερο έντονης ομίχλης από ακτινοβολήση, η συνάρτηση Henyey-Greenstein ακολουθεί καλύτερα την αντίστοιχη συνάρτηση φάσης, λόγω του ότι σ' αυτή την περίπτωση η mode τιμή γίνεται $2 \mu\text{m}$. Επιπλέον, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι οι συναρτήσεις φάσης στο Σχήμα Π - 1(β) είναι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας

με ίδια διαμέριση συνημιτόνων ($d\cos(\theta)$), ώστε να είναι ορθή η σύγκριση. Η ίδια διαμέριση έχει χρησιμοποιηθεί και σε όλο το κεφάλαιο 3.

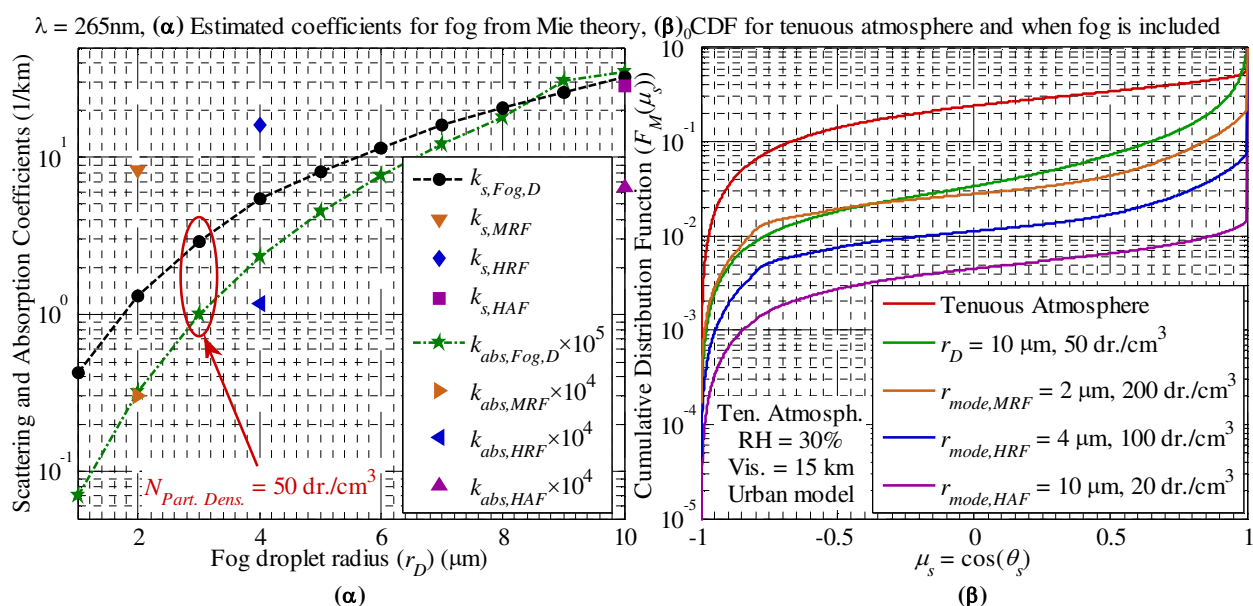


Σχήμα Π - 1. (α) Κατανομές μεγέθους σταγονιδίων για δύο μοντέλα ομίχλης από ακτινοβολία και ενός από κίνηση αέριων μαζών. (β) Αντίστοιχες συναρτήσεις φάσεις σαν pdf για τα τρία μοντέλα ομίχλης. Στο διάγραμμα απεικονίζεται και η Henyey-Greenstein συνάρτηση φάσης με παράγοντα ασυμμετρίας $g = 0.871$ που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις της υποπαραγράφου 3.2.5.5 για την περίπτωση όπου θεωρείται ότι υπάρχει και ομίχλη στο μέσο με ακτίνες σταγονιδίων $r_D = 10 \mu\text{m}$. Το υπόμνημα αφορά και τα δύο διαγράμματα όσον αφορά τα τρία μοντέλα ομίχλης.

Σχετικά με τις μικρές κυματώσεις των τριών συναρτήσεων φάσης που αντιπροσωπεύουν καθεστώς ομίχλης στις γωνίες μεταξύ 67° και 68° , κοντά στις 157° και σε κάποια ακόμα σημεία των συναρτήσεων για ομίχλη από ακτινοβολία, αυτά οφείλονται στο βήμα των ακτίνων των σταγονιδίων (dr) κατά την ολοκλήρωση της τέταρτης σχέσης στην (3.31) και στη σχέση του βήματος dr με την παράμετρο $x = 2\pi \times r/\lambda$, με r την ακτίνα του μικροσωματιδίου και λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο μικροσωματίδιο. Πιο συγκεκριμένα, η εμφάνιση κυματισμών εξαρτάται από την τιμή $dx = 2\pi \times dr/\lambda$. Προφανώς, η επιλογή για το dx δυσκολεύει, επειδή η τιμή της ακτίνας ακολουθεί συνήθως μία κατανομή. Ακριβέστερη απεικόνιση προκύπτει με την επιλογή όσο το δυνατό μικρότερου dr σε σχέση με τη μέση τιμή της ακτίνας μικροσωματιδίου, και ταυτόχρονα υπάρχουν εμπειρικοί κανόνες για την επιλογή του dx [197] συσχετίζοντάς το και με το δείκτη διάθλασης των μικροσωματιδίων ως προς αυτόν του μέσου. Η επιλογή $dr = 100 \text{ nm}$ ($dx = 2\pi \times 100 \text{ nm} / 265 \text{ nm} \approx 2.37$), με εκκίνηση για την ακτίνα των σταγονιδίων την τιμή $r = 0.1 \mu\text{m}$, φαίνεται ικανοποιητική για την περίπτωση της πυκνής ομίχλης με mode τιμή ακτίνων $10 \mu\text{m}$, ενώ προκαλούνται λίγο πιο έντονες κυματώσεις στην περίπτωση που η κατανομή έχει μικρότερη mode τιμή (4 και $2 \mu\text{m}$), δηλαδή μεγαλύτερη επίδραση από τα μικρότερα σταγονίδια, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα Π - 1(β). Αναλυτικότερα, το ολοκλήρωμα $\int_{-\infty}^{r_i} n(r) dr$ δίνει την πυκνότητα των σταγονιδίων από τη μικρότερη ακτίνα ως την ακτίνα r_i , για κάθε τιμή ακτίνας r_i που εξετάζεται. Για $r_i \rightarrow +\infty$, το ολοκλήρωμα ισούται με την πυκνότητα των σταγονιδίων N_o της κατανομής σε ένα κυβικό εκατοστό. Διαιρώντας το ολοκλήρωμα με N_o προκύπτει η αθροιστική συνάρτηση της κατανομής μεγέθους των μικροσωματιδίων. Προφανώς, το ολοκλήρωμα γίνεται άθροισμα για διακριτό πλήθος ακτίνων. Αυτό που μπορούμε να διακρίνουμε από την αθροιστική συνάρτηση κατανομής είναι σε ποιες τιμές ακτίνας αντιστοιχεί η μεγαλύτερη πυκνότητα των σωματιδίων. Πχ για την λιγότερο πυκνή ομίχλη από ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί ότι συγκέντρωση σταγονιδίων μεταξύ 20% και 80% της ολικής συγκέντρωσης $N_o (= 200 \text{ dr}/\text{cm}^3)$ αφορά

μικροσωματίδια με ακτίνες μεταξύ 1.5 μm και 3 μm. Αντίθετα, για την έντονη ομίχλη από κίνηση αέριων μαζών, το ίδιο εύρος ποσοστών της ολικής συγκέντρωσης N_0 αφορά σταγονίδια μεγαλύτερων ακτίνων και πιο συγκεκριμένα, σταγονίδια με ακτίνα μεταξύ 7.6 μm και 18.3 μm, που είναι αναμενόμενο καθώς η κατανομή γι' αυτή την εκδοχή ομίχλης έχει μεγαλύτερη mode τιμή (10 μm στο Σχήμα Π - 1(α)). Γενικά, όταν οι ακτίνες των μικροσωματιδίων ακολουθούν κάποια κατανομή, οι δύο οδοί για τη μείωση των κυματώσεων στις συναρτήσεις φάσεις είναι είτε να επιλεγεί μικρή τιμή dr και κατ' επέκταση μικρή τιμή dx για τους υπολογισμούς της σκέδασης Mie αυξάνοντας σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης είτε να επιλεγεί μικρό βήμα dx για τα μικρά x και μία μεγαλύτερη τιμή για το dx για τις μεγάλες τιμές του x .

Σχετικά με τους συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης, στο Σχήμα Π - 2(α) απεικονίζονται ξανά οι τιμές των συντελεστών που αφορούν αποκλειστικά την ομίχλη από το Σχήμα 3.24(β) για συγκέντρωση σταγονιδίων ίδιας ακτίνας ίση με 50 dr./cm³. Συγκρίνοντας τους συντελεστές σκέδασης που εκτιμήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στις ενότητες 3.2.4.2 και 3.2.5.5 για τους υπολογισμούς των απωλειών υπό την παρουσία ομίχλης με τους αντίστοιχους συντελεστές που προέκυψαν για τις τρεις εκδοχές μοντέλων ομίχλης που περιγράφηκαν, οι συντελεστές σκέδασης είναι αρκετά κοντά σε αυτούς των ακριβέστερων μοντέλων ομίχλης. Από την άλλη, οι συντελεστές απορρόφησης που εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις είναι κατά μία τάξη μικρότεροι, αλλά παραμένει μικρή η συνεισφορά στον συντελεστή απόσβεσης (k_e). Η τοποθέτηση στους άξονες των συντελεστών που προέκυψαν από τα μοντέλα ομίχλης έγινε βάσει της mode τιμής από την κατανομή των ακτίνων.



Σχήμα Π - 2. (α) Οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης αποκλειστικά λόγω της ομίχλης με συγκέντρωση 50 σταγονιδίων ανά cm³ από το Σχήμα 3.24(β), μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης για τα τρία μοντέλα ομίχλης από το Σχήμα Π - 1. (β) Αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής για το μέσο μετά τη στάθμιση όλων των συναρτήσεων φάσης υπό καθαρή ατμόσφαιρα και υπό καθεστώς ομίχλης με σταγονίδια ακτίνας $r_D = 10 \mu\text{m}$ και πυκνότητα αυτών 50 dr./cm³ από το Σχήμα 3.37(β). Περιλαμβάνονται και οι 3 αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής υπό καθεστώς ομίχλης για το μέσο μετά τη στάθμιση όλων των συναρτήσεων φάσης θεωρώντας τα χαρακτηριστικά για τα 3 μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα Π - 1. Για τα αρχικά ισχύουν τα εξής: MRF: Moderate Radiation Fog, HRF: Heavy Radiation Fog, HAF: Heavy Advection Fog.

Αυτό που έχει περισσότερο ενδιαφέρον είναι η μορφή της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής με χρήση της συνάρτησης φάσης που υπολογίστηκε από τα μοντέλα ομίχλης. Αρχικά, στην ενότητα 3.2.5.5 και στο Σχήμα 3.37(β) είχαν δοθεί οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής υπό καθεστώς καθαρής ατμόσφαιρας κι όταν εμφανίζονταν

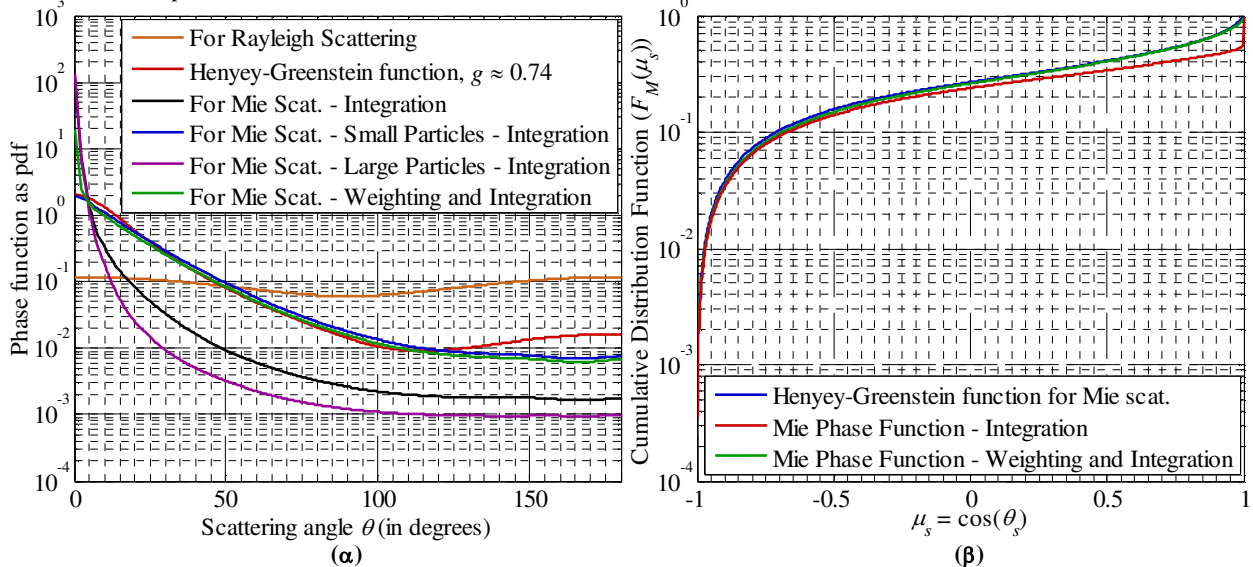
σταγονίδια ομίχλης. Για την συνάρτηση φάσης που αφορά τη σκέδαση αποκλειστικά λόγω της ομίχλης είχε χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση Henyey-Greenstein. Εκεί είχε φανεί ότι καθώς αυξάνεται ο συντελεστής σκέδασης της ομίχλης, η επίδρασή της στη σκέδαση γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη από την επίδραση των υπόλοιπων αερολυμάτων και μορίων σύμφωνα με την (3.32) από την οποία προέκυψε η τελική συνάρτηση φάσης για το ασύρματο μέσο. Αν αντί για τη συνάρτηση Henyey-Greenstein με κατάλληλες τιμές για τον παράγοντα ασυμμετρίας είχαν χρησιμοποιηθεί οι συναρτήσεις φάσης από το Σχήμα Π - 1(β) και για τους συντελεστές σκέδασης εφαρμόζονταν οι τιμές από το Σχήμα Π - 2(α) για τις τρεις εκδοχές μοντέλων ομίχλης, τότε οι καμπύλες για την αθροιστική συνάρτηση κατανομής που θα προέκυπταν όταν mode τιμή ακτίνας σταγονιδίων είναι 2 μm, 4 μm και 10 μm, για τις τρεις περιπτώσεις ομίχλης με τις αντίστοιχες πυκνότητες σταγονιδίων που εξετάστηκαν φαίνονται στο Σχήμα Π - 2(β). Επικουρικά, δίνονται και οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής υπό καθαρή ατμόσφαιρα και υπό την παρουσία ομίχλης για την περίπτωση που η ακτίνα των σταγονιδίων είναι ίση με $r_D = 10 \mu\text{m}$ και είναι οι ίδιες καμπύλες που δόθηκαν στο Σχήμα 3.37(β). Αυτό που φαίνεται καθαρά είναι ότι η Mie σκέδαση λόγω της ομίχλης επιβάλλεται στο άθροισμα όλων των παραγόντων που επιδρούν στη σκέδαση. Η σκέδαση θα ήταν ακόμα πιο έντονα προς τα μπρος, πχ για την περίπτωση της έντονης ομίχλης από ακτινοβολία (για τη μπλε καμπύλη στο Σχήμα Π - 2(β)), στον αλγόριθμο Monte Carlo, για τιμές μεγαλύτερες από 10^{-2} που θα παράγονταν από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών στο σχετικό βήμα του αλγορίθμου, δε θα προέκυπταν τιμές γωνιών σκέδασης από $\pi/2$ ως π ανακατευθύνοντας τα φωτόνια προς τα πίσω και τα αποτελέσματα θα ήταν διαφορετικά από αυτά στις υποενότητες 3.2.4.2 και 3.2.5.5. Τονίζεται και πάλι ότι δεν υπήρχε αντίστοιχη ακριβής πληροφορία για τα μεγέθη και την συγκέντρωση των σταγονιδίων ομίχλης που παράγεται από τη μηχανή. Επιπλέον, η θεώρηση της στάθμισης των συναρτήσεων φάσης μέσω της (3.32) μπορεί να είναι καταχρηστική σε ένα πραγματικό γεγονός εμφάνισης ομίχλης, αλλά δεν προκύπτει κάποια απρόβλεπτη ή ασύμβατη συμπεριφορά, καθώς

- ⇒ οι συντελεστές σκέδασης και απορρόφησης και ο παράγοντας ασυμμετρίας λόγω της ομίχλης για τα τρία μοντέλα ήταν πολύ κοντά σε δημοσιευμένες τιμές [170]
- ⇒ οι συναρτήσεις φάσεις για διαφορετικά μήκη κύματος που δοκιμάστηκαν είχαν την ίδια ακριβώς μορφή με αυτές που έχουν δημοσιευτεί στο παρελθόν για τα ίδια μοντέλα ομίχλης [199]
- ⇒ η επίδραση της ομίχλης είναι συντριπτικά μεγαλύτερη
- ⇒ παρόμοια θεώρηση έχει εφαρμοσθεί και σε αντίστοιχες θεωρητικές μελέτες [189].

Μένοντας στη συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie θεωρώντας καθαρή ατμόσφαιρα, στην υποενότητα 3.2.4.2 χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση Henyey-Greenstein με $g \approx 0.74$, που προέκυψε από την τρίτη εξίσωση στην (3.31). Στην υποενότητα 3.2.5.5, η συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie αντικαταστάθηκε από το αποτέλεσμα της εκτίμησης της $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ στην (3.31). Στο Σχήμα 3.37(α), από την αριθμητική επίλυση του ολοκληρώματος είχε προκύψει μία πιο κατευθυντική καμπύλη προς τα μπρος, με αποτέλεσμα να προκύπτουν ελαφρώς υψηλότερες απώλειες όταν χρησιμοποιήθηκε η $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ από την (3.31), όπως απεικονίστηκε στο Σχήμα 3.24(α) για πυκνότητα σταγονιδίων ίση με 50 dr./cm^3 . Βέβαια, από μετρήσεις που έχουν γίνει στο παρελθόν, για την περιοχή της ηλιακά τυφλής UV-C μπάντας η συνάρτηση φάσης προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την συνάρτηση Henyey-Greenstein [137]. Αν κατά την αριθμητική επίλυση του ολοκληρώματος στην (3.31), καθένας όρος $\rho'(\cos(\theta), r)$ σταθμιζόταν με την ποσότητα $\lambda^2 / (2 \times \pi \times \sigma_s(r))$ για κάθε ακτίνα r , με $\sigma_s(r)$ το εμβαδό διατομής σκέδασης για μικροσωματίδια ακτίνας r [134], πριν τον πολλαπλασιασμό με την ποσότητα $n(r) \times \sigma_s(r) \times dr$ στην (3.31), τότε θα προέκυπτε η σταθμισμένη συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie που απεικονίζεται με πράσινο χρώμα στο Σχήμα Π - 3(α). Στο σχήμα αυτό δίνεται η συνάρτηση Henyey-Greenstein με κόκκινο χρώμα από την υποενότητα 3.2.4.2

με $g \approx 0.74$ και η συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie από την υποενότητα 3.2.5.5 με μαύρο χρώμα. Βοηθητικά, δίνονται οι συναρτήσεις φάσης αποκλειστικά για τα μικρά και για τα μεγάλα μικροσωματίδια όπως προέκυψαν για καθένα όρο της (3.30), αλλά και η συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Rayleigh. Από τη μορφή των καμπυλών φαίνεται ότι με τον αρχικό τρόπο υπολογισμού της $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ παραμένει σημαντική η επίδραση των μεγάλων σωματιδίων της κατανομής παρά τη μικρή τους συγκέντρωση (Πίνακας 3.3), ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η στάθμιση των $\rho'(\cos(\theta), r)$ ως προς το εμβαδό διατομής σκέδασης οδήγησε σε μία συνάρτηση φάσης η οποία προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη συνάρτηση Henyey-Greenstein. Το μόνο τμήμα στο οποίο υπάρχει σημαντική διαφορά είναι στο τμήμα της «μύτης» στο εμπρός τμήμα της συνάρτησης φάσης. Αυτή η μεταβολή δεν επηρεάζει σημαντικά την αθροιστική συνάρτηση κατανομής των συνημιτόνων των γωνιών σκέδασης σε καθαρή ατμόσφαιρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα Π - 3(β). Όταν χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ με την κατάλληλη στάθμιση ανά ακτίνα μικροσωματιδίου πριν την ολοκλήρωση (με διακριτό τρόπο μέσω αθροισμάτων) αντί για την Henyey-Greenstein στη σχέση (3.6) για να προκύψει η τελική συνάρτηση φάσης υπό καθαρή ατμόσφαιρα, η επίδραση της κορυφής της $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ δεν ήταν μεγάλη, καθώς στη στάθμιση της (3.6) υπάρχει και η συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Rayleigh. Ο συντελεστής σκέδασης Rayleigh ($k_{s, Ray} = 0.237$ 1/km) έχει παρόμοια τιμή με τον αντίστοιχο συντελεστή για τη σκέδαση Mie ($k_{s, Mie} = 0.271$ 1/km) υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες που θεωρήθηκαν (RH = 30%, Vis. = 10 km). Επομένως, οι δύο αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής όταν εφαρμοσθεί η κατάλληλα σταθμισμένη $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ ή η Henyey-Greenstein για τη σκέδαση Mie, θα συμβαδίζουν σε μεγάλο βαθμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα Π - 3(β) για τις καμπύλες πράσινου και μπλε χρώματος, αντίστοιχα.

Tenuous Atmosphere, urban model with RH = 30%, Vis. = 15 km, $\lambda_0=265$ nm, (α) Phase function estimations, (β) Overall CDF



Σχήμα Π - 3. (α) Συναρτήσεις φάσης για τη σκέδαση Mie για καθαρή ατμόσφαιρα ως pdf εκφρασμένες μέσω του αποτελέσματος της αριθμητικής επίλυσης του τελευταίου ολοκληρώματος στην (3.31) και μέσω της συνάρτησης της Henyey-Greenstein για $g \approx 0.74$ από το Σχήμα 3.37(α).

Συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Mie για καθαρή ατμόσφαιρα ως pdf εκφρασμένη μέσω του αποτελέσματος της ακριβέστερης αριθμητικής επίλυσης του τελευταίου ολοκληρώματος στην (3.31). Βοηθητικά δίνεται η συνάρτηση φάσης για τη σκέδαση Rayleigh και οι μεμονωμένες συναρτήσεις φάσεις που αφορούν τα μεγάλα και μικρά αερολύματα του αστικού μοντέλου για σχετική υγρασία 30% και ορατότητα 15 km. (β) Αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής για το μέσο υπό καθαρή ατμόσφαιρα μετά τη στάθμιση όλων των συναρτήσεων φάσης (για τα μόρια και για τα μικροσωματίδια) έχοντας χρησιμοποιήσει τη συνάρτηση Henyey-Greenstein με $g = 0.74$ για τη σκέδαση Mie, τη συνάρτηση μετά την αριθμητική ολοκλήρωση στην (3.31), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.37(β) για καθαρή ατμόσφαιρα, και τη συνάρτηση μετά την ακριβέστερη ολοκλήρωση των εξισώσεων για τη σκέδαση Mie στην (3.31).

Στην υποενότητα 3.2.5.5, χρησιμοποιήθηκε η $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ χωρίς προηγουμένως να γίνει στάθμιση με τον κατάλληλο παράγοντα ανά ακτίνα μικροσωματιδίου, δίνοντας ελαφρώς διαφορετική μορφή για την ολική αθροιστική συνάρτηση κατανομής, σύμφωνα με το Σχήμα 3.37(β) και το Σχήμα Π - 3(β) όπου απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Η απόκλιση επέρχεται κυρίως για τιμές συνημίτονου $\cos(\theta_s) > 0.5$. Στις γωνίες που αντιστοιχούν σε $\cos(\theta_s) \rightarrow 1$, δηλαδή για γωνίες $\sim 0^\circ$, η μικρή κορυφή οφείλεται στην πολύ απότομη αρχή της συνάρτησης φάσης για τη σκέδαση Mie χωρίς την αρχική στάθμιση των $\rho'(\cos(\theta), r)$. Παρά το γεγονός ότι και η συνάρτηση Rayleigh συμμετέχει με παρόμοιο συντελεστή στην τελική στάθμιση των συναρτήσεων φάσης, από το Σχήμα Π - 3(α) επικρατεί η κορυφή της μαύρης καμπύλης για μικρές γωνίες σε σχέση με την πορτοκαλί καμπύλη για της σκέδαση Rayleigh. Αντίστοιχη κορυφή με αυτή της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής χωρίς την αρχική στάθμιση της $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ που φαίνεται στο Σχήμα Π - 3(β) υπάρχει και για την αθροιστική συνάρτηση κατανομής με την κατάλληλα σταθμισμένη $\rho_{Mie}(\cos(\theta))$ (πράσινο χρώμα στο ίδιο σχήμα), αλλά είναι πολύ μικρότερη. Αναφέρεται ότι η κατάλληλη στάθμιση των συναρτήσεων φάσης ανά ακτίνα έχει εφαρμοσθεί και για την εξαγωγή των τελικών συναρτήσεων φάσης για τα μοντέλα ομίχλης στο Σχήμα Π - 1(β).

Π.5 Σύγκριση κατανομών Poisson και Gaussian

Σε αυτή τη σύντομη ενότητα θα ξεκαθαριστεί η διαφορά των κατανομών Poisson και Gaussian έχοντας ως επίκεντρο τους υπολογισμούς που έγιναν σε επίπεδο φωτοηλεκτρονίων στις υποενότητες 3.2.3.2 και 3.2.5. Πιο συγκεκριμένα, στην υποενότητα 3.2.3.2, είχε αναφερθεί ότι από την αλληλουχία των αφίξεων φωτονίων (μέσα σε διάστημα τ) που ακολουθούν κατανομή Poisson και της εμφάνισης φωτοηλεκτρονίου για καθένα φωτόνιο που αφικνείται η οποία ακολουθεί κατανομή Bernoulli δημιουργείται μία τυχαία μεταβλητή του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο μέσα στο ίδιο διάστημα τ που ακολουθεί και αυτή κατανομή Poisson. Η μέση τιμή και η διακύμανση του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων δίνονται στη σχέση (3.16). Υπενθυμίζεται ότι ο PMT R7154 χρησιμοποιήθηκε στα περισσότερα πειράματα, αλλά και στις προσομοιώσεις θεωρήθηκαν χαρακτηριστικά για τη διάταξη του PMT σαν αυτά του R7154. Παρά τα ικανοποιητικά χαρακτηριστικά κέρδους, η κβαντική απόδοση ενός PMT σαν τον R7154 δεν είναι πολύ υψηλή και φθάνει μία τιμή περίπου 28.15% στα 265 nm. Με μία τέτοια τιμή κβαντικής απόδοσης και με τις υψηλές απώλειες στις οποίες υπόκειται το σήμα κατά τη διάδοσή του λόγω των διάχυτων μεταδόσεων χωρίς οπτική επαφή, τα φωτόνια αμέσως μετά τη φωτοκάθοδο θα είναι λίγα σε πλήθος μέσα στις διάρκειες παλμών για ρυθμούς της τάξης των 10 kbit/s για τα επίπεδα ισχύος εκπομπής και τις αποστάσεις που θεωρήθηκαν τόσο στα πειράματα όσο και στις προσομοιώσεις.

Όπως αναφέρθηκε, η τυχαία μεταβλητή (N) του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο που θα εμφανιστούν σε χρονικό διάστημα τ (μετά την πρόσπτωση n φωτονίων στον PMT μέσα στο ίδιο διάστημα) ακολουθεί κατανομή Poisson που είναι διακριτή στατιστική κατανομή και κατά τα γνωστά η συνάρτηση πιθανότητας μάζας (PMF) θα έχει μορφή:

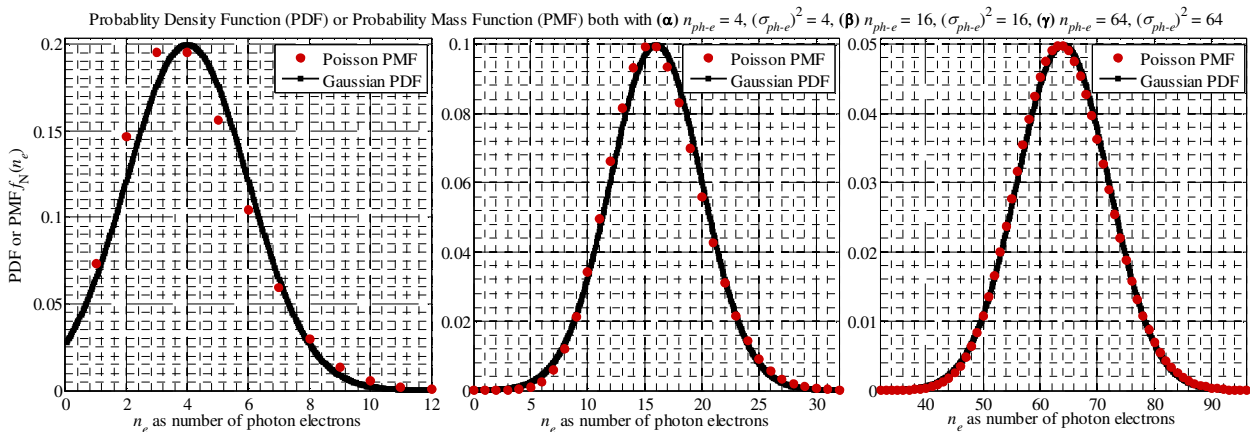
$$f_N(n_e) = P(N = n_e) = \frac{(n_{ph-e})^{n_e}}{n_e!} \times \exp(-n_{ph-e}) \quad (\text{Π.36})$$

με μέση τιμή και διακύμανση ίσες με n_{ph-e} , σύμφωνα με τη σχέση (3.16). Τρία παραδείγματα για την περίπτωση της Poisson κατανομής με $n_{ph-e} = 4, 16$ και 64 φαίνονται στο Σχήμα Π - 4(α), Σχήμα Π - 4(β) και Σχήμα Π - 4(γ), αντίστοιχα. Από την άλλη, αν θεωρηθεί ότι η τυχαία μεταβλητή (N) του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο που θα εμφανιστούν σε χρονικό διάστημα τ ακολουθεί Gaussian

κατανομή, που είναι συνεχής, με μέση τιμή και διακύμανση επίσης n_{ph-e} , τότε η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (PDF) θα δίνεται από τη σχέση

$$f_N(n_e) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \times \sigma_{ph-e}^2}} \times \exp\left(-\frac{(n_e - n_{ph-e})^2}{2 \times \sigma_{ph-e}^2}\right) \quad (\text{Π.37})$$

Παραδείγματα για τη συνεχή κατανομή με $n_{ph-e} = 4, 16$ και 64 φαίνονται στο Σχήμα Π - 4(α), Σχήμα Π - 4(β) και Σχήμα Π - 4(γ), αντίστοιχα. Αυτό που μπορεί να παρατηρήσει κανείς με μία πρώτη ματιά είναι ότι για μικρή τιμή της n_{ph-e} δεν ενδείκνυται η χρήση της Gaussian κατανομής. Ακόμα και για $n_{ph-e} = 64$, φαίνεται ότι η εφαρμογή της Gaussian κατανομής είναι καταχρηστική, παρά το γεγονός ότι σχεδόν συμπίπτουν οι καμπύλες των δύο κατανομών. Στο θεωρητικό κομμάτι της παρούσας εργασίας, δε θεωρείται ως Gaussian η κατανομή του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων αμέσως μετά τη φωτοκάθοδο, αλλά η κατανομή που περιγράφει το μέσο πλήθος φωτοηλεκτρονίων και τη διακύμανσή τους που παράγεται από το ενοποιημένο αποτέλεσμα της αλληλουχίας των φωτοηλεκτρονίων της καθόδου και του μεταβαλλόμενου κέρδους του PMT. Αυτή η αλληλουχία αποδείχθηκε στην υποενότητα 3.2.3.2 ότι δεν έχει ως αποτέλεσμα το πλήθος φωτοηλεκτρονίων να ακολουθούν κατανομή Poisson. Παρά το γεγονός ότι τα φωτοηλεκτρόνια μετά τη διαδικασία ενίσχυσης είναι και πάλι διακριτά, η Gaussian κατανομή δεν αποκλίνει σημαντικά από μία πιο ρεαλιστική αντιμετώπιση με κάποια άλλη διακριτή κατανομή διότι οι τιμές κέρδους που θεωρήθηκαν ήταν αρκετά υψηλές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η Gaussian κατανομή για την περιγραφή του πλήθους των φωτοηλεκτρονίων στην άνοδο του PMT που θα μετρηθούν σε ένα διάστημα τ αποτελεί απαισιόδοξη και όχι τελείως μη ρεαλιστική επιλογή.



Σχήμα Π - 4. Συνάρτηση Πιθανότητας Μάζας (PMF) και Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (PDF) για τις κατανομές Poisson και Gaussian, αντίστοιχα, για μέσο πλήθος και διακύμανση φωτοηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο ίσο με (α) $n_{ph-e} = (\sigma_{ph-e})^2 = 4$, (β) $n_{ph-e} = (\sigma_{ph-e})^2 = 16$ και (γ) $n_{ph-e} = (\sigma_{ph-e})^2 = 64$.

Π.6 Επίδραση της θερμοκρασίας στο κέρδος και στην αποκρισιμότητα του PMT

Ένας κρίσιμος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τις επιδόσεις του φωτοφωρατή είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αύξηση της θερμοκρασίας θα δώσει και μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων σκότους στην άνοδο του PMT. Εκτός από την επίδραση στο ρεύμα σκότους, η θερμοκρασία επιδρά στο κέρδος που παράγει ο PMT για κάποια τάση τροφοδοσίας και στην αποκρισιμότητα της καθόδου του. Ανάλογα με το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι δύνοδοι και η φωτοκάθοδος του PMT, η επίδραση της θερμοκρασίας είναι διαφορετική. Ο συντελεστής θερμοκρασίας (temperature coefficient) μετράται σε ποσοστό επί τοις εκατό προς τη θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (%/°C). Ο συντελεστής θερμοκρασίας που αφορά την ευαισθησία της φωτοκαθόδου μεταβάλλεται σημαντικά και μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές για ένα σημαντικό εύρος

μηκών κύματος στο οποίο αποκρίνεται ο PMT, αλλά και θετικές τιμές κοντά στο άνω όριο του μήκους κύματος του PMT. Από την άλλη, η συμπεριφορά του κέρδους με την αλλαγή της θερμοκρασίας δεν έχει σημαντική εξάρτηση από το μήκος κύματος [143].

Ο PMT R7154 που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα έχει φωτοκάθοδο από υλικό Cs-Te (Cesium-Tellurium). Για μήκη κύματος στην ηλιακά τυφλή UV-C μπάντα και εντός του εύρους απόκρισης του PMT, ο συντελεστής θερμοκρασίας για φωτοκάθοδο από Cs-Te βρίσκεται κοντά σε μία τιμή $-0.18\%/^{\circ}\text{C}$ [143]. Οι δύνοδοι κατασκευάζονται από Sb-Cs (Antimony-Cesium). Μία φωτοκάθοδος από Sb-Cs έχει συντελεστή θερμοκρασίας περίπου $-0.57\%/^{\circ}\text{C}$ [143]. Ωστόσο, δύνοδοι από Sb-Cs παρουσιάζουν συντελεστή θερμοκρασίας $-0.06\%/^{\circ}\text{C}$ (ανά δύνοδο) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 27°C [161], δηλαδή ο συντελεστής θερμοκρασίας διατάξεων δευτερογενούς εκπομπής φωτοηλεκτρονίων είναι μικρότερος από το συντελεστή θερμοκρασίας της φωτοκαθόδου (θεωρώντας απόλυτες τιμές, καθώς $0.57 > 0.06$) παρά το ότι μπορεί να χρησιμοποιείται το ίδιο υλικό κατασκευής.

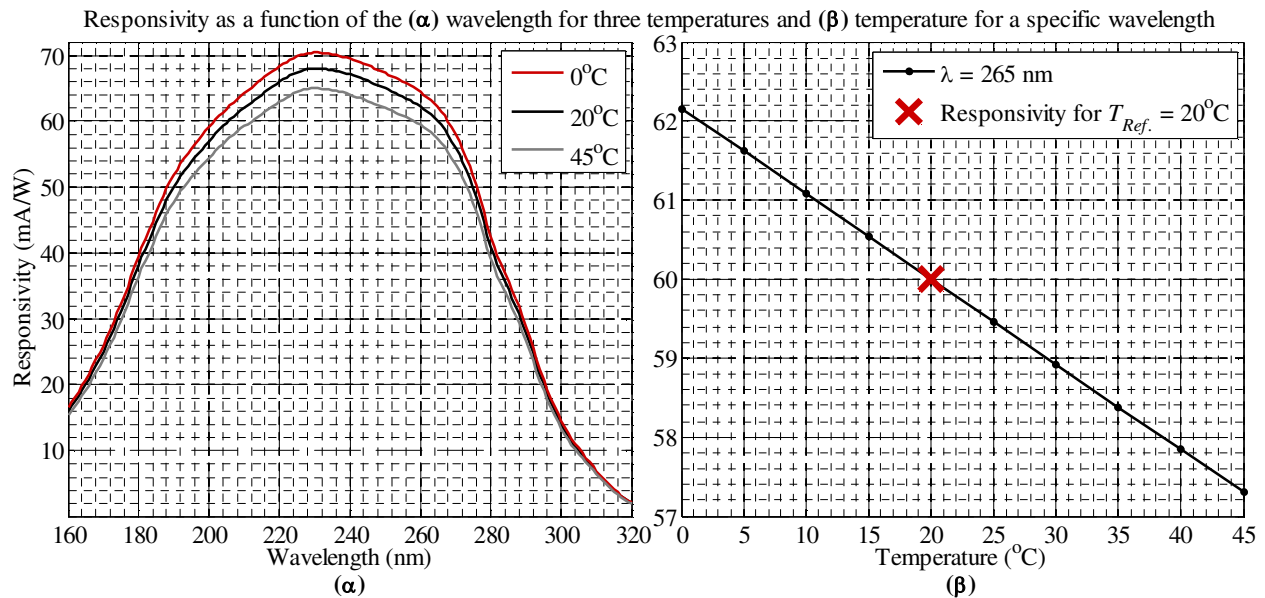
Όσον αφορά τη φωτοκάθοδο, ο συντελεστής θερμοκρασίας θα είναι [199]:

$$a_{ph-c} = \frac{\mathfrak{R}_T - \mathfrak{R}_{T_{ref.}}}{\mathfrak{R}_{T_{ref.}}} \times \frac{1}{T - T_{ref.}} \times 100 \quad (\text{Π.38})$$

όπου $\mathfrak{R}_{T_{ref.}}$ είναι η αποκρισιμότητα στη θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref.}$ που θεωρείται 20°C [199], \mathfrak{R}_T είναι η αποκρισιμότητα στη θερμοκρασία T . Άρα, η αποκρισιμότητα της φωτοκαθόδου για γνωστή αποκρισιμότητα στη θερμοκρασία αναφοράς, θα προκύπτει ως εξής:

$$\mathfrak{R}_T = \left(1 + \frac{a_{ph-c}}{100} \times (T - T_{ref.}) \right) \times \mathfrak{R}_{T_{ref.}} \quad (\text{Π.39})$$

και αντίστοιχη είναι η σχέση για την κβαντική απόδοση. Για τον PMT R7154 [167], η αποκρισιμότητα για τρεις τιμές θερμοκρασίας φαίνεται στο σχήμα Σχήμα Π - 5(α) που ακολουθεί.



Σχήμα Π - 5. Αποκρισιμότητα σε συνάρτηση (α) του μήκους κύματος για τρεις τιμές θερμοκρασίας και (β) της θερμοκρασίας για τα 265 nm.

Οι αλλαγές με τη θερμοκρασία δεν είναι σημαντικές γύρω από το μήκος κύματος των 265 nm στο οποίο έγιναν οι μεταδόσεις. Αυτό μπορεί να φανεί καλύτερα στο Σχήμα Π -

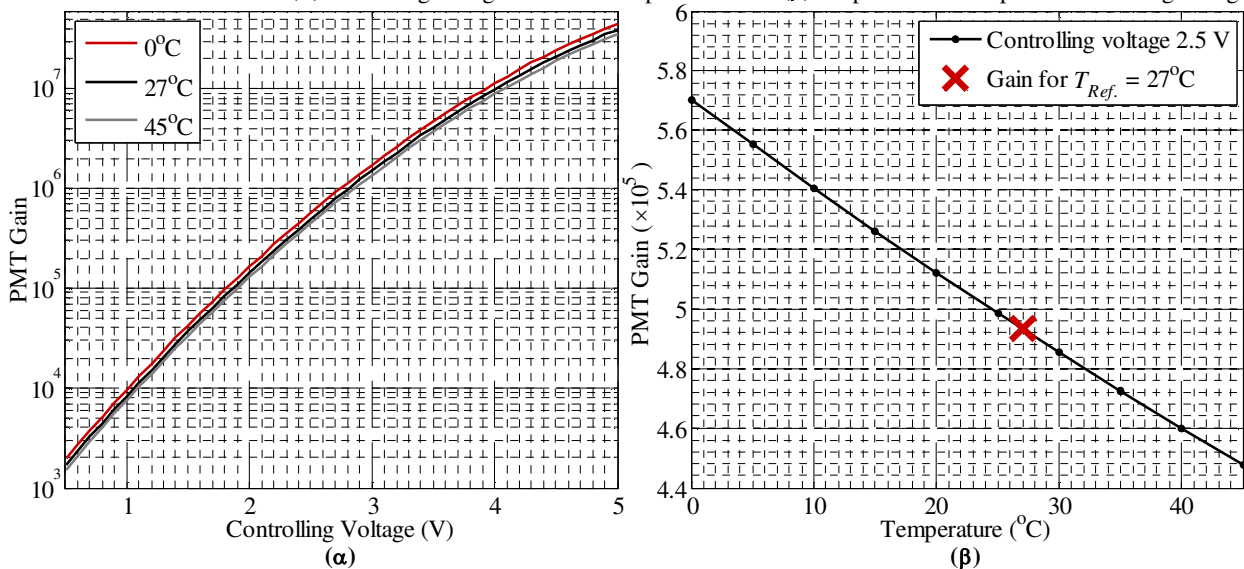
5(β), όπου απεικονίζεται η εξάρτηση της αποκρισιμότητας με τη θερμοκρασία απομονώνοντας τα 265 nm. Σε ένα εύρος 45°C, η αλλαγή στην αποκρισιμότητα είναι σχεδόν 5 mA/W. Αυτό που έγινε κατά την πειραματική διαδικασία ήταν να χρησιμοποιηθεί ως βάση η τιμή 0.06 A/W στις μετρήσεις για τους υπολογισμούς των απωλειών και όπου χρειαζόταν υπολογίζονταν οι απαραίτητες διορθώσεις ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της θερμοκρασίας.

Αντίστοιχα, για την περίπτωση καθεμίας δυνόδου του PMT η εξάρτηση από τη θερμοκρασία θα έχει μία μορφή παρόμοια με αυτή της σχέσης (Π.39), αλλά για διαφορετικό συντελεστή θερμοκρασίας. Η εξάρτηση του κέρδους από τη θερμοκρασία για τον PMT των 9 σταδίων θα είναι:

$$G_T = \left(1 + \frac{a_{dyn}}{100} \times (T - T_{ref.}) \right)^9 \times \delta_{T_{ref.}}^9 \quad (\text{Π.40})$$

όπου $\delta_{T_{ref.}}$ και $G = \delta_{T_{ref.}}^9$ είναι το κέρδος μίας δυνόδου και το κέρδος του PMT για τη θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref.} = 27^\circ\text{C}$ [161]. Για τον PMT R7154 [167], το διάγραμμα του κέρδους συναρτήσει της τάσης ελέγχου για τη θερμοκρασία $T_{ref.}$ και για θερμοκρασία 0°C και 45°C φαίνεται στο Σχήμα Π - 6(α). Η μαύρη (μεσαία) καμπύλη έχει προκύψει από το φυλλάδιο του κατασκευαστή με κατάλληλη προσαρμογή στον εκθέτη του κέρδους με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Η κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα είναι λογαριθμική. Οι αλλαγές στο εύρος των 45°C σε γραμμική κλίμακα για τάση ελέγχου 2.5 V φαίνεται στο Σχήμα Π - 6(β). Το κέρδος του PMT γι' αυτό το εύρος θερμοκρασιών κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 4.48×10^5 και 5.7×10^5 . Και πάλι, η τιμή που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις ήταν αυτή για τους 27°C και χρησιμοποιούνταν ο διορθωτικός τύπος για τη σωστή εκτίμηση του κέρδους όταν μεταβαλλόταν η θερμοκρασία.

Gain as a function of the (α) controlling voltages for three temperatures and (β) temperature for a specific controlling voltage



Σχήμα Π - 6. Κέρδος του PMT σε συνάρτηση (α) της τάσης ελέγχου του PMT για τρεις τιμές θερμοκρασίας (β) της θερμοκρασίας για τάση ελέγχου 2.5 V.

Τελικά, για μία μετρούμενη τάση V_r στο δέκτη, η μετατροπή σε μία στάθμη οπτικής ισχύος που φθάνει στο δέκτη θα γίνει μέσω της διαίρεσης $V_r / (\mathfrak{R} \times G \times T_r \times R_{TIA})$ που περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.1. Στον παρονομαστή, \mathfrak{R} είναι η αποκρισιμότητα του PMT (ή πιο σωστά της καθόδου του), G είναι το κέρδος του PMT, T_r είναι η απόκριση του φίλτρου στα 265 nm και R_{TIA} είναι η αντίσταση ανάδρασης του TIA. Η αποκρισιμότητα και το κέρδος ήταν συναρτήσεις της θερμοκρασίας και όποτε

απαιτούνταν η ενσωμάτωση της επίδρασης της θερμοκρασίας, γίνονταν οι απαραίτητες διορθώσεις μέσω των τύπων (Π.39) και (Π.40).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] X. Liu and F. Effenberger, "Emerging optical access network technologies for 5G wireless," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 12, pp. B70–B79, Dec. 2016.
- [2] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, W. V. Sorin, and R. S. Tucker, "Energy Consumption in Optical IP Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 13, pp. 2391–2403, Jul. 2009.
- [3] J. Baliga, R. W. A. Ayre, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Green Cloud Computing: Balancing Energy in Processing, Storage, and Transport," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 149–167, Jan. 2011.
- [4] M. N. Dharmaweera, R. Parthiban, and Y. A. Şekercioğlu, "Toward a power-efficient backbone network: the state of research," *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 198–227, First quarter 2015.
- [5] *Technology Options for 400G Implementation*, The Optical Internetworking Forum, Fremont, CA, USA, 2015. [Online]. Available: <http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-Tech-Options-400G-01.0.pdf>, Accessed on: Nov. 3, 2017.
- [6] F. Jalali, K. Hinton, R. Ayre, T. Alpcan, and R. S. Tucker, "Fog Computing May Help to Save Energy in Cloud Computing," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 5, pp. 1728–1739, May 2016.
- [7] European Commission, "Broadband access in the EU - Data as of July 2016," Brussels, Belgium, Dec. 16, 2016. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/broadband-access-eu-data-july-2016>, Accessed on: Nov. 6, 2017.
- [8] Cisco® Visual Networking Index™ (Jun. 2017), Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.pdf>, Accessed on: Oct. 3, 2017.
- [9] A. M. J. Koonen and E. Tangdionga, "Photonic home area networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 591–604, Feb. 2014.
- [10] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, "LED based indoor visible light communications: state of the art," *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, Third Quarter 2015.
- [11] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible light communication, networking and sensing: a survey, potential and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, Sep. 2015.
- [12] Z. Ghassemlooy, S. Arnon, M. Uysal, Z. Xu, and J. Cheng, "Emerging optical wireless communications-advances and challenges," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1738–1749, Sep. 2015.
- [13] R. McClintock, A. Haddadi, and M. Razeghi, "Free-space optical communication using mid-infrared or solar-blind ultraviolet sources and detectors," in *Proceedings of SPIE 8268*, San Francisco, CA, USA, 2012, pp. 926810-1–926810-11.
- [14] D. M. Reilly, D. T. Moriarty, and J. A. Maynard, "Unique properties of solar-blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks," in *Proceedings of SPIE 5611*, London, UK, 2004, pp. 244–254.
- [15] Z. Xu and B. M. Sadler, "Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 67–73, May 2008.
- [16] SMF-28e+® optical fiber, Corning, Inc., NY, USA. [Online]. Available: <http://www.corning.com/worldwide/en/products/communication-networks/products/fiber/smf-28e-.html>, Accessed on: Oct. 18, 2017.
- [17] Single-Fiber single mode 9/125 OS2, Riser, Corning fiber, indoor tight-buffered interconnect fiber optical cable, Fs, Renton, WA, USA. [Online]. Available: <http://www.fs.com/products/32704.html>, Accessed on: Oct. 18, 2017.
- [18] 900 µm single-fiber single mode 9/125 OS2, Riser, Corning fiber, indoor tight-buffered interconnect fiber optical cable, Fs, Renton, WA, USA. [Online]. Available: <http://www.fs.com/products/32354.html>, Accessed on: Oct. 18, 2017.
- [19] FG050LGA, 0.22 NA hard cladding, silica core, step-index multimode fiber, Thorlabs Elliptec GmbH, Dortmund, Germany. [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FG050LGA>, Accessed on: Oct. 16, 2017.
- [20] FG105LGA, 0.22 NA hard cladding, silica core, step-index multimode fiber, Thorlabs Elliptec GmbH, Dortmund, Germany. [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FG105LGA>, Accessed on: Oct. 16, 2017.

- [21] GR-S50/125-20P, NuSENSOR 50/125 graded index pure silica core multimode fiber, Nufern, East Granby, CT, USA. [Online]. Available: http://www.nufern.com/pam/optical_fibers/903/GR-S50_125-20P/, Accessed on: Oct. 16, 2017.
- [22] Y. Sun, R. Jr. Lingle, G. Oulundsen, A. H. McCurdy, D. S. Vaidya, D. Mazzaresse, and T. Irujo, “Advanced multimode fiber for high speed, short reach interconnect,” in *Proceedings of SPIE 7134*, Hangzhou, China, 2008, pp. 71341L-1 – 71341L-15.
- [23] From OM1 to OM5: How multimode fiber developed? (posted on July 20, 2017). [Online]. Available: <http://community.fs.com/blog/how-multimode-fiber-developed-from-om1-to-om5.html>, Accessed on: Oct. 17, 2017.
- [24] Comparison of OM1, OM2, OM3 & OM4 (posted on June 13, 2017). [Online]. Available: <http://www.fiber-optic-solutions.com/comparison-om1-om2-om3-om4.html>, Accessed on: Oct. 17, 2017.
- [25] J. Abbot, S. Bickhan, and C. Roberts, “Higher bit rate MMF systems using WDM,” Corning, Inc., NY, USA, Mar. 2016. [Online]. Available: http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/RC-Application%20Notes/AN5227_3-17-2016.pdf, Accessed on: Oct. 17, 2017.
- [26] *40G-SWDM4 MSA Technical Specifications*, D. Lewis, Ed., SWDM multisource agreement, Rev 2, Mar. 2017. [Online]. Available: <http://www.swdm.org/msa/>, Accessed on: Oct. 17, 2017.
- [27] *100G-SWDM4 MSA Technical Specifications*, D. Lewis, Ed., SWDM multisource agreement, Rev 2, Mar. 2017. [Online]. Available: <http://www.swdm.org/msa/>, Accessed on: Oct. 17, 2017.
- [28] Customized LC/SC/FC/ST duplex OM5 multimode wideband fiber optic patch cable, Fs, Renton, WA, USA. [Online]. Available: <http://www.fs.com/products/69107.html>, Accessed on: Oct. 17, 2017.
- [29] Graded-Index (GRIN) multimode fibers, Thorlabs Elliptec GmbH, Dortmund, Germany. [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=358, Accessed on: Oct. 17, 2017.
- [30] ClearCurve® multimode optical fiber, Corning, Inc., NY, USA. [Online]. Available: <http://www.corning.com/worldwide/en/products/communication-networks/products/fiber/clearcurve-multimode-fiber.html>, Accessed on: Oct. 17, 2017.
- [31] Y. Dong and K. W. Martin, “Gigabit communications over plastic optical fiber,” *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, vol. 3, no. 1, 2011, pp 60–69, Jan. 2011.
- [32] P. Polishuk, “Plastic optical fibers branch out,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 9, pp. 140–148, Sep. 2006.
- [33] Y. Shi, D. Visani, C. M. Okonkwo, H. Yang, H. P. A. van den Boom, G. Tartarini, E. Tangdionga and A. M. J. Koonen, , “First Demonstration of HD Video Distribution over Large-Core POF employing UWB for In-Home Networks,” in *Proceedings of OFC/NFOEC*, Los Angeles, CA, USA, Mar. 2011.
- [34] OM-Giga FF-GI-SE100 Graded Index Plastic Optical Fiber, Optimedia, Inc., Seongnam-si, Gyeonggi-do, South Korea. [Online]. Available: http://www.optimedia.co.kr/eng_optimedia_main_b_01.htm, Accessed on: Oct. 10, 2017.
- [35] O. Ziemann, J. Vinogradov, M. Luber and P. Kroepelin, “Bend-insensitive Polymer Optical Fibers,” in *Proceedings of POF Symposium in OFC/NFOEC*, San Diego, CA, USA, Mar. 2010.
- [36] C. M. Okonkwo, E. Tangdionga, H. Yang, D. Visani, S. Loquvai, R. Kruglov, B. Charbonnier, M. Ouzzif, I. Greiss, O. Ziemann, R. Gaudino, and A. M. J. Koonen, “Recent results from the EU POF-PLUS Project: multi-gigabit transmission over 1 mm core diameter plastic optical fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 186–193, Jan. 2011.
- [37] GigaPOF® fibers, Chromis Fiberoptics, Warren, NJ, USA. [Online]. Available: <http://chromisfiber.com/product-category/gigapof-fibers/>, Accessed on: Sep. 30, 2017.
- [38] HMCKU-1000P Multi-Core POF, Asahi Kasei E-Materials Corp., Chiyoda-ku, Tokyo, Japan. [Online]. Available: <https://store.fiberfin.com/index.php/products/fiber-and-cable/specialty-pof/multi-core-jacketed/1-x-2-2mm-industrial-pof-cable-19-multi-core-ul-vw-1-rated-500-meter-spool.html>, Accessed on: Oct. 20, 2017.
- [39] W. R. White, L. L. Blyler Jr., R. Ratnagiri, and M. Park, “Manufacture of Perfluorinated Plastic Optical Fibers,” in *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles, CA, USA, Feb. 2004. [Online]. Available: <http://chromisfiber.com/pdf/ofc2004.pdf>, Accessed on: Oct. 23, 2017.
- [40] UPC-6004SE-SOL/100 CAT6 UTP LAN CABLE (PREMIUM CCA) SOLID 100M, Gembird Europe B.V., Almere, The Netherlands. [Online]. Available: <http://www.e-shop.gr/cablexpert-upc-6004se-sol-100-cat6-utp-lan-cable-premium-cca-solid-100m-p-PER.584712>, Accessed on: Oct. 25, 2017.
- [41] FB00AKAR 650 nm Analogue OptoLock® Fiber Optic Transceiver, Firecomms Ltd., Cork, Ireland. [Online]. Available: <http://www.firecomms.com/optolock>, Accessed on: Oct. 25, 2017.
- [42] Y. Shi, E. Tangdionga, A. M. J. Koonen, A. Bluschke, P. Rietzsch, J. Montalvo, M. M. de Laat, G. N. van den Hoven, and B. Huiszoon, “Plastic-optical-fiber-based in-home optical networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 6, pp. 186–193, Jun. 2014.

- [43] P. Reviriego, R. Pérez-Aranda, and Carlos Pardo, “Introducing energy efficiency in the VDE 0885-763 standard for high speed communication over plastic optical fibers,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 21, no. 8, pp. 97–102, Aug. 2013.
- [44] *MOST, the automotive multimedia network*, A. Grzempa, ed., Karlsruhe, Germany: Franzis Verlag GmbH, 2011. [Online]. Available: <http://www.mostcooperation.com/publications/most-book/>.
- [45] C. Gimeno, E. Guerrero, C. Sánchez-Azqueta, G. Royo, C. Aldea, and S. Celma, “Continuous-time linear equalizer for multigigabit transmission through SI-POF in factory area networks,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 10, pp. 6530–6532, Oct. 2015.
- [46] M. Kamiya, H. Ikeda, and S. Shinohara, “Analog data transmission through plastic optical fiber in robot with compensation of errors caused by optical fiber bending loss,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 5, pp. 1034–1037, Oct. 2001.
- [47] B. W. Harris, “Fiber optics for flight control systems,” M.S. thesis, School of Engineering, University of Dayton, OH, USA, 2014.
- [48] A. López, X. Jiang, M. Á. Losada, J. Mateo, D. Richards, N. Madamopoulos, and N. Antoniadis, “Temperature sensitivity of POF links for avionics applications,” in *Proceedings of ICTON*, Girona, Spain, Jul. 2–6, 2017.
- [49] D. H. Richards, M. A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, and N. Madamopoulos, “Modeling methodology for engineering SI-POF and connectors in an avionics system,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 3, pp. 468–475, Feb. 2013.
- [50] F. M. Reis, P. F. da Costa Antunes, N. M. Mendes Maia, A. R. Carvalho, and P. S. de Brito André, “Structural Health Monitoring Suitable for Airborne Components Using the Speckle Pattern in Plastic Optical Fibers,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 15, pp. 4791–4796, Aug. 2017.
- [51] J. Witt, F. Narbonneau, M. Schukar, K. Krebber, J. De Jonckheere, M. Jeanne, D. Kinet, B. Paquet, A. Depré, L. T. D’Angelo, T. Thiel, and R. Logier, “Medical textiles with embedded fiber optic sensors for monitoring of respiratory movement,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 246–254, Jan. 2012.
- [52] J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, J. Demuth, and L. Šašek, “Heart Rate Sensor for Integration into Personal Protective Equipment”, in *Proceedings of the 20th Conference on Plastic Optical Fibers*, pp. 573–577, Bilbao, Spain, Sep. 2011.
- [53] K. Peters, “Polymer optical fiber sensors—a review,” *Smart Materials and Structures*, vol. 20, no. 1, Dec. 2010.
- [54] J. A. Cantoral-Ceballos, N. Nurgiyatna, P. Wright, J. Vaughan, Christine Brown-Wilson, Patricia J. Scully, and K. B. Ozanyan, “Intelligent carpet system, based on photonic guided-path tomography, for gait and balance monitoring in home environments,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 279–289, Jan. 2015.
- [55] L. E. Dunne, P. Walsh, S. Hermann, B. Smyth, and B. Caulfield, “Wearable monitoring of seated spinal posture,” *IEEE Transactions On Biomedical Circuits And Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 97 – 105, Jun. 2008.
- [56] N. Jing, J. Zheng, X. Zhao, and C. Teng, “Refractive index sensing based on a side-polished macrobending plastic optical fiber,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2898 – 2901, May 2015.
- [57] M. Batumalay, S. W. Harun, N. Irawati, H. Ahmad, and H. Arof, “A study of relative humidity fiber-optic sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 1945 – 1950, Mar. 2015.
- [58] C. S. J. Leitão, P. F. da Costa Antunes, J. A. M. Bastos, J. de Lemos Pinto, and P. S. de Brito André, “Plastic Optical Fiber Sensor for Noninvasive Arterial Pulse Waveform Monitoring,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 14–18, Jan. 2015.
- [59] J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, H. Pažoutová, J. Demuth, N. Santostefano, H. Mäkinen, and P. Pietrowski, “Personal protective equipment with integrated POF sensors”, in *Proceedings of SPIE 8794*, Krakow, Poland, 2013, pp. 8794R-1–8794R-6.
- [60] S. O’Keeffe, W. Zhao, W. Sun, D. Zhang, Z. Qin, Z. Chen, Y. Ma, and E. Lewis, “An Optical Fibre-Based Sensor for Real-Time Monitoring of Clinical Linear Accelerator Radiotherapy Delivery,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 22, no. 3, May/June. 2016.
- [61] X. Lia, N. Bamiedakis, J. J. D. McKendry, E. Xie, R. Ferreira, E. Gu, M. D. Dawson, R. V. Penty, I. H. White, “11 Gb/s WDM transmission over SI-POF using violet, blue and green μ LEDs,” in *Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Anaheim, CA, USA, Mar. 2016.
- [62] J. Vinogradov, R. Kruglov, R. Engelbrecht, O. Ziemann, J.-K. Sheu, K.-L. Chi, J.-M. Wun, and Jin-Wei Shi, “GaN-based cyan light-emitting diode with up to 1-GHz bandwidth for high-speed transmission over SI-POF,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 3, Jun. 2017.
- [63] 635 or 650nm Laser Diode LDM-650/635, Bitline System Pty Ltd, Sydney, New South Wales, Australia, http://www.oemarket.com/catalog/product_info.php/635-650nm-laser-diode-p-195, Accessed on: Oct. 13, 2017.

- [64] Blue single and multi mode laser PL 450B, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg, Germany, http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/laser-diodes/visible-laser/blue-laser/index.jsp, Accessed on: Oct. 13, 2017.
- [65] Cyan single mode laser PLT5 488, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg, Germany, http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/laser-diodes/visible-laser/cyan-laser/index.jsp, Accessed on: Oct. 13, 2017.
- [66] Green single mode laser PLT5 510, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg, Germany, http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/laser-diodes/visible-laser/green-laser/index.jsp, Accessed on: Oct. 13, 2017.
- [67] J. Lee, "Discrete multitone modulation for short-range optical communications," Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven, the Netherlands (2009).
- [68] *Optical system design and engineering considerations*, Supplement 39 to ITU-T G-series Recommendations, International Telecommunication Union, Telecommunication standardization sector, 2016.
- [69] Femto Photoreceiver HSA-X-S-1G4-SI, FEMTO Messtechnik GmbH, Berlin, Germany [Online]. Available: <http://www.femto.de>, Accessed on: Oct. 13, 2017.
- [70] Si PIN photodiode S5972, Hamamatsu Photonics K. K., Higashi-ku, Hamamatsu, Japan [Online]. Available: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/4001/4103/S5972/index.html>, Accessed on: Oct. 13, 2017.
- [71] First Sensor APD AD800-11, First Sensor AG, Berlin, Germany [Online]. Available: <https://www.first-sensor.com/en/products/optical-sensors/detectors/avalanche-photodiodes-apd/series-11-with-enhanced-blue-sensitivity/>, Accessed on: Oct. 13, 2017.
- [72] C. Gimeno, C. Sánchez-Azqueta, E. Guerrero, J. Aguirre, C. Aldea, and S. Celma, "Single-Chip receiver for 1.25 gb/s over 50-m SI-POF," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 11, pp. 1220–1223, Jun. 2015.
- [73] LPL1100P022M LiteWire Anti-UV Simplex Cable, Naria Security, Torbole Casaglia, Brescia, Italy [Online]. Available: <http://www.nariasecurity.it/en/products/plastic-fiber-cables-litewire/>, Accessed on: Oct. 10, 2017.
- [74] Toray Polymer Optical Fiber PGU-CD1001-22-E, Toray Industries, Inc., Tokyo, Japan [Online]. Available: http://www.toray.co.jp/english/raytela/products/pro_a002.html, Accessed on: Oct. 10, 2017.
- [75] Leoni Standard POF 84860104B, LEONI Fiber Optics GmbH, Neuhaus – Schierschnitz, Germany [Online]. Available: http://www.leoni-fiber-optics.com/uploads/tx_downloadleoni/en_fiber_optics2.pdf, Accessed on: Oct. 10, 2017.
- [76] ESKA Premier GH4001 Polymer Optical Fiber, Mitsubishi Rayon Co., Ltd., Tokyo, Japan [Online]. Available: <http://www.pofeska.com/pofeskae/product/02/index.html>, Accessed on: Oct. 10, 2017.
- [77] M. Atef, R. Swoboda, and H. Zimmermann, "1.25 Gbit/s over 50 m step-index plastic optical fiber using a fully integrated optical receiver with an integrated equalizer," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 1, pp. 118–122, Jan. 2012.
- [78] D. Zeolla, A. Nespola, and R. Gaudino, "Comparison of different modulation formats for 1-Gb/s SI-POF transmission systems," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 14, Jul. 2011, pp. 950–952.
- [79] J. Aguirre, C. Sánchez-Azqueta, E. Guerrero, C. Gimeno, and S. Celma, "3.125 Gbit/s CMOS transceiver for duobinary modulation over 50-m SI-POF channels," *Electronics Letters*, vol. 53, no. 4, pp. 258–260, Feb. 2017.
- [80] M. Atef, R. Swoboda, and H. Zimmermann, "Real-Time 1.25-Gb/s Transmission Over 50-m SI-POF Using a Green Laser Diode," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 15, pp. 1331–1333, Aug. 2012.
- [81] R. Kruglov, J. Vinogradov, O. Ziemann, S. Loquai, J. Müller, U. Strauß, and C-A. Bunge, "Eye-safe data transmission of 1.25 Gbit/s over 100-m SI-POF using green laser diode," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 3, pp. 167–169, Feb. 2012.
- [82] J. Yang, X. Li, M. S. Alfiad, A.M.J. Koonen, and H. P. A. van den Boom, "Low Cost High Capacity Data Transmission over Plastic Optical Fibre Using Quadrature Amplitude Modulation," in *Proceedings of the Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, Eindhoven, the Netherlands, Nov.-Dec. 2006, pp. 9–12.
- [83] J. Yang, H. P. A. van den Boom, and A. M. J. Koonen, "Cost-efficient WDM QAM transmission of 100 Mbit/s over 100 m 1 mm core diameter polymer optical fiber," in *Proceedings of the 34th ECOC*, Brussels, Belgium, Sep. 2008, pp. 79–80.
- [84] M. Schüppert and C.-A. Bunge, "5Gb/s eye-safe LED-based SI-POF transmission with equalization of transmitter nonlinearities," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 23, pp. 2732–2735, Dec. 2016.

- [85] L. Geng, R. V. Penty, I. H. White, and D. G. Cunningham, "FEC-free 50 m 1.5 Gb/s plastic optical fibre link using CAP modulation for home networks," in *Proceedings of the 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC)*, Amsterdam, Netherlands, 2012.
- [86] B. Charbonnier, P. Urvoas, M. Ouzzif, J. Le Masson, J. D. Lambkin, M. O'Gorman and R. Gaudino, "EU project POF-PLUS: gigabit transmission over 50 m of step-index plastic optical fibre for home networking," in *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference*, San Diego, CA, USA, Mar. 2009.
- [87] S. C. J. Lee, F. Breyer, S. Randel, R. Gaudino, G. Bosco, A. Bluschke, M. Matthews, P. Rietzsch, R. Steglich, H. P. A. van den Boom, and A. M. J. Koonen, "Discrete multitone modulation for maximizing transmission rate in step-index plastic optical fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 11, pp. 1503–1513, Jun. 2009.
- [88] S. Randel, F. Breyer, S. C. J. Lee, and J. W. Walewski, "Advanced modulation schemes for short-range optical communications," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1280–1289, Sep./Oct. 2010.
- [89] M. Jončić, R. Kruglov, M. Haupt, R. Caspary, J. Vinogradov, and U. H. P. Fischer, "Four-channel WDM transmission over 50-m SI-POF at 14.77 Gb/s using DMT modulation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 13, pp. 1328–1331, Jul. 2014.
- [90] S. C. J. Lee, H. P. A. van den Boom, R. L. Duijn, S. Randel, B. Spinnler, P. K. van Bennekom, F. M. Huijskens, J. Zeng, A. M. J. Koonen, and G. D. Khoe, "2×500 mb/s transmission over 25 m of standard 1 mm step-index PMMA POF with angular mode group diversity multiplexing," in *Proceedings of the 15th International Conference on Plastic Optical Fibers*, Seoul, Korea, Sep. 2006, pp. 348-353.
- [91] E. Grivas, N. Raptis, and D. Syvridis, "An optical mode filtering technique for the improvement of the large core SI-POF link performance," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 12, pp. 1796–1801, Jun. 15, 2010.
- [92] N. A. Albakay and L. Nguyen, "Achieving 1 Gbps over step-index plastic optical fiber using spatial mode air-gap filter," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 8, Apr. 2017, pp. 655–658.
- [93] S. Loquai, R. Kruglov, B. Schmauss, C.-A. Bunge, F. Winkler, O. Ziemann, E. Hartl, and T. Kupfer, "Comparison of modulation schemes for 10.7 Gb/s transmission over large-core 1 mm PMMA polymer optical fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 13, pp. 2170–2176, Jul. 2013.
- [94] P. Michel, J. Dugas, J. M. Cariou, and L. Martin, "Thermal variations of refractive index of PMMA, polystyrene, and poly (4-methyl-1-pentene)," *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, vol. 25, no 4, pp. 379–394, Jan. 1986.
- [95] M. S. Kovačević and A. Djordjević, "Variation of modal dispersion and bandwidth with temperature in PMMA based step-index polymer optical fibers," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 12, no. 2, pp. 288–293, Feb. 2010.
- [96] F. Breyer, "Multilevel transmission and equalization for polymer optical fiber systems," Ph.D. dissertation, Institute for Communications Engineering, Technische Universität München, Germany (2010).
- [97] Y. Koike, "Transmission Loss," in *Fundamentals of Plastic Optical Fibers*, 1st ed., Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGa, 2015, ch. 2, sec. 2.1, 2.2, pp. 11 – 26.
- [98] C. Emslie, "Review: Polymer optical fibres," *Journal Of Materials Science*, vol. 23, no. 7, pp. 2281–2293, Jul. 1988.
- [99] T. Kaino, M. Fujiki, S. Oikawa, and S. Nara, "Low-loss plastic optical fibers," *Applied Optics*, vol. 20, no. 17, pp. 2886-2888, Sep. 1981.
- [100] U. Paar, W. Ritter, and K.-F. Klein, "Excitation dependent losses in plastic optical fibers," in *Proceedings of SPIE 1799*, Boston, MA, USA, 1992, pp. 48–56.
- [101] D. Gloge, "Optical power flow in multimode fibers," *The Bell System Technical Journal*, vol. 51, no. 8, pp. 1767–1783, Oct. 1972.
- [102] Y. Koike, "Transmission Capacity," in *Fundamentals of Plastic Optical Fibers*, 1st ed., Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGa, 2015, ch. 3, sec. 3.1.1, p. 32.
- [103] B. Drljača, A. Djordjević, and S. Savović, "Frequency response in step-index plastic optical fibers obtained by numerical solution of the time-dependent power flow equation," *Optics and Laser Technology*, vol. 44, no. 6, pp. 1808–1812, Sep. 2012.
- [104] J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, and J. Zubia, "Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers," *Optics Express*, vol. 24, no. 20, pp. 9028–9035, Oct. 2006.
- [105] I. Garcés, J. Mateo, I. Salinas, J. Lou, and J. Zubía, "Mode coupling contribution to radiation losses in curvatures for high and low numerical aperture plastic optical," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 1160–1164, Jul. 2002.
- [106] M. A. Losada, J. Mateo, I. Garcés, J. Zubía, J. A. Casao, and P. Pérez-Vela, "Analysis of strained plastic optical fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 1513–1515, Jun. 2004.

- [107] S. Savović and A. Djordjevich, "Mode coupling in strained and unstrained step-index plastic optical fibers," *Applied Optics*, vol. 45, no. 26, pp. 6775–6780, Sep. 2006.
- [108] B. Drljača, S. Savović, and A. Djordjevich, "Calculation of the frequency response in step-index plastic optical fibers using the time-dependent power flow equation," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 49, no. 5, pp. 618–622, May 2011.
- [109] J. Mateo, M. A. Losada, and J. Zubia, "Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation," *Optics Express*, vol. 17, no. 4, pp. 2850–2860, Feb. 2009.
- [110] F. Breyer, N. Hanik, S. Randel, and B. Spinnler, "Investigations on electronic equalization for step-index polymer optical fiber systems," in *Proceedings of the 11th Annual Symposium of IEEE/LEOS Benelux Chapter (2006)*, Eindhoven, The Netherlands, 2006, pp. 149–152.
- [111] S. Savović and A. Djordjevich, "Influence of numerical aperture on mode coupling in step-index plastic optical fibers," *Applied Optics*, vol. 43, no. 29, pp. 5542–5546, Oct 2004.
- [112] S. Savović, B. Drljača, and A. Djordjevich, "Influence of launch-beam distribution on bandwidth in step-index plastic optical fibers," *Applied Optics*, vol. 52, no. 6, pp. 1117–1121, Feb. 2013.
- [113] O. Østerby, "Five Ways of Reducing the Crank–Nicolson Oscillations," *BIT Numerical Mathematics*, vol. 43, no. 4, pp. 811–822, Nov. 2003.
- [114] Y. Akimoto, M. Asai, K. Koike, K. Makino, and Y. Koike, "Poly(styrene)-based graded-index plastic optical fiber for home networks," *Optics Letters*, vol. 37, no. 11, pp. 1853–1855, Jun. 2012.
- [115] L.-W. Chen, W.-H. Lu, and Y.-C. Chen, "An investigation into power attenuations in deformed polymer optical fibers under high temperature conditions," *Optics Communications*, vol. 282, no. 6, pp. 1135–1140, Mar. 2009.
- [116] J. Mateo, M. A. Losada, J. J. Martínez-Muro, I. Garcés, and J. Zubia, "Bandwidth measurement in POF based on general purpose equipment," in *Proceedings of the 14th International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2005)*, Hong Kong, PRC, 2005, pp. 53–56.
- [117] Y.-C. Chen, "Power losses in deformed polymer optical fiber under high temperature," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4983–4990, Dec. 2006.
- [118] M. A. Losada, J. Mateo, D. Espinosa, I. Garcés, and J. Zubia, "Characterization of the far field pattern for plastic optical fibers," in *Proc. of the 13th International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2004)*, Nuremberg, Germany, 2005, pp. 458–465.
- [119] M. A. Losada, J. Mateo, and J. J. Martínez-Muro, "Assessment of the impact of localized disturbances on SI-POF transmission using a matrix propagation model," *Journal of Optics*, vol. 13, no. 5, Mar. 2011, DOI: 10.1088/2040-8978/13/5/055406.
- [120] SI-POF simplex cable, R&M (Reichle & De-Massari AG), Wetzikon, Switzerland, R313125/1.0/e/09.05/DZS, [Online]. Available: <http://www.rdm.com>, Accessed on: Jan. 10, 2018.
- [121] E. M. Kim, D. L. Franzen, "Measuring of far-field and near-field radiation patterns from optical fibers," National Bureau of Standards, Boulder, CO, USA, Tech. Note 1032, Feb. 1981.
- [122] L650P007, Laser Diode, Thorlabs GmbH, Darchau, Germany. [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=L650P007>, Accessed on: Jan. 31, 2018.
- [123] S. Savović and A. Djordjevich, "Method for calculating the coupling coefficient in step-index optical fibers," *Applied Optics*, vol. 46, no. 9, pp. 1477–1481, Mar. 2007.
- [124] X. Liu, P. Tian, Z. Wei, S. Yi, Y. Huang, X. Zhou, Z.-J. Qiu, L. Hu, Z. Fang, C. Cong, L. Zheng, and R. Liu, "Gbps long-distance real-time visible light communications using a high-bandwidth GaN-based micro-LED," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 6, Dec. 2017, DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2775648.
- [125] S. Savović, M. S. Kovačević, J. S. Bajić, D. Z. Stupar, A. Djordjevich, M. Živanov, B. Drljača, A. Simović, and K. Oh, "Temperature dependence of mode coupling in low-NA plastic optical fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 89–94, Jan. 1, 2015.
- [126] N. Jing, C. Teng, J. Zheng, G. Wang, M. Zhang, and Z. Wang, "Temperature dependence of light power propagation in bending plastic optical fiber," *Optical Fiber Technology*, vol. 31, pp. 20–22, Sep. 2016, DOI: 10.1016/j.yofte.2016.05.006.
- [127] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, "Wireless body area networks: a survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1658–1686, Jan. 2014.
- [128] J. M. Kahn, and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, Feb. 1997.
- [129] H. Ding, G. Chen, A. K. Majumdar, B. M. Sadler, and Z. Xu, "Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels," in *Proceedings of SPIE 8038*, Orlando, FL, USA, 2011, pp. 8038J-1–8038J-8.
- [130] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S.-K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, Mar. 2012.

- [131] D. R. Pauluzzi, P. R. H. McConnell, and R. L. Poulin, "Free-space, undirected infrared (IR) voice and data communications with a comparison to RF systems," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Selected Topics in Wireless Communications (1992)*, Vancouver, B.C., Canada, 1992, pp. 279–285.
- [132] R. E. Bird and C. Riordan, "Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres," *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 25, no. 1, pp. 87–97, Jan. 1986.
- [133] A. Bucholtz, "Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere," *Applied Optics*, vol. 34, no. 15, pp. 2765–2773, May 1995.
- [134] D. M. Reilly, "Atmospheric optical communications in the middle ultraviolet," M.S. thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1976.
- [135] L. Elterman, "UV, Visible and IR attenuation for altitudes to 50 km, 1968," *Air Force Cambridge Research Laboratories AFCRL-68-0153*, Environmental Research Papers, No. 285, Apr. 1968.
- [136] W. Chehade, V. Gorshlev, A. Serdyuchenko, J. P. Burrows and M. Weber, "Revised temperature-dependent ozone absorption cross-section spectra (Bogumil et al.) measured with the SCIAMACHY satellite spectrometer," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, pp. 3055–3065, 2013.
- [137] D. M. Junge, "Non-line-of-sight electro-optic laser computations in the middle ultraviolet," M.S. thesis, Naval Postgraduate School, Department of the Navy, Monterey, CA, USA, 1977.
- [138] G. A. Shaw, A. M. Siegel, and M. L. Nischan, "Demonstration system and applications for compact wireless ultraviolet communications," in *Proceedings of SPIE 5071*, Orlando, FL, USA, 2003, pp. 241–252.
- [139] S. Bloom, E. Korevaar, J. Schuster, and H. Willebrand, "Understanding the performance of free-space optics," *Journal of Optical Networking*, vol. 2, no. 6, pp. 178–200, Jun. 2003.
- [140] E. A. Boettner, "Spectral Transmission of the Eye," University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, Contract No. AF41(609)-2966, Project No. 6301, Jul. 1967.
- [141] M. Cooke, "Going deep for UV sterilization LEDs," *Semiconductor Today, Compounds and Advanced Silicon*, vol. 5, no. 3, pp. 82–88, Apr./May 2010.
- [142] The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)," *Health Physics*, vol. 87, no. 2, pp. 171–186, Aug. 2004. Available: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPUV2004.pdf>.
- [143] Photomultiplier Tubes, Basics and Application, 3rd. ed., Hamamatsu Photonics K. K., 2007, pp. 13–81.
- [144] G. A. Shaw, M. Nischan, M. Iyengar, S. Kaushik, and M. K. Griffin, "NLOS UV communication for distributed sensor systems," in *Proceedings of SPIE 4126*, San Diego, CA, USA, 2000, pp. 83–96.
- [145] A. S. Zachor, "Aureole radiance field about a source in a scattering-absorbing medium," *Applied Optics*, vol. 17, no. 12, pp. 1911–1922, Jun. 1978.
- [146] A. Witt, "Multiple scattering in reflection nebulae. I. A Monte Carlo approach," *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 35, pp. 1–6, Sep. 1977.
- [147] Z. Xu, H. Ding, B. M. Sadler, and G. Chen, "Analytical performance study of solar-blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links," *Optics Letters*, vol. 33, no. 16, pp. 1860–1862, Aug. 2008.
- [148] M. A. Elshiny and S. Hranilovic, "Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 28, no. 3, pp. 420–428, Mar. 2011.
- [149] H. Ding, G. Chen, A. K. Majumdar, B. M. Sadler, and Z. Xu, "Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 9, pp. 1535–1544, Dec. 2009.
- [150] H. Ding, Z. Xu, and B. M. Sadler, "A path loss model for non-line-of-sight ultraviolet multiple scattering channels," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2010, 598572, May 2010, DOI: 10.1155/2010/598572.
- [151] G. Chen, Z. Xu, H. Ding, and B. M. Sadler, "Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications," *Optics Express*, vol. 17, no. 5, pp. 3929–3940, Mar. 2009.
- [152] A. Gupta, M. Noshad, and M. Brandt-Pearce, "NLOS UV channel modeling using numerical integration and an approximate closed-form loss model," in *Proceedings of SPIE 8517*, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 1–10.
- [153] G. Chen, Z. Xu, and B. M. Sadler, "Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-line-of-sight communication channels," *Optics Express*, vol. 18, no. 10, pp. 10500–10509, May 2010.

- [154] D. Han, X. Fan, K. Zhang, and Rui Zhu, “Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere communication,” *Applied Optics*, vol. 52, no. 22, pp. 5516–5522, Aug. 2013.
- [155] R. J. Drost, T. J. Moore, and B. M. Sadler, “UV communications channel modeling incorporating multiple scattering interactions,” *Journal of Optical Society of America A*, vol. 28, no. 4, pp. 686–695, Apr. 2011.
- [156] J. Armstrong and A. J. Lowery, “Power efficient optical OFDM,” *Electronics Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 370–372, Mar. 2006.
- [157] N. Fernando, Y. Hong, and E. Viterbo, “Flip-OFDM for unipolar communication systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 12, pp. 3726–3733, Dec. 2012.
- [158] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, and G. H. Sasaki, “Modulation and demodulation,” in *Optical Networks, a Practical Perspective*, 3rd ed., Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2010, ch. 4, pp. 245–269.
- [159] Q. He, B. M. Sadler, and Z. Xu, “Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications,” in *Proceedings of SPIE 7464*, San Diego, CA, USA, 2009, pp. 74640H-1–74640H-12.
- [160] D. J. F. Barros, S. K. Wilson, and J. M. Kahn, “Comparison of orthogonal frequency-division multiplexing and pulse-amplitude modulation in indoor optical wireless links,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 1, pp. 153–163, Jan. 2012.
- [161] *Photomultiplier Handbook*, Burle Industries, Inc., USA, 1980, pp. 160–169.
- [162] Q. He, Z. Xu, and B. M. Sadler, “Performance of short-range non-line-of-sight LED-based ultraviolet communication receivers,” *Optics Express*, vol. 18, no. 12, pp. 12226–12238, Jun. 2010.
- [163] J. Proakis and M. Salehi, “Digital transmission through the additive white Gaussian noise channel,” in *Communications System Engineering*, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002, ch. 7, pp. 340–367, 405–436.
- [164] M. D. Auleh, J. M. Kahn and J. R. Barry, “Performance of pulse-position modulation on measured non-directed indoor infrared channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, no. 6, pp. 654–659, June 1996.
- [165] J. Armstrong and B. J. C. Schmidt, “Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN,” *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 343–345, May 2008.
- [166] R. J. Drost and B. M. Sadler, “Survey of ultraviolet non-line-of-sight communications,” *Semiconductors Science and Technology*, vol. 29, no. 8, 2014. Jun. 2014, DOI: 10.1088/0268-1242/29/8/084006.
- [167] Photomultiplier Tube R7154, Hamamatsu Photonics K. K., Iwata city, Japan [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R7154_TPMS1036E.pdf, Accessed on: May 3, 2017.
- [168] D. P. Young, J. Brewer, J. Chang, T. Chou, J. Kvam, and M. Pugh, “Diffuse mid-UV communication in the presence of obscurants,” in *Proceedings of the 46th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2012, pp. 1061–1064.
- [169] L. Liao, Z. Li, T. Lang, and G. Chen, “UV LED array based NLOS UV turbulence channel modeling and experimental verification,” *Optics Express*, vol. 23, no. 17, pp. 21825–21835, Aug. 2015.
- [170] E. P. Shettle and R. W. Fenn, “Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties,” Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, USA, Tech. Rep. AFGL-TR-79-0214, Environmental Research Papers No. 676, Sep. 1979.
- [171] C. Levoni, M. Cervino, R. Guzzi and F. Torricella, “Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes”, *Applied Optics*, vol. 36, no. 30, pp. 8031–8041, Oct. 1997.
- [172] C. Mätzler, “MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption,” Institut für Angewandte Physik, Universität Bern, Bern, Switzerland, IAP Research Report No. 2002-08, Jun. 2002. [Online] Available: <http://www.iap.unibe.ch/publications/publication.php?lang=en&dept=1>, Accessed on: Aug. 5, 2017.
- [173] W. Chehade, V. Gorshchev, A. Serdyuchenko, J. P. Burrows and M. Weber, “Revised temperature-dependent ozone absorption cross-section spectra (Bogumil et al.) measured with the SCIAMACHY satellite spectrometer”, *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, pp. 3055–3065, Mar. 2013, DOI: 10.5194/amt-6-3055-2013.
- [174] M. Haeffelin, Q. Laffineur, J.-A. Bravo-Aranda, M.-A. Drouin, J.-A. Casquero-Vera, J.-C Dupont, and H. De Backer, “Radiation fog formation alerts using attenuated backscatter power from automatic lidars and ceilometers,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 9, pp. 5347–5355, Nov. 2016, DOI: 10.5194/amt-9-5347-2016.
- [175] R. W. Fenn, J. D. Mill, S. A. Clough, L. S. Rothman, W. O. Gallery, E. P. Shettle, R. E. Good, F. E. Volz, and F. X. Kneizys, “Optical and infrared properties of the atmosphere,” in *Handbook of Geophysics and Space Environment*, A. S. Jursa, Scientific Ed., Air Force Geophysics Laboratory,

- Springfield, VA, USA: NTIS, 1985, ch. 18, sec. 18.2.2, pp. 18-25–18-29, [Online]. Available: http://www.cnofs.org/Handbook_of_Geophysics_1985/pdf_menu.htm, Accessed on: Sep. 5, 2017.
- [176] M. Al Naboulsi, H. Sizun, and F. de Fornel, “Fog attenuation prediction for optical and infrared waves,” *Optical Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 319–329, Feb. 2004.
- [177] S. Tang, Y. Dong, and X. Zhang, “Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 1, pp. 226–234, Jan. 2014.
- [178] A. Vavoulas, H. G. Sandalidis, and D. Varoutas, “Node isolation probability for serial ultraviolet UV-C multi-hop networks,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 9, pp. 750–757, Sep. 2011.
- [179] G. Chen, F. Abou-Galala, Z. Xu, and B. M. Sadler, “Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links,” *Optics Express*, vol. 16, no. 19, pp. 15059–15068, Sep. 2008.
- [180] R. J. Drost, B. M. Sadler, and G. Chen, “Dead time effects in non-line-of-sight ultraviolet communications,” *Optics Express*, vol. 23, no. 13, pp. 15748–15761, Jun. 2015.
- [181] M. Ghaffari, M. D. Matinfar, and J. A. Salehi, “Wireless optical CDMA LAN: digital implementation analysis,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 9, pp. 1676–1686, Dec. 2009.
- [182] X. Wang and K. Kitayama, “Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 10, pp. 2226–2235, Oct. 2004.
- [183] T. S. Rappaport, “Multiple access techniques in wireless communications,” in *Wireless Communications: Principles and Practices*, 1st ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1996, ch. 8, pp. 416–417.
- [184] M. H. Ardakani and M. Uysal. “Relay-assisted OFDM for NLOS ultraviolet communication,” in *Proceedings of the 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Budapest, Hungary, 2015, 2015 pp. 1–4.
- [185] F. Tampieri and C. Tomasi, “Size distribution models of fog and cloud droplets and their volume extinction coefficients at visible and infrared wavelengths,” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 114, no. 4, pp. 571–586, Jul. 1976.
- [186] G. A. Shaw, A. M. Siegel, J. Model and M. Nischan, “Field testing and evaluation of a solar-blind uv communication link for unattended ground sensors,” in *Proceedings of SPIE 5417*, Orlando, FL, USA, 2004, pp. 250–261.
- [187] E. Hergert and M. Lares, “APD Arrays: Geiger-mode APD arrays detect low light,” [Online]. Available: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-44/issue-8/features/apd-arrays-geiger-mode-apd-arrays-detect-low-light.html>, Accessed on: Jul. 3, 2017.
- [188] B. F. Aull, A. H. Loomis, D. J. Young, R. M. Heinrichs, B. J. Felton, P. J. Daniels, and D. J. Landers, “Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging,” *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 335–350, 2002.
- [189] C. Xu, H. Zhang, and J. Cheng, “Effects of haze particles and fog droplets on NLOS ultraviolet communication channels,” *Optics Express*, vol. 23, no. 18, pp. 23259–23269, Aug. 2015.
- [190] *High Power UVCLEAN[®] Lamps (3–5 mW)*, Sensor Electronic Technology, Inc., Columbia, SC, USA [Online]. Available: <http://www.s-et.com/uvclean-sheets/high-power-uv-lamp-3-5mw.pdf>, Accessed on: Jul. 3, 2017.
- [191] Scanic fog Machine 1200, Scanic – Lighting Effects, Münster, Germany [Online]. Available: <http://www.scanic.de/products/foggers-stage-effects/fog-machines/scanic-fog-machine-1200.html>, Accessed on: Jul. 2, 2017.
- [192] Pea Soup Ltd., U.K. [Online], <http://www.smokemachines.net/smoke-particle-size.shtml>, Accessed on: Jul. 2, 2017.
- [193] L. Liao, R. J. Drost, Z. Li, T. Lang, B. M. Sadler, and G. Chen, “Long-distance non-line-of-sight ultraviolet communication channel analysis: experimentation and modeling,” *IET Optoelectronics*, vol. 9, no. 5, pp. 223–231, Mar. 2015.
- [194] SiC Photodiode SG01XL-C5, Sglux SolGel Technologies GmbH, Berlin, Germany [Online]. Available: <http://download.sglux.de/photodiodes/SG01XL-C5.pdf>, Accessed on: Jul. 24, 2017.
- [195] 50mm Dia. × 75mm FL UV-AR Coated, UV Plano-Convex Lens, Edmund Optics Inc., Barrington, NJ, USA [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/plano-convex-pcx-spherical-singlet-lenses/50mm-dia.-x-75mm-fl-uv-ar-coated-uv-plano-convex-lens/#resources>, Accessed on: Jul. 24, 2017.
- [196] J. A. Zak, “Drop size distributions and related properties of fog for five locations measured from aircraft,” ViGYAN Inc., Hampton, VA, USA, NASA Contractor Report 4585 DOT/FAA/CT-94/02, Apr. 1994.
- [197] J. V. Dave, “Effect of varying integration increment on the computed polarization characteristics of the radiation scattered by polydispersed aerosols,” *Applied Optics*, vol. 8, no. 10, pp. 2153–2154, Oct. 1969.

- [198] D. H. Tofsted, B. T. Davis, A. E. Wetmore, J. Fitzgerrel, R. C. Shirkey, and R. A. Sutherland, "EOSAEL92 Aerosol Phase Function Data Base PFNDAT," U.S. Army Research Laboratory, Arlington, VA, USA, Tech. Rep. ARL-TR-273-9, Jun. 1997.
- [199] *Photomultiplier Tubes, principles & applications*, Photonis France S.A.S., Brive, France, 2002, pp. 4-42–4-52.
- [200] K. Minakawa, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Thermal Memory Effect in Polymer Optical Fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 13, Jul. 2015.
- [201] A.-M. Căilean, and M. Dimian, "Towards environmental-adaptive visible light communications receivers for automotive applications: a review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 9, pp. 2803–2811, May 2016.
- [202] T. Elias, M. Haeffelin, P. Drobinski, L. Gomes, J. Rangognio, T. Bergot, P. Chazette, J.-C. Raut, and M. Colomb, "Particulate contribution to extinction of visible radiation: Pollution, haze, and fog," *Atmospheric Research*, vol. 92, no. 4, pp. 443–454, Jun. 2009.