



Εθνικό και Καποδιστριακό
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Τμήμα Φυσικής
Τομέας Ηλεκτρονικής, Υπολογιστών,
Τηλεπικοινωνιών και Αυτοματισμού
Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών στην Ραδιοηλεκτρολογία και
Ηλεκτρονική (Ρ/Η)

Διπλωματική Εργασία

**«Μελέτη Ασύρματων Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων Πολλαπλών
Αλμάτων με Αναμεταδότες σε Κανάλια Διαλείψεων»**

Όνοματεπώνυμο : Μαγγανάρης Κυριάκος

A.M. : 2017 102

Επιβλέποντες Καθηγητές: Τόμπρας Γεώργιος (Καθηγητής),

Τσίλης Εμμανουήλ (Επίκουρος Καθηγητής),

Νισταζάκης Έκτορας (Αναπληρωτής Καθηγητής)

Αθήνα, Ιούλιος 2019

Δηλώνω υπεύθυνα ότι δεν έχω υποπέσει σε περιπτώσεις λογοκλοπής ή αντιγραφής, όπως αυτές διασαφηνίζονται παρακάτω.

Μαγγανάρης Κυριάκος

Οδηγίες αποφυγής Λογοκλοπής και Αντιγραφής

1. Μην παραθέτετε κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί χωρίς να τα περικλείετε σε εισαγωγικά και χωρίς να αναφέρετε το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών σας, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Πρέπει να αναφέρετε πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική σας εργασία. Αυτό τιμωρείται ως αντιγραφή.
3. Υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορείτε να εντάξετε στην εργασία σας εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια. Εσείς μπορείτε να χρησιμοποιείτε τέτοιο υλικό, με μέτρο, γιατί οι εργασίες είναι μικρού μεγέθους και πρέπει πάντα να κυριαρχούν οι δικές σας ιδέες.
4. Αυστηρά τιμωρείται επίσης η παρουσίαση έργου άλλων ως προσωπικής εργασίας.

▪ ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία αυτή εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρονικής, Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και αυτοματισμού του τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή κ. Ε. Νισταζάκη και την συνεπίβλεψη των κ.κ. Γ. Τόμπρα (καθηγητή) και Ε. Τσίλη (επίκουρου καθηγητή).

Ο ορισμός του θέματος της εργασίας, όπως και η ολοκλήρωση της έγινε υπό την συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνση του καθηγητή μου κ. Ε. Νισταζάκη, στον οποίο εκφράζω της θερμότερες ευχαριστίες μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους κ.κ. Γ. Τόμπρα και Ε. Τσίλη για την εξαιρετική τους συνεργασία.

Επιπλέον, θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ν. Ανδρούτσο και τον μεταδιδακτορικό συνεργάτη κ. Α. Στασινάκη για την συνεργασία και την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχαν οποτεδήποτε και αν τους ζητήθηκε.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία βασίστηκε στην εργασία “Outage Performance Study of a Multi-hop AF Relay System Approximated by a Dual-hop Scheme over Rician Fading Wireless Channels”, η οποία παρουσιάστηκε στο διεθνές συνέδριο 8th International Conference on “Experiments/Process/System Modeling/Simulation/Optimization” 8th IC-EPSMSO, Athens, 3-6 July, 2019©LFME

Αθήνα,

Ιούλιος 2019

▪ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετάται η Πιθανότητα Διακοπής ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος πολλαπλών αλμάτων με Amplify-and-Forward (AF) αναμεταδότες και χρήση διαφορικής συνεργασίας, σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rice. Σε μια τέτοια διάταξη, το λαμβανόμενο σήμα σε κάθε κόμβο αναμετάδοσης προκύπτει από τον συνδυασμό των σημάτων που προέρχονται από τον κόμβο της πηγής και τους προηγούμενους κόμβους αναμετάδοσης. Ειδικότερα, αποδεικνύεται η ακριβής μαθηματική σχέση που περιγράφει την Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του αναμενομένου σηματοθορυβικού λόγου ολόκληρου του ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος, δηλαδή, του αναμενομένου σηματοθορυβικού λόγου της απευθείας ζεύξης μεταξύ των κόμβων της πηγής και του προορισμού, αντίστοιχα. Για την απόδειξη αυτή, αξιοποιείται η προσέγγιση ενός τέτοιου συστήματος πολλαπλών αλμάτων με αναμεταδότες από μία ισοδύναμη διάταξη διπλών αλμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα, κάνοντας χρήση των παραπάνω μαθηματικών σχέσεων.

Λέξεις-Κλειδιά: Συστήματα πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες, Διαφορική Συνεργασία, Κανάλια Διαλείψεων Rice, Πιθανότητα Διακοπής

▪ ABSTRACT

In this project, we examine the outage performance of a Multi-hop Amplify-and-Forward (AF) Relay system with cooperative diversity, over Rician fading channels. In this configuration, the received signal in each node results from the combination of the signals coming from the source and the previous relays. Specifically, we derive the exact expression of the Outage Probability as a function of the expected SNR of the whole wireless communication system, i.e. from the source to the destination point, from the assumption that a Multi-hop AF Relay system can be approached by a Dual-hop scheme. Finally, using the obtained results, the corresponding numerical simulations are presented.

Keywords: Multi-hop systems with AF Relays, Cooperative Diversity, Rician Fading Channels, Outage Probability

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

▪ ΠΡΟΛΟΓΟΣ	σελ. 2
▪ ΠΕΡΙΛΗΨΗ	σελ. 3
▪ ABSTRACT	σελ. 4
▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ - ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ	
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΤΕΣ	
1.1) Συστήματα ασύρματων επικοινωνιών	σελ. 7
1.2) Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα - Ραδιοφάσμα	σελ. 9
1.3) Χαρακτηριστικά καναλιών στις ασύρματες επικοινωνίες.....	σελ. 11
1.4) Ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα με χρήση αναμεταδοτών.....	σελ. 16
▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ	
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΦ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΟΤΕΣ ΚΑΙ	
ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ	
2.1) Περιγραφή μελετώμενου συστήματος.....	σελ. 19
2.2) Πιθανότητα Διακοπής.....	σελ.23
▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	σελ. 25
▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΣΥΜΠΕΡΣΜΑΤΑ	σελ. 30
▪ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	σελ. 34
▪ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	σελ. 43

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- Εικόνα 1.1:** Σύστημα Ασύρματης Επικοινωνίας.....σελ. 8
- Εικόνα 1.2:** Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα - τα χρώματα της ίριδας αντιστοιχούν στην περιοχή του ορατού.....σελ. 10
- Εικόνα 1.3:** Λήψη σήματος από κινητό δέκτη σε σύστημα ασύρματων επικοινωνιών, με ταυτόχρονη αξιοποίηση του LOS και των non LOS μηχανισμών.....σελ. 13
- Εικόνα 1.4:** Σύστημα διπλού άλματος με αναμεταδότη.....σελ. 17
- Εικόνα 1.5:** Σύστημα πολλαπλών αλμάτων με αναμεταδότες σε σειρά.....σελ. 18
- Εικόνα 1.6:** Σύστημα πολλαπλών αλμάτων με αναμεταδότες σε παράλληλη διάταξη.....σελ. 18

▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- Εικόνα 2.1:** Ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες και χρήση διαφορικής συνεργασίας.....σελ. 20
- Εικόνα 2.2:** Προσέγγιση ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες και χρήση διαφορικής συνεργασίας από σύστημα διπλών αλμάτων.....σελ. 21

▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- Εικόνα 3.1:** Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του SNR με $\gamma_{th} = 10$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rice με $n = 1$σελ. 27
- Εικόνα 3.2:** Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του SNR με $\gamma_{th} = 20$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rice με $n = 1$σελ. 27
- Εικόνα 3.3:** Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του SNR με $\gamma_{th} = 20$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rayleigh ($n = 0$).....σελ. 28
- Εικόνα 3.4:** Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του SNR με $\gamma_{th} = 20$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rayleigh ($n = 0$).....σελ. 29

▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ - ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΑΝΑΜΕΤΑΛΟΤΕΣ

1.1) Συστήματα ασύρματων επικοινωνιών

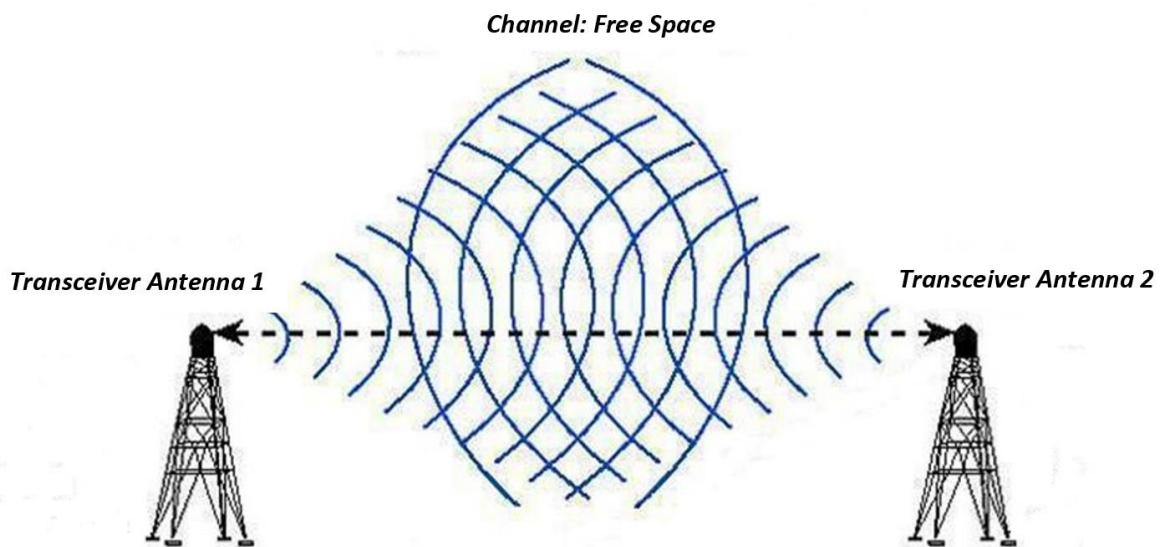
Όπως είναι γνωστό, ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών έχει ως σκοπό να στέλνει δεδομένα (αναλογικά ή ψηφιακά) από κάποια διάταξη που τα δημιουργεί ή τα διαθέτει ήδη, σε έναν ή περισσότερους προορισμούς [1]. Ένα τέτοιο σύστημα, δηλαδή, αποτελείται από τα εξής μέρη. Το πρώτο τμήμα του είναι η πηγή των δεδομένων. Έπειτα ακολουθεί το στάδιο της διαμόρφωσης τους σε κάποιο κατάλληλο σήμα, έτσι ώστε η επόμενη βαθμίδα του συστήματος, που είναι ο πομπός, να μπορεί να αποστείλει το σήμα αυτό μέσω ενός συγκεκριμένου διαύλου, που τον ονομάζουμε κανάλι, στην ακόλουθη βαθμίδα, η οποία είναι ο δέκτης [1]. Αφότου ο δέκτης λάβει το απεσταλμένο σήμα, το οδηγεί προς αποδιαμόρφωση. Αυτή αποτελεί τη διαδικασία με την οποία γίνεται η ανάκτηση των δεδομένων στην αρχική τους μορφή, δηλαδή, στην μορφή την οποία είχαν όταν δημιουργήθηκαν από την πηγή. Τελικά, τα δεδομένα αυτά δέχονται την κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν από την εκάστοτε διάταξη που θα καταλήξουν [1].

Γενικά, υφίστανται διάφορα είδη τηλεπικοινωνιακών συστημάτων σε σχέση με το φυσική υπόσταση της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης, η οποία πρέπει να πραγματοποιηθεί μεταξύ πομπού και δέκτη, προκειμένου το σύστημα να λειτουργήσει (π.χ. ενσύρματη ή ασύρματη, ηλεκτρομαγνητική, ηλεκτρική, ακουστική, οπτική κ.α.) [1]. Μία σημαντικότερη κατηγορία τέτοιων συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις μέρες μας, είναι τα ασύρματα ψηφιακά συστήματα, τα οποία λειτουργούν κατά κύριο λόγο στην περιοχή των ραδιοκυμάτων [1] - [3].

Στο συγκεκριμένο είδος συστημάτων, το ρόλο του πομπού και του δέκτη έχει, αντίστοιχα, κάποια κεραία (π.χ. η κεραία ενός σταθμού βάσης ενός ασύρματου δικτύου, η κεραία λήψης και εκπομπής κάποιας κινητής τερματικής συσκευής κ.α.), το κανάλι είναι η ατμόσφαιρα (ελεύθερος χώρος), ενώ το απεσταλμένο σήμα έχει την μορφή κάποιου είδους ηλεκτρομαγνητικού κύματος (Εικόνα 1.1) [1], [2]. Εν γένει, οι ασύρματες ψηφιακές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται από έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών εφαρμογών, όπως είναι π.χ. η τηλεόραση, τα κυψελωτά δίκτυα της κινητής τηλεφωνίας, τα τοπικά ασύρματα δίκτυα (wireless LANs), οι ασύρματες υπηρεσίες δεδομένων ευρείας περιοχής (wide area wireless data services), τα ασύρματα δίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης (broadband wireless access) κ.α.

[1] - [3]. Αυτό συμβαίνει, γιατί αυτό το είδος συστημάτων συγκεντρώνει πλήθος πλεονεκτημάτων, ορισμένα εκ των οποίων είναι τα εξής [1], [2]:

- Η επίτευξη μεγάλων αποστάσεων διάδοσης χρησιμοποιώντας την ατμόσφαιρα.
- Η δυνατότητα αποστολής και λήψης σήματος σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Αυτές κυμαίνονται από λίγα μέτρα μέχρι και μερικά χιλιόμετρα.
- Η διασύνδεση κινούμενων πομποδεκτών. Συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα κίνησης των πομποδεκτών εντός της περιοχής κάλυψης του ασύρματου δικτύου.
- Η ικανότητα εύκολης αποστολής σήματος σε πολλούς αποδέκτες ταυτόχρονα, οι οποίοι έχουν πρόσβαση στο ασύρματο δίκτυο. Αυτή η υπηρεσία ονομάζεται ευρεία αναμετάδοση (broadcasting).
- Η δυνατότητα σχεδίασης συστημάτων υψηλής απόδοσης με, σχετικά, μικρό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, συγκριτικά με κάποιο ενσύρματο επικοινωνιακό σύστημα, όπου η εγκατάσταση του ενσύρματου καναλιού προϋποθέτει κάποια σημαντική δαπάνη.



Εικόνα 1.1: Σύστημα Ασύρματης Επικοινωνίας
Πηγή: <http://www.zitelc.com.co/nuestros-servicios.html>

Από την άλλη, ωστόσο, οι ασύρματες επικοινωνίες χαρακτηρίζονται και από έναν σημαντικό αριθμό μειονεκτημάτων, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την σχεδίαση ενός τέτοιου τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τα βασικότερα εξ αυτών, είναι τα εξής [1] - [3], [7]:

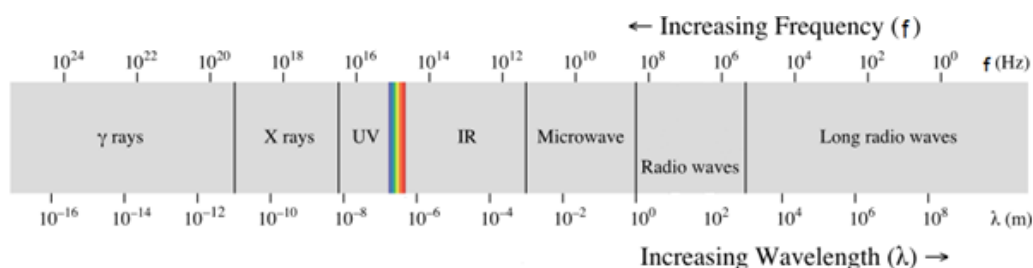
- Οι παρεμβολές ηλεκτρομαγνητικής, διακαναλικής ή διασυμβολικής φύσεως, που οδηγούν σε σημαντική επιδείνωση των επιδόσεων της ασύρματης ζεύξης.
- Τα φαινόμενα διαλείψεων, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την σημαντική εξασθένηση της λαμβανόμενης ισχύος από τον δέκτη και τα οποία προκύπτουν από μεταβολές στην κατάσταση της ατμόσφαιρας (η οποία αποτελεί το κανάλι του τηλεπικοινωνιακού συστήματος) ή λόγω φαινομένων σκίασης και πολυόδευσης του αρχικά απεσταλμένου σήματος. Το φαινόμενο των διαλείψεων παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 1.3.
- Η απαιτούμενη λήψη άδειας για την χρήση συγκεκριμένων περιοχών του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει για να αποφεύγονται φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών χρηστών, που χρησιμοποιούν τις ίδιες ή κοντινές συχνότητες και κατ' επέκταση να εξασφαλίζεται η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών επικοινωνίας. Από την άλλη, βέβαια, αυτό είναι κάτι που συνεπάγεται κάποιο σημαντικό επιπρόσθετο οικονομικό κόστος.
- Ζητήματα ασφαλείας, τα οποία προκύπτουν από το γεγονός ότι σε κάποιο ασύρματο δίκτυο μπορεί να έχει πρόσβαση οποιοσδήποτε βρίσκεται εντός της περιοχής που αυτό καλύπτει. Λόγω αυτού, είναι πιθανό τα δεδομένα που αποστέλλονται είτε να υποκλέπτονται, είτε να παρεμποδίζονται να φτάσουν στον προορισμό τους από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου κινδύνου, απαιτείται η χρήση κατάλληλων τεχνικών κρυπτογράφησης των μεταδιδόμενων σημάτων.

1.2) Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα - Ραδιοφάσμα

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αποτελούν τον κύριο φυσικό μηχανισμό στον οποίο στηρίζονται οι ασύρματες επικοινωνίες, γεγονός το οποίο καθιστά την μελέτη τους εξαιρετικά σημαντική [1], [2]. Για τον λόγο αυτό, η κατηγοριοποίηση τους σε συγκεκριμένες ηλεκτρομαγνητικές ζώνες, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Γενικά, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατατάσσονται σε ζώνες είτε σύμφωνα με τη συχνότητα τους f , η οποία ουσιαστικά αποτελεί την ταυτότητα κάθε ηλεκτρομαγνητικής συνιστώσας και είναι αναλλοίωτο μέγεθος σε οποιοδήποτε μέσο και αν λαμβάνει χώρα η διάδοση, είτε ισοδυνάμως, σύμφωνα με το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου λ , το οποίο αποτελεί μέγεθος που είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας [4] - [6]. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι το γεγονός ότι το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου και η συχνότητα

συνδέονται με την σχέση $c = \lambda \cdot f$, όπου η σταθερά $c = 3 \cdot 10^8$ m/sec είναι η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό [4] - [6].

Βάσει της προαναφερθείσας κατηγοριοποίησης, λοιπόν, προκύπτει το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, το οποίο συνίσταται από το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα [1], [4] - [6]. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Με βάση κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, αυτό τελικά χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες (Εικόνα 1.2). Αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία, η ορατή ακτινοβολία (φως), η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ κατά αύξουσα διάταξη ως προς την συχνότητα ή κατά φθίνουσα ως προς το μήκος κύματος [1], [4] - [6].



Εικόνα 1.2: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα - τα χρώματα της ίριδας αντιστοιχούν στην περιοχή του ορατού

Πηγή:

[https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Introductory_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Introductory_Chemistry_\(Tro\)/09%3A_Electrons_in_Atoms_and_the_Periodic_Table/9.3%3A_The_Electromagnetic_Spectrum](https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Introductory_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Introductory_Chemistry_(Tro)/09%3A_Electrons_in_Atoms_and_the_Periodic_Table/9.3%3A_The_Electromagnetic_Spectrum)

Τα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών που εξετάζουμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, κάνουν κατά κύριο λόγο χρήση του ραδιοφάσματος, καθώς και μιας μικρής περιοχής στην αρχή των μικροκυμάτων, χωρίς ωστόσο να είναι καθορισμένα με ακρίβεια τα όρια της περιοχής όπου τελειώνουν τα ραδιοκύματα και αρχίζουν τα μικροκύματα [1], [2], [4] - [6]. Πιο συγκεκριμένα, η αντιστοιχία των περιοχών συχνοτήτων που χρησιμοποιούν τα ασύρματα ηλεκτρομαγνητικά κανάλια και των σχετικών εφαρμογών είναι η εξής [1], [2], [5]:

- 30 - 300 KHz (Very Low Frequency/VLF - Low Frequency/LF): Ραδιοναυσιπλοΐα, Αεροναυσιπλοΐα.
- 0.3 - 3 MHz (Low Frequency/LF - Medium Frequency/MF): Ραδιοφωνία (AM - FM).

- 3 - 300 MHz (Medium Frequency/MF - High Frequency/HF - Very High Frequency/VHF): Ραδιοφωνία, Τηλεόραση.
- 0.3 - 3 GHz (Very High Frequency/VHF - Ultra High Frequency/UHF): Τηλεόραση, Κινητή Τηλεφωνία.
- 3 - 300 GHz (Ultra High Frequency/UHF - Super High Frequency/SHF - Extremely High Frequency/EHF): Κινητή τηλεφωνία, Ραντάρ.

1.3) Χαρακτηριστικά καναλιών στις ασύρματες επικοινωνίες

Η απόδοση των συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε ασύρματου καναλιού, τα οποία είναι μεταβαλλόμενα με την πάροδο του χρόνου [1] - [3], [7]. Ειδικότερα, το μεταδιδόμενο σήμα από τον πομπό στο δέκτη είναι πιθανό να επηρεαστεί από διάφορα φαινόμενα, τα οποία τελικά προκαλούν την διάλειψη του λαμβανόμενου σήματος από τον δέκτη, δηλαδή την τυχαία διακύμανση της ισχύος και της φάσης του [1] - [3], [7].

Εν γένει, η διακύμανση της φάσης του λαμβανόμενου σήματος λόγω διαλείψεων, αφορά στις περιπτώσεις όπου έχουμε σύμφωνη αποδιαμόρφωση [7]. Αν γίνεται χρήση κάποιας τεχνικής ασύμφωνης αποδιαμορφωσης, τότε δεν μας απασχολεί οποιαδήποτε διακύμανση στην φάση του λαμβανόμενου σήματος, καθώς αυτή δεν επηρεάζει την απόδοση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος [7]. Ωστόσο, πολλές φορές για λόγους απλοποίησης στην προσέγγιση ενός συστήματος, υποτίθεται πως υπάρχει πλήρης ανάκτηση της φάσης του λαμβανόμενου σήματος από τον δέκτη, παρά τα όποια φαινόμενα διαλείψεων [7]. Επιτυγχάνεται, δηλαδή, η λεγόμενη ιδανική σύμφωνη αποδιαμόρφωση [7]. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα λαμβάνονται υπόψη μονάχα διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος από τον δέκτη λόγω διαλείψεων, δηλαδή, θα θεωρείται πως γίνεται χρήση τεχνικών ασύμφωνης ή ιδανικής σύμφωνης απόδιαμόρφωσης.

Γενικά, σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα, το σήμα από κάποιον σταθερό ή κινητό πομπό καταλήγει σε κάποιον σταθερό ή κινητό δέκτη (γενικά, μια διάταξη είναι πιθανό να έχει ταυτόχρονα το ρόλο και του πομπού και του δέκτη, οπότε χαρακτηρίζεται ως πομποδέκτης), είτε με απευθείας οπτική επαφή (Line Of Sight - LOS), είτε με κάποιον εκ των μηχανισμών ανάκλασης/διάχυσης, διάθλασης και περίθλασης, οι οποίοι δεν απαιτούν άμεση οπτική επαφή (non LOS). Δηλαδή, όλοι οι μηχανισμοί αυτοί επιδρούν ταυτόχρονα στο λαμβανόμενο σήμα, ο καθένας τους με διαφορετικό τρόπο (Εικόνα 1.3) [7].

Με τον τρόπο αυτό, λοιπόν, κατά την αποστολή του σήματος στον δέκτη παρουσιάζονται ορισμένα φαινόμενα, τα οποία οδηγούν σε σημαντικό περιορισμό της λαμβανόμενης από αυτόν ισχύος και τελικά δυσχεραίνουν την αναγνώριση από αυτόν του απεσταλμένου σήματος [2], [7]. Τα φαινόμενα αυτά είναι τα εξής [2], [7]:

- Οι απώλειες ισχύος λόγω διαδρομής, οι οποίες οφείλονται στην εξασθένηση του εκπεμπόμενου σήματος, καθώς αυτό απομακρύνεται από τον πομπό. Συγκεκριμένα, για κάποια ασύρματη ζεύξη μεταξύ δύο κεραιών, η οποία υποθέτουμε πως λαμβάνει χώρα στον ελεύθερο χώρο, δηλαδή το απόλυτο κενό (κάτι που αποτελεί ιδανική προσέγγιση), η λαμβανόμενη ισχύς από την κεραία λήψης P_R δίνεται από την παρακάτω σχέση, η οποία είναι γνωστή και ως ο Νόμος του Friis:

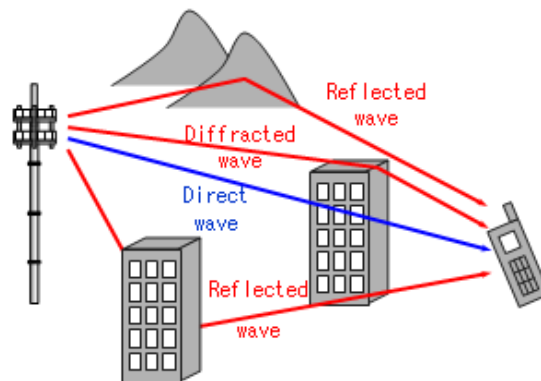
$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (1.1)$$

όπου, P_T είναι η μεταδιδόμενη ισχύς από την κεραία εκπομπής, λ είναι το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου του μεταδιδόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος, d η απόσταση της ασύρματης ζεύξης, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των κεραιών αποστολής και λήψης, ενώ G_T και G_R είναι τα κέρδη των αντίστοιχων κεραιών, δηλαδή, αυτής του πομπού και του δέκτη, αντίστοιχα. Το κέρδος μιας κεραίας, το οποίο ονομάζεται και κατευθυντικότητα, σχετίζεται, εν γένει, με την δυνατότητα που αυτή έχει να εκπέμπει ή να λαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολούμενης ισχύος προς ή από κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση, αντίστοιχα. Ειδικότερα, καθώς το κέρδος μια κεραίας εκπομπής αυξάνει, τόσο μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης ισχύος προσανατολίζεται προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση και αντίστοιχα, για μια κεραία λήψης, η αύξηση του κέρδους της ισοδυναμεί με την αποτελεσματικότερη λήψη ηλεκτρομαγνητικής ισχύος από κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αντιθέτως, αν το κέρδος μιας κεραίας εκπομπής ελαχιστοποιείται, μέχρις ότου να γίνει τελικά ίσο με 1 (περίπτωση που είναι ιδανική, δηλαδή, δεν μπορεί να υπάρξει μια τέτοια κεραία στην πραγματικότητα), τόσο περισσότερο προσεγγίζει την ισοτροπική πηγή εκπομπής, δηλαδή, ακτινοβολεί την ηλεκτρομαγνητική ισχύ προς μετάδοση με ακριβώς τον ίδιο τρόπο προς κάθε κατεύθυνση. Όμοια, κάποια κεραία λήψης με κέρδος ίσο με 1, δεν εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά ως προς τις διάφορες κατευθύνσεις, όταν συλλέγει την μεταδιδόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύ.

- Η απορρόφηση από την ατμόσφαιρα, η κατάσταση της οποίας χαρακτηρίζεται συνήθως από έντονες μεταβολές. Γενικά, για συχνότητες μικρότερες από 3 GHz τα

αέρια της ατμόσφαιρα δεν προκαλούν καταστροφική απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος των μεταδιδόμενων σημάτων. Όμως, για μεγαλύτερες συχνότητες από 3 GHz, η εξασθένηση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που προκαλείται από το οξυγόνο και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας, καθώς και τα φαινόμενα σκέδασης και απορρόφησης από την βροχή, το χαλάζι και την ομίχλη είναι ιδιαίτερος σημαντικά.

- Η σκίαση, δηλαδή, η παρεμβολή αδιαφανών εμποδίων μεταξύ πομπού και δέκτη, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις, καθιστούν πρακτικά αδύνατη την λήψη του σήματος από τον δέκτη, ακόμη και με κάποιον non LOS μηχανισμό.
- Και οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (πολυόδευση), που έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση καταστρεπτικής συμβολής.



Εικόνα 1.3: Λήψη σήματος από κινητό δέκτη σε σύστημα ασύρματων επικοινωνιών, με ταυτόχρονη αξιοποίηση του LOS και των non LOS μηχανισμών

Πηγή: http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_Fading.html

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, λόγω της πολυόδευσης, ενδέχεται να παρατηρηθούν και φαινόμενα ενισχυτικής συμβολής, ωστόσο, δεν δίνεται ιδιαίτερη σημασία σε αυτά, μιας και δεν επηρεάζουν πρακτικά την λειτουργία του εκάστοτε τηλεπικοινωνιακού συστήματος [5], [7]. Από την άλλη, η εμφάνιση της καταστρεπτικής συμβολής είναι αυτή που μας απασχολεί, γιατί σε μία τέτοια περίπτωση, καθίσταται πρακτικά αδύνατη η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη [2], [5], [7]. Δηλαδή, οι διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος από τον δέκτη λόγω διαλείψεων, μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική επιδείνωση της απόδοσης του ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος που μελετάται, αφού το επίπεδο του σηματοθορυβικού λόγου (Signal to Noise Ratio - SNR) στον δέκτη ενδέχεται να βρεθεί σε ιδιαίτερος χαμηλά επίπεδα [1] - [3], [7].

Γενικά, οι διαλείψεις σήματος που επηρεάζουν έναν δέκτη, μπορούν να είναι είτε μικρής χρονικής κλίμακας, είτε μεγάλης χρονικής κλίμακας [7]. Οι μικρής κλίμακας διαλείψεις προέρχονται από το άμεσο περιβάλλον του δέκτη, συνεπώς αρκούν μικρές μεταβολές της

θέσης του, για να προκληθούν απότομες μεταβολές της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος από αυτόν [3].

Αντίθετα, οι μεγάλης χρονικής διάρκειας διαλείψεις, οι οποίες έχουν μόνιμο χαρακτήρα, οφείλονται στο μακροσκοπικό περιβάλλον του δέκτη [7]. Για παράδειγμα, ορισμένοι παράγοντες που σχετίζονται με το περιβάλλον αυτό και πρέπει να ληφθούν υπόψη σε ένα δίκτυο ασύρματων επικοινωνιών, είναι το ύψος των κεραιών των σταθμών βάσης από το έδαφος, η ύπαρξη ή όχι απευθείας οπτικής επαφής (LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη και τα χαρακτηριστικά του γεωγραφικού ανάγλυφου της εκάστοτε περιοχής (π.χ. αν βρισκόμαστε σε στεριά ή θάλασσα, σε αστικό περιβάλλον ή όχι, αν υπάρχουν υψώματα και γενικότερα, πάσης φύσεως εμπόδια, όπως κτήρια, δέντρα κ.α.) [7].

Επειδή, όμως, καθίσταται πρακτικά αδύνατος ο ακριβής προσδιορισμός όλων των παραμέτρων χαρακτηρίζουν το περιβάλλον ενός δέκτη, κυρίως σε μικροσκοπικό επίπεδο, η λαμβανόμενη από αυτόν ισχύς είναι σύνηθες να προσεγγίζεται ως στοχαστικό μέγεθος, δηλαδή, ως κάποια τυχαία μεταβλητή, η οποία ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη κατανομή [7].

Συνεπώς, η μελέτη και η προσέγγιση των φαινομένων των διαλείψεων επιτυγχάνεται με την χρήση κατάλληλων στατιστικών μοντέλων, τα οποία εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος όπου λαμβάνει χώρα η μετάδοση των σημάτων και τα οποία περιγράφουν την διακύμανση της λαμβανόμενης ισχύος από τον δέκτη ή, αντίστοιχα, του σηματοθορυβικού λόγου στον δέκτη [7]. Ειδικότερα, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τέτοιων μοντέλων, καθένα εκ των οποίων περιγράφει, αντίστοιχα, φαινόμενα διαλείψεων λόγω πολυόδευσης, σκίασης ή και συνδυασμού τους [7].

Πιο συγκεκριμένα, οι διαλείψεις λόγω πολυόδευσης προκαλούνται από την καταστρεπτική και ενισχυτική συμβολή τυχαία καθυστερημένων, σκεδαζόμενων, ανακλώμενων ή περιθλώμενων συνιστωσών του απεσταλμένου σήματος [7]. Τα πιο χαρακτηριστικά μοντέλα κατανομών που περιγράφουν αυτού του είδους των διαλείψεων είναι τα εξής [7], [8]:

- Κατανομή Rayleigh: Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την περιγραφή φαινομένων διαλείψεων λόγω πολυόδευσης, χωρίς την ύπαρξη κάποιας συνιστώσας από τον πομπό στον δέκτη η οποία να προέρχεται από άμεση οπτική επαφή. Η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του σηματοθορυβικού λόγου στην περίπτωση αυτή είναι:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right) \quad (1.2)$$

όπου, $\gamma \geq 0$ είναι η στιγμιαία τιμή του σηματοθορυβικού λόγου και $\bar{\gamma}$ η μέση τιμή του γ .

- Κατανομή Rice: Η συγκεκριμένη κατανομή χρησιμοποιείται για την περιγραφή φαινομένων διαλείψεων λόγω πολυόδευσης, όταν υπάρχει μία ισχυρή συνιστώσα του σήματος στον δέκτη, η οποία να προέρχεται από άμεση οπτική επαφή ή κάποια ισχυρή ανάκλαση και επιπλέον, υπάρχουν πολλές τυχαίες ασθενέστερες συνιστώσες. Για το μοντέλο αυτό, η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του σηματοθορυβικού λόγου είναι:

$$f_{\bar{\gamma}}(\gamma) = \frac{(1+n^2)e^{-n^2}}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{(1+n^2)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) I_0\left(2n\left(-\frac{(1+n^2)\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^{1/2}\right) \quad (1.3)$$

όπου, όμοια με προηγουμένως, $\gamma \geq 0$ είναι η στιγμιαία τιμή του σηματοθορυβικού λόγου, $\bar{\gamma}$ η μέση τιμή του γ και n η παράμετρος διαλείψεων της συγκεκριμένης κατανομής. Ισχύει ότι $n \in [0, \infty)$, ενώ αν $n = 0$, η κατανομή Rice ταυτίζεται με την Rayleigh.

- Κατανομή Nakagmi- m : Η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται για να περιγράψει μοντέλα διάδοσης για κινητές επικοινωνίες σε επίγεια περιβάλλοντα ή εσωτερικούς χώρους, καθώς και σε ιονοσφαιρικές ραδιοζεύξεις. Η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του σηματοθορυβικού λόγου εδώ είναι :

$$f_{\bar{\gamma}}(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\bar{\gamma}^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (1.4)$$

όπου, όμοια με προηγουμένως, $\gamma \geq 0$ είναι η στιγμιαία τιμή του σηματοθορυβικού λόγου, $\bar{\gamma}$ η μέση τιμή του γ και m η παράμετρος διαλείψεων της κατανομής αυτής. Ισχύει ότι $m \in [0.5, \infty)$. Οπότε, π.χ. εάν $m = 1$, η κατανομή ταυτίζεται με την Rayleigh.

Από την άλλη, ένα από τα πιο διαδεδομένα στατιστικά μοντέλα περιγραφής των διαλείψεων λόγω σκίασης, που προέρχονται κυρίως από την παρουσία κτιρίων, δέντρων και ανωμαλιών του εδάφους, είναι αυτό της Λογαριθμο-κανονικής κατανομής (Log-normal distribution) [7]. Σύμφωνα με αυτό, η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του σηματοθορυβικού λόγου είναι:

$$f_{\bar{\gamma}}(\gamma) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\sigma\gamma}} \exp\left(-\frac{(10\log_{10}(\gamma - \mu))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.5)$$

όπου $\xi = 10/\ln(10)$, μ (σε dB) η μέση τιμή του $10\log_{10}(\gamma)$ και σ (σε dB) η τυπική απόκλιση του $10\log_{10}(\gamma)$, αντίστοιχα.

1.4) Ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα με χρήση αναμεταδοτών

Ένα ασύρματο δίκτυο με αναμεταδότες, είναι ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται ένα πλήθος αναμεταδοτών μεταξύ του αρχικού πομπού (πηγαίος κόμβος ή πηγή) και του τελικού δέκτη (κόμβος προορισμού) [9] - [14]. Ειδικότερα, η απόδοση ενός συμβατικού συστήματος, στο οποίο δεν υπάρχει κανένας ενδιάμεσος κόμβος αναμετάδοσης μεταξύ του πηγής και του προορισμού, ενδέχεται να μετριαστεί, εάν η απόσταση της ασύρματης ζεύξης είναι αρκετά μεγάλη [9]. Αντιθέτως, σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο στο οποίο γίνεται χρήση αναμεταδοτών, το μήκος των ενδιάμεσων ασύρματων ζεύξεων περιορίζεται σημαντικά και η μεταδιδόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς αξιοποιείται πιο αποτελεσματικά [9], [11]. Από τα χαρακτηριστικά αυτά των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με αναμεταδότες, απορρέει τελικά ένας μεγάλος αριθμός πλεονεκτημάτων, σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι η αύξηση της χωρητικότητας του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, οι χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις και η διεύρυνση της περιοχής κάλυψης του δικτύου [9], [11].

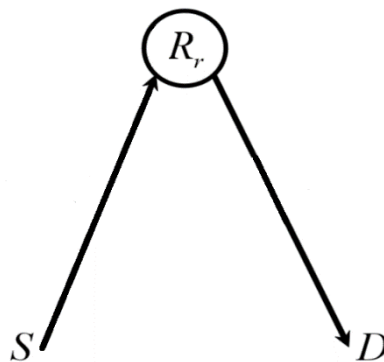
Εν γένει, οι αναμεταδότες κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην μία ανήκουν αυτοί οι οποίοι αποκωδικοποιούν το λαμβανόμενο σήμα και στην συνέχεια το κωδικοποιούν εκ νέου, προκειμένου να το προωθήσουν στον επόμενο κόμβο του ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος (Decode and Forward - DF), ενώ στην άλλη ανήκουν οι αναμεταδότες οι οποίοι μονάχα ενισχύουν το λαμβανόμενο σήμα, προτού το προωθήσουν στον επόμενο κόμβο (Amplify and Forward - AF) [9], [15]. Οι AF κόμβοι απαιτούν χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και απλούστερο σχεδιασμό του σχετικού ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος, ωστόσο, έχουν το μειονέκτημα ότι μαζί με το σήμα πληροφορίας, ενισχύουν και τον θόρυβο που λαμβάνουν [9], [15]. Από την άλλη, οι DF κόμβοι λειτουργούν πιο αξιόπιστα, καθώς διορθώνουν τα λάθη και τις παραμορφώσεις του λαμβανόμενου σήματος προτού το εκπέμψουν εκ νέου. Βέβαια, είναι πιο δαπανηροί, εν γένει και απαιτούν πιο πολύπλοκο σχεδιασμό του ασύρματου δικτύου στο οποίο θα χρησιμοποιηθούν.

Η απλούστερη δομή που μπορεί να υπάρξει για ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα με αναμεταδότες, είναι αυτή όπου μεταξύ του κόμβου της πηγής και του κόμβου προορισμού

υπάρχει μονάχα ένας αναμεταδότης [11]. Ένα τέτοιο σύστημα, ονομάζεται ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα διπλού άλματος με αναμεταδότη (Dual-hop Relay system) και παριστάνεται στην Εικόνα 1.4 [11]. Ωστόσο, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν παραπάνω από ένας αναμεταδότες σε ένα τέτοιο σύστημα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, αυτό χαρακτηρίζεται ως σύστημα πολλαπλών αλμάτων με αναμεταδότες (Multi-hop Relay system) [10] - [14].

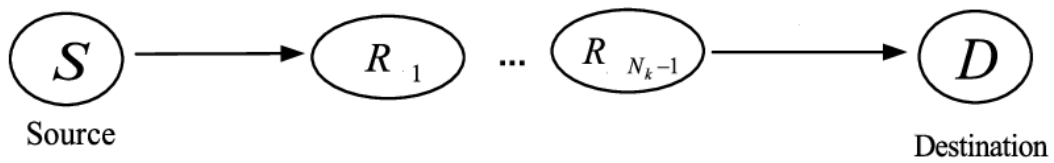
Στην περίπτωση όπου σε ένα τέτοιο σύστημα, ένας κόμβος λαμβάνει το σήμα μονάχα από τον προηγούμενο κόμβο (ξεκινώντας από την πηγή) και το αποστέλλει μονάχα στον επόμενο (καταλήγοντας στον κόμβο προορισμού), η διάταξη των αναμεταδοτών λέμε πως είναι σε σειρά (Εικόνα 1.5) [16]. Αντίθετα, εάν μεταξύ της πηγής και του προορισμού υπάρχει ένα πλήθος μονοπατιών διπλού άλματος, δηλαδή, υπάρχουν διαφορετικά μονοπάτια που συνδέουν την πηγή με τον δέκτη μέσω ακριβώς ενός αναμεταδότη το καθένα, ο οποίος λαμβάνει το σήμα που αποστέλλεται από την πηγή και το μεταδίδει στον προορισμό, οι αναμεταδότες λέμε πως βρίσκονται σε παράλληλη διάταξη (Εικόνα 1.6) [16].

Τέλος, σε κάποιο δίκτυο πολλαπλών αλμάτων, λέμε πως υπάρχει διαφορετική συνεργασία (cooperative diversity) μεταξύ των κόμβων του ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος, εάν το σήμα στον δέκτη κάθε ενδιαμέσου κόμβου αναμετάδοσης προκύπτει από τον συνδυασμό των σημάτων που έχουν αποσταλεί από κάθε προηγούμενο κόμβο αναμετάδοσης και την πηγή [9] - [11], [15].

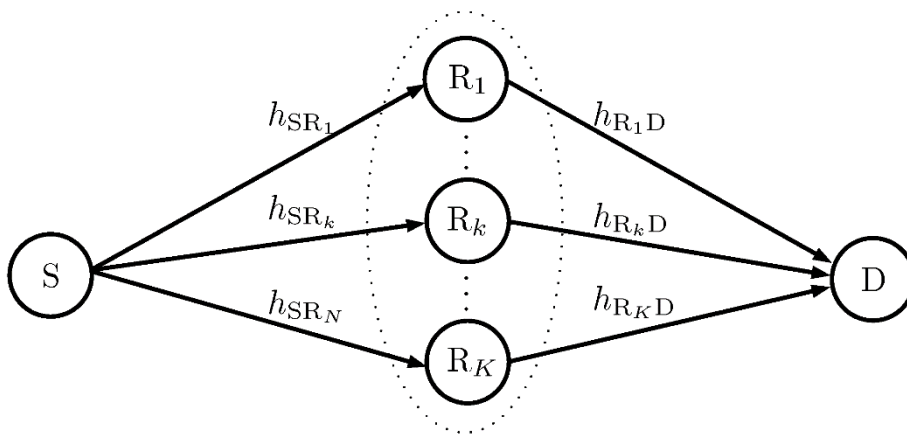


Εικόνα 1.4: Σύστημα διπλού άλματος με αναμεταδότη

Πηγή: L. Sungmook, K. Kyunbyoung, “Approximation of Multi-hop Relay to Dual-hop Relay and its Error Performance Analysis”, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 21, NO. 2, FEBRUARY 2017



Εικόνα 1.5: Σύστημα πολλαπλών αλμάτων με αναμεταδότες σε σειρά
 Πηγή: In-Ho Lee, Haejoon Jung, “Energy-Efficient Path Selection Using SNR Correlation for Wireless Multi-Hop Cooperative Communications”, *Energies* 11(11):3004, November 2018



Εικόνα 1.6: Σύστημα πολλαπλών άλματος με αναμεταδότες σε παράλληλη διάταξη
 Πηγή: Nhu Tri Do, Vo Nguyen Quoc Bao and Beongku An, “Outage Performance Analysis of Relay Selection Schemes in Wireless Energy Harvesting Cooperative Networks over Non-Identical Rayleigh Fading Channels”, *Sensors* 16(3):295 · February 2016

▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕ AF ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΤΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1) Περιγραφή μελετώμενου συστήματος

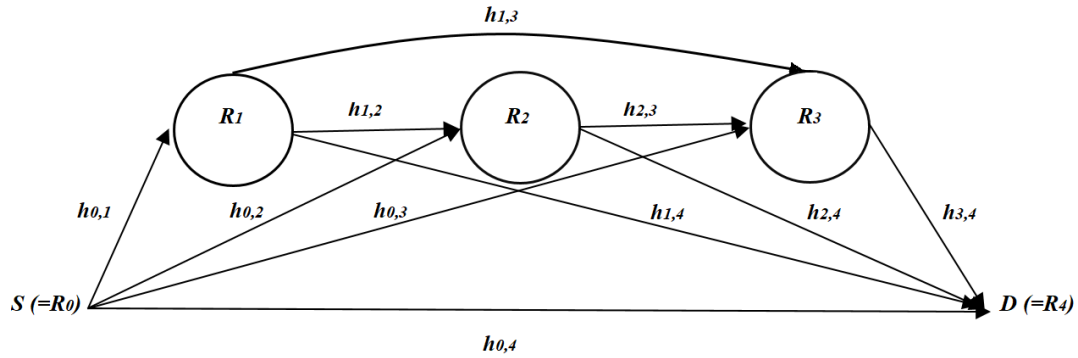
Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες και χρήση διαφορικής συνεργασίας και πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστεί η πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης μεταξύ των κόμβων της πηγής και του δέκτη αντίστοιχα, υποθέτοντας πως τα ασύρματα κανάλια μεταξύ των διάφορων κόμβων του συστήματος, είναι κανάλια διαλείψεων τα οποία ακολουθούν την κατανομή Rice.

Ειδικότερα, μεταξύ του κόμβου της πηγής και του κόμβου προορισμού, υπάρχει ένα συνολικό πλήθος K αναμεταδοτών (K θετικός ακέραιος), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1 (όπου $K = 3$). Ο συμβολισμός R_r αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο κόμβο αναμετάδοσης για $r = 1, 2, \dots, K$, ο R_0 αντιστοιχεί στον κόμβο της πηγής και ο R_{K+1} στον κόμβο προορισμού. Το κέρδος του καναλιού $h_{i,j}$ μεταξύ του πομπού του i -οστού κόμβου ($i = 0, 1, \dots, K-1, K$) και του δέκτη του j -οστού κόμβου ($j = 1, 2, \dots, K, K+1$) θεωρείται πως είναι κανάλι διαλείψεων που ακολουθεί την κατανομή Rice για κάθε i, j και $i < j$ [7], [8]. Συνεπώς, ο στιγμιαίος σηματοθορυβικός λόγος $\gamma_{i,j}$ που λαμβάνεται από τον j -οστό κόμβο ακολουθεί επίσης την κατανομή Rice [7], [8]. Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function - PDF) του $\gamma_{i,j}$ θα είναι [7], [8]:

$$f_{\bar{\gamma}_{i,j}}(\gamma) = \frac{(1+n^2)e^{-n^2}}{\bar{\gamma}_{i,j}} \exp\left(-\frac{(1+n^2)\gamma_{i,j}}{\bar{\gamma}_{i,j}}\right) I_0\left(2n\sqrt{\frac{(1+n^2)\gamma_{i,j}}{\bar{\gamma}_{i,j}}}\right) \quad (2.1)$$

όπου $I_0(x)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης, n είναι η παράμετρος διαλείψεων του μοντέλου Rice και η οποία παίρνει μη αρνητικές τιμές, δηλαδή $n \in [0, \infty)$, $\bar{\gamma}_{i,j} = E[\gamma_{i,j}] = E[|h_{i,j}|^2] E_i/\sigma^2$ η μέση τιμή του $\gamma_{i,j}$, E_i η μέση μεταδιδόμενη ενέργεια από τον i -οστό κόμβο και σ^2 η διακύμανση του πρόσθετου λευκού Γκαουσιανού θορύβου (White Additive Gaussian Noise - AWGN) [2], [7], [10] - [12].

Όπως περιεγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η κατανομή Rice χρησιμοποιείται για να περιγράψει μοντέλα διάδοσης στα οποία μία ισχυρή συνιστώσα του αρχικά εκπεμπόμενου σήματος καταλήγει στον δέκτη, μαζί με ένα πλήθος και άλλων ασθενέστερων συνιστωσών.



Εικόνα 2.1: Ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες και χρήση διαφορικής συνεργασίας

Για την συγκεκριμένη διάταξη, υποθέτουμε πως το πεδίο του χρόνου είναι διαιρεμένο σε $K+1$ χρονικές θυρίδες (time slots) [10] - [12]. Σε καθεμιά από αυτές τις χρονικές θυρίδες, ένας συγκεκριμένος κόμβος εκπέμπει το σήμα του σε κάθε επόμενο κόμβο με ορθογώνιο τρόπο, έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα παρεμβολών [10] - [12]. Πιο συγκεκριμένα, η μετάδοση των σημάτων που προέρχονται από την πηγή και πρέπει να φτάσουν στον προορισμό, πραγματοποιείται σε συνολικά $K+1$ βήματα. Για παράδειγμα, κατά την διάρκεια της «0-στής» χρονικής θυρίδας, ο κόμβος της πηγής R_0 μεταδίδει το σήμα του σε όλους τους επόμενους κόμβους αναμετάδοσης R_1, R_2, \dots, R_K και στον κόμβο προορισμού R_{K+1} [11], [12]. Εν γένει, κατά την διάρκεια του l -οστής χρονικής θυρίδας ($l = 0, 1, 2, \dots, K$), ο κόμβος R_l μεταδίδει το σήμα του σε όλους τους κόμβους αναμετάδοσης από τον R_{l+1} ως τον R_K και στον κόμβο προορισμού R_{K+1} [11], [12]. Επιπλέον, ο R_l κόμβος αναμετάδοσης (για $l > 0$) έχει ήδη λάβει τα απεσταλμένα σήματα από τους προηγούμενους $l-1$ κόμβους και την πηγή [11], [12]. Τα σήματα αυτά μεταδόθηκαν κατά την διάρκεια των προηγούμενων l χρονικών θυρίδων, αντίστοιχα και επίσης, ο δέκτης του συγκεκριμένου κόμβου τα συνδύασε, κάνοντας χρήση της τεχνικής Maximum Combining Ratio (MRC). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, ο τελικός σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη του R_l κόμβου προκύπτει από την άθροιση με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας όλων των λαμβανόμενων σηματοθορυβικών λόγων [7], [11], [12]. Ωστόσο, ο δέκτης του κόμβου προορισμού R_{K+1} υποθέτουμε πως χρησιμοποιεί την τεχνική Selection Combining (SC) [7]. Σύμφωνα με αυτήν, ο δέκτης του κόμβου προορισμού συγκρίνει τους λαμβανόμενους σηματοθορυβικούς λόγους από κάθε κόμβο αναμετάδοσης και

την πηγή και τελικά επιλέγει τον υψηλότερο [7]. Ως εκ τούτου, ο τελικός λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος στον προορισμό μπορεί να εκφραστεί ως εξής [7], [11], [12]:

$$\max \left\{ \gamma_{0,K+1}, \frac{A_1 \gamma_{1,K+1}}{A_1 + \gamma_{1,K+1} + 1}, \frac{A_2 \gamma_{2,K+1}}{A_2 + \gamma_{2,K+1} + 1}, \dots, \frac{A_K \gamma_{K,K+1}}{A_K + \gamma_{K,K+1} + 1} \right\} \quad (2.2)$$

όπου $A_1 = \gamma_{0,1}$ και $A_r = \gamma_{0,r} + \sum_{m=1}^{r-1} \frac{A_m \gamma_{m,r}}{A_m + \gamma_{m,r} + 1}$ για $r = 1, 2, \dots, K$, είναι ο σηματοθορυβικός λόγος

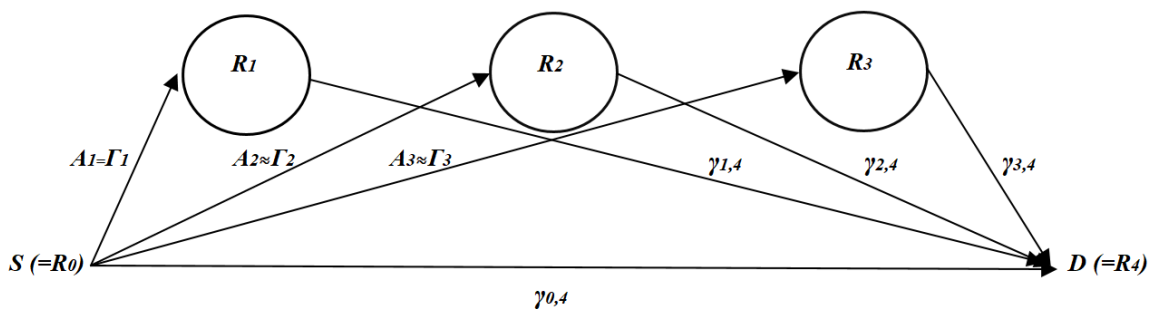
που φτάνει στον r -οστό κόμβο αναμετάδοσης από την πηγή και τους προηγούμενους κόμβους αναμετάδοσης και $\frac{A_r \gamma_{r,K+1}}{A_r + \gamma_{r,K+1} + 1}$ είναι ο σηματοθορυβικός λόγος που φτάνει στον κόμβο

προορισμού από τον r -οστό κόμβο αναμετάδοσης ($r = 1, 2, \dots, K$). Επιπλέον, μπορούμε να υποθέσουμε χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι οι όροι της σχέσης (2) είναι μεταξύ τους ανεξάρτητοι [11].

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες, όπως αυτό που περιεγράφηκε προηγουμένως και απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1, μπορεί να προσεγγισθεί από ένα αντίστοιχο σύστημα διπλών αλμάτων με αναμεταδότες, όπως συμβαίνει στις εργασίες [11], [12] και το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2. Στην περίπτωση αυτή ο σηματοθορυβικός λόγος τον οποίο λαμβάνει ο δέκτης κάθε κόμβου αναμετάδοσης, θα είναι [11], [12]:

$$A_r \approx \Gamma_r = \min\{\Gamma_{r-1}, \gamma_{r-1,r}\} + \gamma_{0,r}, \quad r = 1, 2, \dots, K \quad (2.3)$$

με $\Gamma_1 = A_1 = \gamma_{0,1}$.



Εικόνα 2.2: Προσέγγιση ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες και χρήση διαφορικής συνεργασίας από σύστημα διπλών αλμάτων

Τότε, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του Γ_r θα είναι [11], [12]:

$$f_{\bar{\Gamma}_r}(\gamma) = \sum_{p=1}^r \pi_{r,p} f_{\bar{\Gamma}_{r,p}}(\gamma) \quad (2.4)$$

όπου $\bar{\Gamma}_{r,p}|_{p=1}^{r-1} = \frac{\bar{\Gamma}_{r-1,p} \bar{\gamma}_{r-1,p}}{\bar{\Gamma}_{r-1,p} + \gamma_{r-1,p}}$, $\bar{\Gamma}_{r,r} = \bar{\gamma}_{0,r}$, $\pi_{r,p}|_{p=1}^{r-1} = \pi_{r-1,p} \frac{\bar{\Gamma}_{r,p}}{\bar{\Gamma}_{r,p} - \bar{\Gamma}_{r,r}}$, $\pi_{r,r} = \sum_{p=1}^{r-1} \pi_{r-1,p} \frac{\bar{\Gamma}_{r,r}}{\bar{\Gamma}_{r,r} - \bar{\Gamma}_{r,p}}$, $\pi_{1,r} = 1$ και $f_{\bar{\Gamma}_{r,p}}(\gamma)$ είναι η πυκνότητα κατανομής πιθανότητας του $\bar{\Gamma}_{r,p}$, η οποία δίνεται από την (1). Για παράδειγμα, αν $r = 1$, δεν υπάρχει καμία προσέγγιση, καθώς $\Gamma_1 = A_1 = \gamma_{0,1}$ [11].

Συνεπώς, ο τελικός λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος στον προορισμό, μπορεί να εκφρασθεί ως [11], [12]:

$$\max \left\{ \gamma_{0,K+1}, \frac{\Gamma_1 \gamma_{1,K+1}}{\Gamma_1 + \gamma_{1,K+1}}, \frac{\Gamma_2 \gamma_{2,K+1}}{\Gamma_2 + \gamma_{2,K+1}}, \dots, \frac{\Gamma_K \gamma_{K,K+1}}{\Gamma_K + \gamma_{K,K+1}} \right\} \quad (2.5)$$

όπου $\frac{\Gamma_r \gamma_{r,K+1}}{\Gamma_r + \gamma_{r,K+1}}$ είναι ο σηματοθορυβικός λόγος που φτάνει στον κόμβο προορισμού από τον r -οστό κόμβο αναμετάδοσης.

Τελικά, μία επιπρόσθετη προσέγγιση του τελικού λαμβανόμενου σηματοθορυβικού λόγου από τον δέκτη του κόμβου προορισμού που περιγράφεται από την σχέση (5), είναι η ακόλουθη [12]:

$$\max \{ \gamma_{0,K+1}, \Gamma'_1, \Gamma'_2, \dots, \Gamma'_K \} \quad (2.6)$$

όπου [12]:

$$\Gamma'_r = \min \{ \Gamma_r, \gamma_{r,K+1} \}, \quad r = 1, 2, \dots, K \quad (2.7)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του Γ'_r θα είναι [12]:

$$f_{\bar{\Gamma}'_r}(\gamma) = \sum_{p=1}^r \pi_{r,p} f_{\bar{\Gamma}'_{r,p}}(\gamma) \quad (2.8)$$

$$\text{με } \bar{\Gamma}'_{r,p} = \frac{\bar{\Gamma}_{r,p} \bar{\gamma}_{r,K+1}}{\bar{\Gamma}_{r,p} + \gamma_{r,K+1}}.$$

2.2) Πιθανότητα Διακοπής

Η Πιθανότητα Διακοπής (Outage Probability) μίας ασύρματης ζεύξης περιγράφει την πιθανότητα της πτώσης της τιμής του στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου στον δέκτη ενός κόμβου κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι [7]. Το επίπεδο του συγκεκριμένου κατωφλίου εξαρτάται από την ευαισθησία της διάταξης του δέκτη του εκάστοτε κόμβου [7]. Ως εκ τούτου, η Πιθανότητα Διακοπής της ζεύξης μεταξύ του i -οστού και του j -οστού κόμβου ως συνάρτηση της μέσης τιμής του σηματοθορυβικού λόγου $\bar{\gamma}_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, K-1, K$, $j = 1, 2, \dots, K, K+1, i < j$), για κάποιο δεδομένο κατώφλι γ_{th} , θα είναι [7]:

$$P_{out}(\bar{\gamma}_{i,j}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\bar{\gamma}_{i,j}}(\gamma) d\gamma \quad (2.9)$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πιθανότητα διακοπής $P_{out}(\bar{\gamma}_{i,j})$ είναι η Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής (Cumulative Distribution Function - CDF) του στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{i,j}$, υπολογισμένη για γ_{th} , δηλαδή [7]:

$$P_{out}(\bar{\gamma}_{i,j}) = 1 - Q_1 \left(n\sqrt{2}, \left(\frac{2(1+n^2)\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{i,j}} \right)^{1/2} \right) \quad (2.10)$$

όπου $Q_1(x)$ είναι η Marcum- Q συνάρτηση.

Τότε, σύμφωνα με την προσέγγιση του αρχικού συστήματος των πολλαπλών αλμάτων από το αντίστοιχο σύστημα διπλών αλμάτων και υπό την προϋπόθεση ότι το κατώφλι του στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου που σχετίζεται με την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης μεταξύ δύο κόμβων, γ_{th} , είναι ταυτόσημο για τον δέκτη κάθε κόμβου αναμετάδοσης και του κόμβου προορισμού, αντίστοιχα, θα ισχύει για την Πιθανότητα Διακοπής της ζεύξης μεταξύ της πηγής και του προορισμού μέσω του r -οστού κόμβου αναμετάδοσης ότι [17]:

$$P_{out-R_r} = P_{out}(\bar{\Gamma}_r) + P_{out}(\bar{\Gamma}'_r) - P_{out}(\bar{\Gamma}_r)P_{out}(\bar{\Gamma}'_r) \quad (2.11)$$

Τελικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο δέκτης του κόμβου προορισμού χρησιμοποιεί την τεχνική SC, η Πιθανότητα Διακοπής της σύνδεσης μεταξύ της πηγής και του προορισμού για το συνολικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από K παράλληλες ζεύξεις με αναμεταδότες και

την απευθείας ζεύξη μεταξύ πηγής και προορισμού, αντίστοιχα, θα είναι [7], [17]:

$$P_{out} = P_{out}(\bar{\gamma}_{0,K+1}) \prod_{r=1}^K [P_{out}(\bar{\Gamma}_r) + P_{out}(\bar{\Gamma}'_r) - P_{out}(\bar{\Gamma}_r)P_{out}(\bar{\Gamma}'_r)] = P_{out}(\bar{\gamma}_{0,K+1}) \prod_{r=1}^K [P_{out-R_r}] \quad (2.12)$$

▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν ορισμένα ενδεικτικά αριθμητικά αποτελέσματα για την Πιθανότητα Διακοπής για το ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες που μελετήθηκε εκτενώς στις προηγούμενες παραγράφους, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που εξήχθησαν στην παράγραφο 2.2, σύμφωνα με την προσέγγιση του ισοδύναμου συστήματος διπλών αλμάτων. Ειδικότερα, η θεωρούμενη διάταξη είναι ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες, οι δέκτες των οποίων κάνουν χρήση της τεχνικής MRC για την διαχείριση των λαμβανομένων σημάτων, ενώ ο δέκτης του κόμβου προορισμού αξιοποιεί την τεχνική SC. Το πλήθος των κόμβων αναμετάδοσης είναι K και ως εκ τούτου, η αποστολή των δεδομένων λαμβάνει χώρα σε $K+1$ βήματα, στις αντίστοιχες χρονικές θυρίδες. Τα ασύρματα κανάλια $h_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, K-1, K$ και $j = 1, 2, \dots, K, K+1$ με $i < j$) διαβρώνονται από Προσθετικό Λευκό Γκαουσιανό Θόρυβο (Additive White Gaussian Noise - AWGN) μηδενικής μέσης τιμής και με διακύμανση σ^2 και επιπλέον, θεωρούνται ως αμοιβαία ανεξάρτητα. Επίσης, υποθέτουμε ότι οι κόμβοι αναμετάδοσης είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι μεταξύ των κόμβων της πηγής και του προορισμού, αντίστοιχα. Η μέση μεταδιδόμενη ενέργεια ανά σύμβολο του r -οστού κόμβου αναμετάδοσης ($r = 1, 2, \dots, K$) θεωρείται πως είναι $E_r = E_0/K$, όπου E_0 είναι η μέση μεταδιδόμενη ενέργεια του κόμβου της πηγής. Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των απωλειών λόγω διαδρομής, η αναμενόμενη τιμή του $|h_{i,j}|^2$ για το μελετώμενο

μοντέλο καναλιών θα είναι $E\left[|h_{i,j}|^2\right] = \frac{E\left[|h_{0,K+1}|^2\right]}{\left(\frac{j-i}{K+1}\right)^\mu}$, όπου ο παράγοντας απωλειών διαδρομής

λαμβάνεται ίσος με $\mu = 3.76$, που αποτελεί την παράμετρο του μοντέλου αστικών εξωτερικών χώρων [11]. Με τον συμβολισμό SNR θα περιγράφεται ο αναμενόμενος σηματοθορυβικός λόγος της απευθείας ζεύξης μεταξύ των κόμβων της πηγής και του δέκτη, αντίστοιχα και ο οποίος είναι $\bar{\gamma}_{0,K+1} = E\left[|h_{0,K+1}|^2\right] \frac{E_0}{\sigma^2}$. Σχετικά με την παράμετρο διαλείψεων n της κατανομής Rice, θα εξεταστούν δύο διαφορετικά ενδεχόμενα. Στην πρώτη περίπτωση θα είναι $n = 1$, ενώ στην δεύτερη θα είναι $n = 0$, γεγονός το οποίο αντιστοιχεί στον εκφυλισμό της κατανομής Rice σε αυτή της Rayleigh.

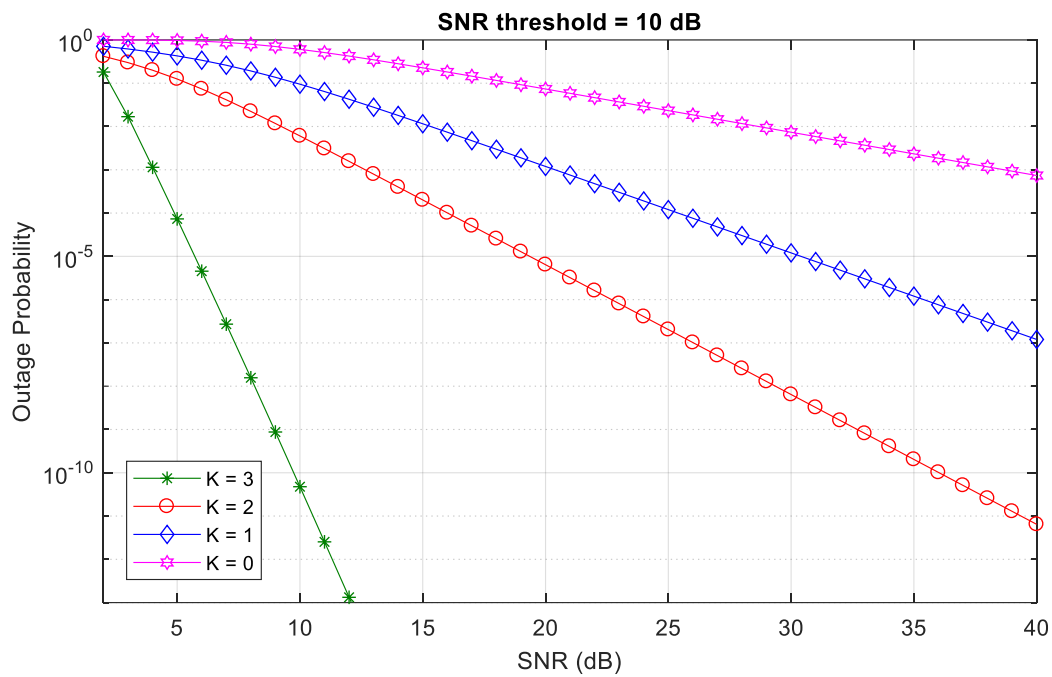
Συγκεκριμένα, στις Εικόνες 3.1 και 3.2 αναπαρίσταται η Πιθανότητα Διακοπής της σύνδεσης μεταξύ των κόμβων της πηγής και του δέκτη, αντίστοιχα, ως συνάρτηση του SNR, για τις περιπτώσεις όπου το πλήθος των AF αναμεταδοτών είναι $K = 0, 1, 2$ ή 3 (κάθε μια καμπύλη που διακρίνεται στα συγκεκριμένα διαγράμματα, αντιστοιχεί και σε συγκεκριμένο πλήθος αναμεταδοτών K), ενώ η παράμετρος διαλείψεων της κατανομής Rice θεωρείται πως είναι $n = 1$. Η διαφορά των δύο διαγραμμάτων είναι το θεωρούμενο κατώφλι του στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου στον δέκτη του κάθε κόμβου αναμετάδοσης και του κόμβου προορισμού, αντίστοιχα, κάτω από το οποίο λαμβάνει χώρα η διακοπή της σύνδεσης. Ειδικότερα, στην Εικόνα 3.1 αυτό θεωρείται ίσο με $\gamma_{th} = 10$ dB, ενώ στην Εικόνα 3.2 είναι $\gamma_{th} = 20$ dB.

Αρχικά, στην περίπτωση της Εικόνας 3.1 είναι προφανές πως η απόδοση του ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος βελτιώνεται σημαντικά (δηλαδή, μειώνεται η Πιθανότητα Διακοπής) με την αύξηση του SNR για κάποιο προκαθορισμένο πλήθος αναμεταδοτών K ή με την αύξηση του πλήθους των αναμεταδοτών K για κάποια προκαθορισμένη τιμή του SNR.

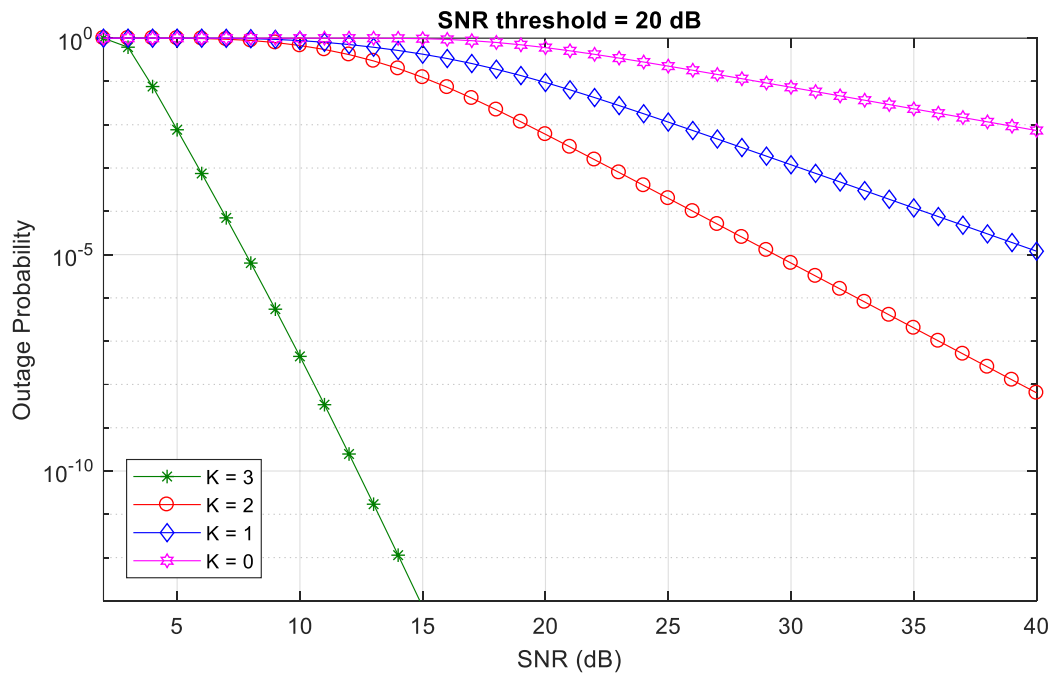
Για παράδειγμα, αν το SNR θεωρηθεί ίσο με 25 dB, η πιθανότητα διακοπής είναι περίπου ίση με $2 \cdot 10^{-2}$ για $K = 0$, δηλαδή, για κάποιο συμβατικό σύστημα όπου δεν υπάρχει κανένας ενδιάμεσος κόμβος αναμετάδοσης, 10^{-4} για $K = 1$, $2 \cdot 10^{-7}$ για $K = 2$ και σημαντικά λιγότερο 10^{-13} για $K = 3$, αντίστοιχα. Παρατηρούμε πως στην τελευταία περίπτωση, όπου $K = 3$, η απόδοση του συστήματος είναι άριστη, όντας πρακτικά απίθανο να υπάρξει διακοπή της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων της πηγής και του προορισμού αντίστοιχα. Αντιθέτως, εάν δεν υπάρχει κανένας ενδιάμεσος κόμβος αναμετάδοσης, η απόδοση του συστήματος είναι ιδιαίτερα υποβαθμισμένη, μιας και για μεγάλες τιμές του SNR η Πιθανότητα Διακοπής παραμένει υψηλή συγκριτικά και με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Αν $K = 1$ ή 2 , η απόδοση του συστήματος κρίνεται, εν γένει, ικανοποιητική. Συγκεκριμένα, αν $K = 1$ και για μέσες τιμές του SNR (γύρω στα 20 dB) και άνω, η Πιθανότητα Διακοπής περιορίζεται σημαντικά (το πολύ 10^{-4}), ενώ, αν $K = 2$, η απόδοση είναι περαιτέρω βελτιωμένη, αφού για SNR ίσο με 15 dB, η Πιθανότητα Διακοπής είναι της τάξεως του 10^{-4} . Επιπλέον, στην τελευταία περίπτωση, εάν το SNR είναι από 20 dB και πάνω, η Πιθανότητα Διακοπής είναι το πολύ 10^{-5} .

Σχετικά με την Εικόνα 3.2, όπου το κατώφλι για την εμφάνιση διακοπής έχει τεθεί ίσο με 20 dB, η απόδοση του συστήματος είναι παρόμοια με αυτού της Εικόνας 3.1, δηλαδή, η Πιθανότητα Διακοπής και πάλι περιορίζεται με την αύξηση του SNR για κάποιο προκαθορισμένο πλήθος αναμεταδοτών K ή με την αύξηση του πλήθους των αναμεταδοτών

K για κάποια προκαθορισμένη τιμή του SNR. Ωστόσο, για κάποιο συγκεκριμένο πλήθος αναμεταδοτών K και δεδομένο SNR, η Πιθανότητα Διακοπής εδώ είναι υψηλότερη συγκριτικά με την περίπτωση της Εικόνας 3.1, μιας και στο διάγραμμα της Εικόνας 3.2 το κατώφλι του στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου για την εμφάνιση διακοπής έχει τεθεί υψηλότερα.



Εικόνα 3.1: Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του SNR με $\gamma_{th} = 10$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rice με $n = 1$

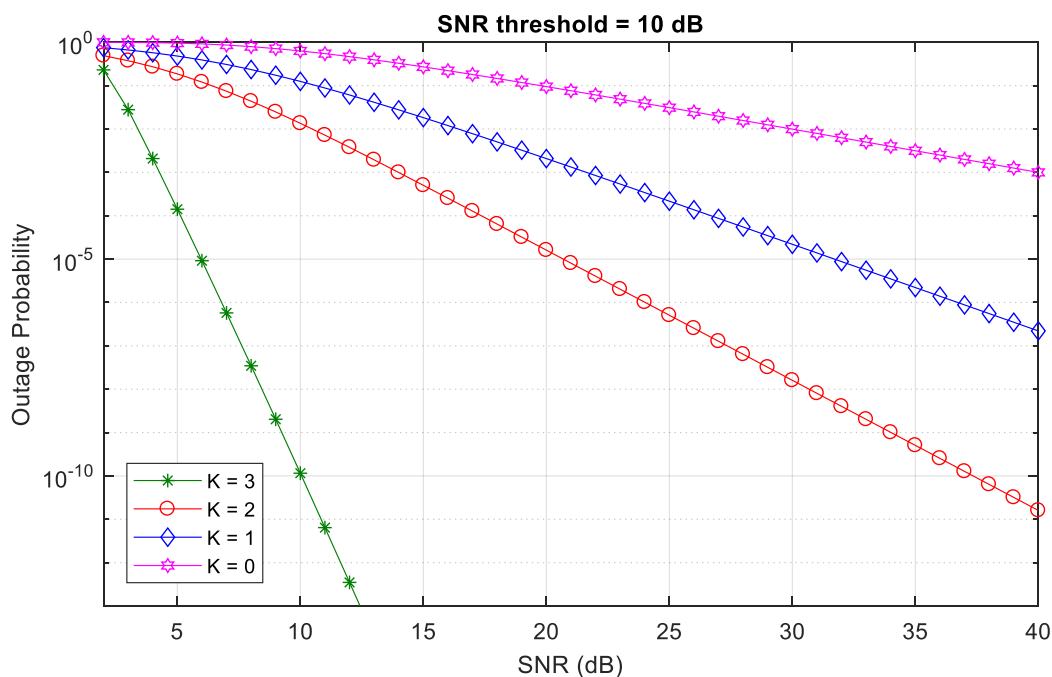


Εικόνα 3.2: Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του SNR με $\gamma_{th} = 20$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rice με $n = 1$

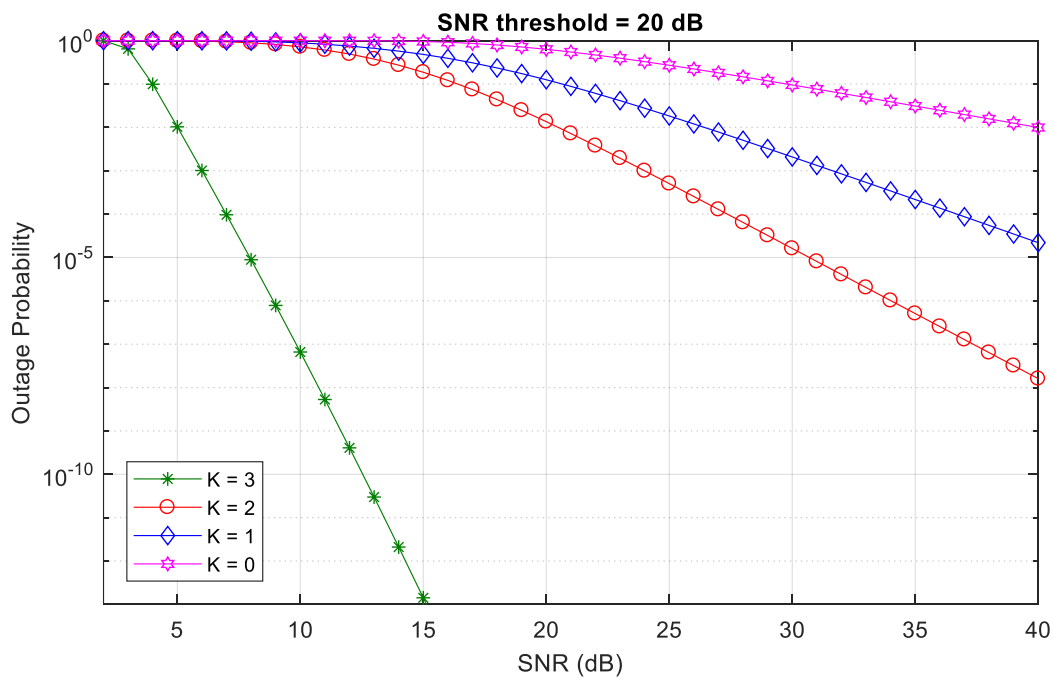
Ενδεικτικά, αν το SNR είναι ίσο με 25 dB, η Πιθανότητα Διακοπής είναι περίπου ίση με 10^{-1} για $K = 0$, 10^{-2} για $K = 1$, $2 \cdot 10^{-4}$ για $K = 2$ και σημαντικά μικρότερη από 10^{-13} για $K = 3$, αντίστοιχα.

Τέλος, στις Εικόνες 3.3 και 3.4 αναπαρίσταται και πάλι η Πιθανότητα Διακοπής της σύνδεσης μεταξύ των κόμβων της πηγής και του δέκτη αντίστοιχα ως συνάρτηση του SNR, για τις περιπτώσεις όπου το πλήθος των AF αναμεταδοτών είναι $K = 0, 1, 2$ ή 3 , για 2 διαφορετικά κατώφλια του στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου στον δέκτη του κάθε κόμβου αναμετάδοσης και του κόμβου προορισμού, αντίστοιχα, τα οποία λαμβάνονται και πάλι ίσα με 10 dB και 20 dB, αντίστοιχα. Η διαφορά, ωστόσο, σε σχέση με προηγούμενως είναι η τιμή της παραμέτρου διαλείψεων, η οποία εδώ θεωρείται ίση με $n = 0$, δηλαδή, εξετάζουμε ουσιαστικά την περίπτωση της κατανομής Rayleigh.

Παρατηρούμε πως η Πιθανότητα Διακοπής στην περίπτωση αυτή εμφανίζει πανομοιότυπη συμπεριφορά με τα ενδεχόμενα που μελετήθηκαν προηγούμενως για την κατανομή Rice. Η μοναδική διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός πως υπό τις ίδιες συνθήκες, δηλαδή, για κάποιο προκαθορισμένο επίπεδο του SNR, συγκεκριμένο αριθμό αναμεταδοτών και δεδομένο κατώφλι διακοπής του στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου στον δέκτη του κάθε κόμβου αναμετάδοσης και του κόμβου προορισμού, αντίστοιχα, απαιτείται ελαφρώς αυξημένο SNR στην περίπτωση της κατανομής Rayleigh συγκριτικά με την κατανομή Rice, για την επίτευξη της ίδιας τιμής της Πιθανότητας Διακοπής.



Εικόνα 3.3: Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του SNR με $\gamma_{th} = 10$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rayleigh ($n = 0$)



Εικόνα 3.4: Πιθανότητα Διακοπής ως συνάρτηση του SNR με $\gamma_{th} = 20$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rayleigh ($n = 0$)

▪ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν τα ασύρματα ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα πολλαπλών αλμάτων με αναμεταδότες και κανάλια διαλείψεων. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών και τα χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα, στα συστήματα αυτά τον ρόλο του καναλιού έχει ο ελεύθερος χώρος, δηλαδή, η ατμόσφαιρα, ως πομποί και δέκτες χρησιμοποιούνται κεραίες, αντίστοιχα, ενώ τα μεταδιδόμενα σήματα έχουν τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τα οποία ανήκουν κυρίως στο φάσμα των ραδιοκυμάτων.

Αυτού του είδους τα συστήματα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις μέρες μας, σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών, όπως τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής κ.α. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι τα ιδιαίτερος σημαντικά πλεονεκτήματα που τα χαρακτηρίζουν. Ορισμένα εξ αυτών είναι οι μεγάλες αποστάσεις των ζεύξεων που μπορούν να επιτύχουν και φτάνουν μέχρι και αρκετά χιλιόμετρα, η δυνατότητα διασύνδεσης κινούμενων πομποδεκτών, το χαμηλό κόστος εγκατάστασης κ.α. Από την άλλη, βέβαια, υπάρχουν και ορισμένα αξιοσημείωτα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τα συστήματα αυτά και πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα, τέτοια είναι τα φαινόμενα των παρεμβολών και των διαλείψεων που επιδρούν στο μεταδιδόμενο σήμα και τελικά οδηγούν σε μειωμένη απόδοση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, η απαίτηση για άδεια χρήσης ορισμένων ζωνών του ραδιοφάσματος, πράγμα που συνεπάγεται επιπρόσθετο λειτουργικό κόστος και ορισμένα ζητήματα ασφάλειας, τα οποία προκύπτουν από ενδεχόμενες επιθέσεις μη εξουσιοδοτημένων χρηστών του ασύρματου δικτύου, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα πρόσβασης σε αυτό.

Στην συνέχεια, παρουσιάστηκε λεπτομερώς το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, ενώ δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση της ζώνης των ραδιοκυμάτων, που είναι η κύρια περιοχή λειτουργίας των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας.

Έπειτα, παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών καναλιών. Συγκεκριμένα, σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον, λαμβάνουν χώρα φαινόμενα τα οποία οδηγούν σε διαλείψεις του μεταδιδόμενου σήματος και γενικότερα, στον σημαντικό περιορισμό της λαμβανόμενης ισχύος από τον δέκτη, κάτι που τελικά δυσχεραίνει την αναγνώριση από αυτόν του μεταδιδόμενου σήματος. Αυτά είναι οι απώλειες διαδρομής, που περιγράφονται από τον Νόμο του Friis, η ατμοσφαιρική

απορρόφηση, η σκίαση και η πολυόδευση. Επειδή, όμως, είναι πρακτικά αδύνατος ο επακριβής προσδιορισμός όλων των παραμέτρων αυτών σε ένα τέτοιο επικοινωνιακό σύστημα (εκτός των απωλειών διαδρομής), χρησιμοποιούνται στοχαστικά μοντέλα για την περιγραφή του λαμβανόμενου σήματος. Τα χαρακτηριστικότερα εξ αυτών τα οποία περιγράφουν τις διαλείψεις που προκύπτουν λόγω πολυόδευσης, είναι το μοντέλο Rayleigh, Rice και Nakagami-m, αντίστοιχα, ενώ το πιο αξιοσημείωτο μοντέλο που αφορά σε φαινόμενα σκίασης είναι αυτό της Λογαριθμο-κανονικής κατανομής.

Στο τέλος του πρώτου κεφαλαίου, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα με αναμεταδότες και συγκεκριμένα, τα συστήματα διπλών αλμάτων και πολλαπλών αλμάτων, αντίστοιχα. Σε αυτό το είδος συστημάτων χρησιμοποιούνται ενδιάμεσοι κόμβοι αναμετάδοσης μεταξύ του κόμβου της πηγής και του κόμβου προορισμού. Λόγω αυτού, το μήκος των ασύρματων καναλιών είναι συνήθως μικρότερο, κάτι που οδηγεί τελικά σε μια σειρά πλεονεκτημάτων, όπως η αυξημένη χωρητικότητα των συγκεκριμένων επικοινωνιακών συστημάτων, οι χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις τους και η επέκταση της περιοχής κάλυψής τους. Επίσης, παρουσιάστηκαν τα δύο διαφορετικά είδη κόμβων αναμετάδοσης, τα οποία είναι οι Amplify-and-Forward (AF) αναμεταδότες και οι Decode-and-Forward (DF) αναμεταδότες. Ακόμη, αναλύθηκαν οι πιθανές διατάξεις των ασύρματων συστημάτων με αναμεταδότες. Αυτές είναι σε σειρά και παράλληλα. Τέλος, έγινε αναφορά στην έννοια της διαφορικής συνεργασίας.

Στην συνέχεια, παρουσιάστηκε αναλυτικά το μελετώμενο σύστημα, το οποίο είναι ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες και διαφορική συνεργασία, σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rice. Ειδικότερα, στο σύστημα αυτό το πεδίο του χρόνου χωρίζεται σε χρονικές θυρίδες. Κατά την διάρκεια κάθε μίας εξ αυτών, ένα συγκεκριμένος κόμβος, στέλνει το σήμα του σε όλους τους επόμενους κόμβους αναμετάδοσης, καθώς και στον κόμβο προορισμού. Ειδικότερα, ο κόμβος της πηγής ξεκινά την διαδικασία αυτή στην αρχική χρονική θυρίδα και στην συνέχεια ακολουθεί κάθε επόμενος κόμβος αναμετάδοσης σε κάθε επόμενη χρονική θυρίδα, αντίστοιχα. Στο παραπάνω σύστημα, ο δέκτης κάθε κόμβου αναμετάδοσης συνδυάζει τα λαμβανόμενα σήματα κάνοντας χρήση της τεχνικής Maximum Ratio Combining (MRC), αθροίζει με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας, δηλαδή, όλα τα λαμβανόμενα σήματα από τους προηγούμενους κόμβους. Αντίθετα, ο κόμβος προορισμού κάνει χρήση της τεχνικής Selection Combining (SC), που σημαίνει πως συγκρίνει τις συνιστώσες του λαμβανόμενου σηματοθορυβικού λόγου από κάθε κόμβο αναμετάδοσης και τον κόμβο της πηγής, αντίστοιχα

και επιλέγει τον μέγιστο εξ αυτών. Επίσης, παρουσιάστηκαν όλες οι σχετικές μαθηματικές εκφράσεις οι οποίες περιγράφουν τον στιγμιαίο σηματοθορυβικό λόγο που καταλήγει στον δέκτη κάθε κόμβου από κάθε προηγούμενο κόμβο ξεχωριστά, αλλά και από τον συνδυασμό όλων μαζί, καθώς και οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας αυτών. Πρέπει να σημειωθεί πως ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην σχέση που περιγράφει τον λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο στον κόμβο προορισμού.

Έπειτα, παρουσιάστηκε μία προσέγγιση του παραπάνω συστήματος από ένα σύστημα διπλών αλμάτων με αναμεταδότες, μαζί με τις αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τον λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο στον δέκτη κάθε κόμβου και τις σχετικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. Συγκεκριμένα, για τον τελικό λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο του κόμβου προορισμού παρουσιάστηκαν δύο διαδοχικές προσεγγίσεις.

Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού, παρουσιάστηκαν οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης μεταξύ του κόμβου της πηγής και του κόμβου προορισμού για ολόκληρο το σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη την προσέγγιση της αντίστοιχης διάταξη διπλών αλμάτων, καθώς και την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης μεταξύ του κόμβου της πηγής και του κόμβου προορισμού για κάθε μία από τις παράλληλες ζεύξεις μέσω ενός συγκεκριμένου κόμβου αναμετάδοσης ξεχωριστά.

Κλείνοντας, παρουσιάστηκαν ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα για την πιθανότητα διακοπής του μελετώμενου συστήματος ως συνάρτηση του μέσου σηματοθορυβικού λόγου της απευθείας ζεύξης μεταξύ του κόμβου της πηγής και του κόμβου προορισμού. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν 4 διαγράμματα, σε καθένα εκ των οποίων υπήρχαν 4 διαφορετικές καμπύλες, που αντιστοιχούσαν στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν 0, 1, 2 ή 3 κόμβοι αναμετάδοσης, ομοίομορφα κατανομημένοι μεταξύ του κόμβου της πηγής και του κόμβου προορισμού (η περίπτωση των 0 κόμβων αντιστοιχεί σε ένα συμβατικό σύστημα χωρίς αναμεταδότες). Στα δύο πρώτα διαγράμματα η παράμετρος διαλείψεων θεωρούταν πως είναι $n = 1$, ενώ στα δύο επόμενα ήταν $n = 0$, τιμή που αντιστοιχεί, δηλαδή, στην περίπτωση της κατανομής Rayleigh. Για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση της τιμής της παραμέτρου διαλείψεων, εξετάστηκαν δύο διαφορετικές τιμές του κατωφλίου διακοπής του λαμβανόμενου στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου από τον δέκτη κάθε κόμβου. Ειδικότερα, εξετάστηκαν τα ενδεχόμενα όπου $\gamma_{th} = 10$ dB ή $\gamma_{th} = 20$ dB. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των διαγραμμάτων ήταν το γεγονός πως η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται με την αύξηση του μέσου σηματοθορυβικού λόγου καθώς και με την αύξηση του πλήθους των κόμβων αναμετάδοσης, για κάποια

προκαθορισμένη τιμή του μέσου σηματοθορυβικού λόγου. Από την άλλη, για δεδομένο πλήθος κόμβων αναμετάδοσης και τιμής του μέσου σηματοθορυβικού λόγου, οι περιπτώσεις του χαμηλότερου κατωφλίου διακοπής παρουσίαζαν καλύτερη απόδοση, δηλαδή, χαμηλότερη πιθανότητα διακοπής συγκριτικά με τις περιπτώσεις του υψηλότερου κατωφλίου. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως η διαφοροποίηση της απόδοσης του συστήματος για τα δύο διαφορετικά ενδεχόμενα της παραμέτρου διαλείψεων, δεν είναι σημαντική, αν και η περίπτωση όπου $n = 1$ εμφανίζει ελαφρώς χαμηλότερη πιθανότητα διακοπής σε σχέση με την περίπτωση όπου $n = 0$, για συγκεκριμένο πλήθος κόμβων αναμετάδοσης και προκαθορισμένων επιπέδων του μέσου σηματοθορυβικού λόγου και της τιμής κατωφλίου διακοπής, αντίστοιχα.

▪ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται οι κώδικες υλοποίησης γραφικών παραστάσεων της Πιθανότητα Διακοπής (Outage Probability) ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος πολλαπλών αλμάτων με AF αναμεταδότες ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

i) Κώδικας για κατώφλι διακοπής του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th} = 10$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rice, με $n = 1$ (Εικόνα 3.1)

```
%L=0,1,2
γ=0:40;
G21 = [10.^(γ/10)]*(3^3.76)/4;
G22 = [10.^(γ/10)]*(1.5^3.76)/2;
P21 = G21/(G21-G22);
P22 = G22/(G22-G21);
G_11 = (3^3.76)*10.^(γ/10)/(2+2^4.76);
G_22 = (3^3.76)*10.^(γ/10)/(2+2^4.76);
G_21 = 0.5*3^2.76*10.^(γ/10);
PoutG1 = [1-marcumq(2^0.5,6.33./[(3^3.76)*0.5*10.^(γ/10)].^0.5)];
PoutG_1 = [1-marcumq(2^0.5,6.33./[G_11.^0.5])];
PoutG2 = P21*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[G21.^0.5])] + P22*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[G22.^0.5])];
PoutG_2 = P21*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[G_21.^0.5])] + P22*[1-
marcumq(2^0.5,6.33./[G_22.^0.5])];
Poutg03 = [1-marcumq(2^0.5,6.33./[10.^(γ/20)])];
PoutL2 = [PoutG1+PoutG_1-PoutG1.*PoutG_1].*[PoutG2+PoutG_2-PoutG2.*PoutG_2].*Poutg03;
PoutGG1 = [1-marcumq(2^0.5,6.33./[2^1.88*10.^(γ/20)])];
PoutGG_1 = [1-marcumq(2^0.5,6.33./[2^1.38*10.^(γ/20)])];
PoutL1 = [PoutGG1+PoutGG_1-PoutGG1.*PoutGG_1].*Poutg03;

%L=3
TG21 = (4^3.76)*(10.^(γ/10))/6;
TG22 = (2^3.76)*(10.^(γ/10))/3;
TP21 = TG21/(TG21 - TG22);
```

```

TP22 = TG22/(TG22 - TG21);
TG_21 = (4^3.76)*(10.^(y/10))/(3*2^3.76+6);
TG_22 =(2^3.76)*(10.^(y/10))/6;
TG31 =(4^3.76)*(10.^(y/10))/9;
TG32 = (4^3.76)*(10.^(y/10))/(3*2^3.76+3);
TG33 = (4/3)^3.76*(10.^(y/10))/3;
TG_31 = (4^2.76)*(10.^(y/10))/3;
TG_32 = (10.^(y/10)*[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]*(4)^3.76/3/[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]+(4)^3.76/3);
TG_33 = [(4^3.76)/3*(4/3)^3.76/3]*(10.^(y/10))/[(4^3.76)/3-(4/3)^3.76/3];
TP31 = TP21*[(4^3.76)/9]/[(4^3.76)/9-(4/3)^3.76/3];
TP32 = TP22*[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]/[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)-(4/3)^3.76/3];
TP33 = TP21*[(4/3)^3.76/3]/[(4/3)^3.76/3-(4^3.76)/9] + TP22*[(4/3)^3.76/3]/[(4/3)^3.76/3 -
[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]];
TG1 = 4^3.76*(10.^(y/10))/3;
TG_1 = TG_33;
PoutTG1 = 1-marcumq(2^0.5,6.33./[TG1].^0.5);
PoutTG_1 = 1-marcumq(2^0.5,6.33./[TG_1].^0.5);
PoutT1 = PoutTG1 + PoutTG_1 - PoutTG1.*PoutTG_1;
PoutTG2 = TP21*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[TG21].^0.5)] + TP22*[1-
marcumq(2^0.5,6.33./[TG22].^0.5)];
PoutTG_2 = TP21*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[TG_21].^0.5)] + TP22*[1-
marcumq(2^0.5,6.33./[TG_22].^0.5)];
PoutT2 = PoutTG2 + PoutTG_2 - PoutTG2.*PoutTG_2;
PoutTG3 = TP31*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[TG31].^0.5)] + TP32*[1-
marcumq(2^0.5,6.33./[TG32].^0.5)] + TP33*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[TG33].^0.5)];
PoutTG_3 = TP31*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[TG_31].^0.5)] + TP32*[1-
marcumq(2^0.5,6.33./[TG_32].^0.5)] + TP33*[1-marcumq(2^0.5,6.33./[TG_33].^0.5)];
PoutT3 = PoutTG3 + PoutTG_3 - PoutTG3.*PoutTG_3;
PoutL3 = [PoutTG1 + PoutTG_1 - PoutTG1.*PoutTG_1].* [PoutTG2 + PoutTG_2 -
PoutTG2.*PoutTG_2].* [PoutTG3 + PoutTG_3 - PoutTG3.*PoutTG_3].* Poutg03;
semilogy(y,PoutL3,'g*-',y,PoutL2,'ro-',y,PoutL1,'bd-',y,Poutg03,'h-m')
xlabel('SNR (dB)')
ylabel('Outage Probability')

```

```
grid on
legend('L = 3' , 'L = 2' , 'L = 1' , 'L = 0', 'Location', 'southwest')
ylim([10.^(-13) 10^0])
title('SNR threshold = 10 dB')
```

ii) Κώδικας για κατώφλι διακοπής του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th} = 20$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rice, με $n = 1$ (Εικόνα 3.2)

```

%L=0,1,2
γ=0:40;
G21 = [10.^(γ/10)]*(3^3.76)/4;
G22 = [10.^(γ/10)]*(1.5^3.76)/2;
P21 = G21/(G21-G22);
P22 = G22/(G22-G21);
G_11 = (3^3.76)*10.^(γ/10)/(2+2^4.76);
G_22 = (3^3.76)*10.^(γ/10)/(2+2^4.76);
G_21 = 0.5*3^2.76*10.^(γ/10);
PoutG1 = [1-marcumq(2^0.5,20./[(3^3.76)*0.5*10.^(γ/10)].^0.5)];
PoutG_1 = [1-marcumq(2^0.5,20./[G_11.^0.5])];
PoutG2 = P21*[1-marcumq(2^0.5,20./[G21.^0.5])] + P22*[1-marcumq(2^0.5,20./[G22.^0.5])];
PoutG_2 = P21*[1-marcumq(2^0.5,20./[G_21.^0.5])] + P22*[1-marcumq(2^0.5,20./[G_22.^0.5])];
Poutg03 = [1-marcumq(2^0.5,20./[10.^(γ/20)])];
PoutL2 = [PoutG1+PoutG_1-PoutG1.*PoutG_1].*[PoutG2+PoutG_2-PoutG2.*PoutG_2].*Poutg03;
PoutGG1 = [1-marcumq(2^0.5,20./[2^1.88*10.^(γ/20)])];
PoutGG_1 = [1-marcumq(2^0.5,20./[2^1.38*10.^(γ/20)])];
PoutL1 = [PoutGG1+PoutGG_1-PoutGG1.*PoutGG_1].*Poutg03;

%L=3
TG21 = (4^3.76)*(10.^(γ/10))/6;
TG22 = (2^3.76)*(10.^(γ/10))/3;
TP21 = TG21/(TG21 - TG22);
TP22 = TG22/(TG22 - TG21);
TG_21 = (4^3.76)*(10.^(γ/10))/(3*2^3.76+6);
TG_22 =(2^3.76)*(10.^(γ/10))/6;
TG31 =(4^3.76)*(10.^(γ/10))/9;
TG32 = (4^3.76)*(10.^(γ/10))/(3*2^3.76+3);
TG33 = (4/3)^3.76*(10.^(γ/10))/3;

```

```

TG_31 = (4^2.76)*(10.^(y/10))/3;
TG_32 = (10.^y/10)*[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]*(4)^3.76/3/[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]+(4)^3.76/3;
TG_33 = [(4^3.76)/3*(4/3)^3.76/3]*(10.^y/10)/[(4^3.76)/3-(4/3)^3.76/3];
TP31 = TP21*[(4^3.76)/9]/[(4^3.76)/9-(4/3)^3.76/3];
TP32 = TP22*[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]/[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)-(4/3)^3.76/3];
TP33 = TP21*[(4/3)^3.76/3]/[(4/3)^3.76/3-(4^3.76)/9] + TP22*[(4/3)^3.76/3]/[(4/3)^3.76/3 -
[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]];
TG1 = 4^3.76*(10.^y/10)/3;
TG_1 = TG_33;
PoutTG1 = 1-marcumq(2^0.5,20./[TG1].^0.5);
PoutTG_1 = 1-marcumq(2^0.5,20./[TG_1].^0.5);
PoutT1 = PoutTG1 + PoutTG_1 - PoutTG1.*PoutTG_1;
PoutTG2 = TP21*[1-marcumq(2^0.5,20./[TG21].^0.5)] + TP22*[1-marcumq(2^0.5,20./[TG22].^0.5)];
PoutTG_2 = TP21*[1-marcumq(2^0.5,20./[TG_21].^0.5)] + TP22*[1-
marcumq(2^0.5,20./[TG_22].^0.5)];
PoutT2 = PoutTG2 + PoutTG_2 - PoutTG2.*PoutTG_2;
PoutTG3 = TP31*[1-marcumq(2^0.5,20./[TG31].^0.5)] + TP32*[1-marcumq(2^0.5,20./[TG32].^0.5)] +
TP33*[1-marcumq(2^0.5,20./[TG33].^0.5)];
PoutTG_3 = TP31*[1-marcumq(2^0.5,20./[TG_31].^0.5)] + TP32*[1-
marcumq(2^0.5,20./[TG_32].^0.5)] + TP33*[1-marcumq(2^0.5,20./[TG_33].^0.5)];
PoutT3 = PoutTG3 + PoutTG_3 - PoutTG3.*PoutTG_3;
PoutL3 = [PoutTG1 + PoutTG_1 - PoutTG1.*PoutTG_1].* [PoutTG2 + PoutTG_2 -
PoutTG2.*PoutTG_2].* [PoutTG3 + PoutTG_3 - PoutTG3.*PoutTG_3].* Poutg03;

semilogy(y,PoutL3,'g*-',y,PoutL2,'ro-',y,PoutL1,'bd-',y,Poutg03,'h-m')
xlabel('SNR (dB)')
ylabel('Outage Probability')
grid on
legend('L = 3','L = 2','L = 1','L = 0','Location','southwest')
ylim([10.^(-13) 10^0])
title('SNR threshold = 20 dB')

```

iii) Κώδικας για κατώφλι διακοπής του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th} = 10$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rayleigh ($n = 0$) (Εικόνα 3.3)

```
%L=0,1,2,Rayleigh
γ=0:40;
G21 = [10.^(γ/10)]*(3^3.76)/4;
G22 = [10.^(γ/10)]*(1.5^3.76)/2;
P21 = G21/(G21-G22);
P22 = G22/(G22-G21);
G_11 = (3^3.76)*10.^(γ/10)/(2+2^4.76);
G_22 = (3^3.76)*10.^(γ/10)/(2+2^4.76);
G_21 = 0.5*3^2.76*10.^(γ/10);
PoutG1 = [1-marcumq(0*0,4.47./[(3^3.76)*0.5*10.^(γ/10)].^0.5)];
PoutG_1 = [1-marcumq(0*0,4.47./[G_11.^0.5])];
PoutG2 = P21*[1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[G21.^0.5])] + P22*[1-
marcumq(0*2^0.5,4.47./[G22.^0.5])];
PoutG_2 = P21*[1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[G_21.^0.5])] + P22*[1-
marcumq(0*2^0.5,4.47./[G_22.^0.5])];
Poutg03 = [1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[10.^(γ/20)])];
PoutL2 = [PoutG1+PoutG_1-PoutG1.*PoutG_1].*[PoutG2+PoutG_2-PoutG2.*PoutG_2].*Poutg03;
PoutGG1 = [1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[2^1.88*10.^(γ/20)])];
PoutGG_1 = [1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[2^1.38*10.^(γ/20)])];
PoutL1 = [PoutGG1+PoutGG_1-PoutGG1.*PoutGG_1].*Poutg03;

%L=3
TG21 = (4^3.76)*(10.^(γ/10))/6;
TG22 = (2^3.76)*(10.^(γ/10))/3;
TP21 = TG21/(TG21 - TG22);
TP22 = TG22/(TG22 - TG21);
TG_21 = (4^3.76)*(10.^(γ/10))/(3*2^3.76+6);
TG_22 =(2^3.76)*(10.^(γ/10))/6;
TG31 =(4^3.76)*(10.^(γ/10))/9;
```



```

TG32 = (4^3.76)*(10.^(y/10))/(3*2^3.76+3);
TG33 = (4/3)^3.76*(10.^(y/10))/3;
TG_31 = (4^2.76)*(10.^(y/10))/3;
TG_32 = (10.^(y/10)*[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]*(4)^3.76/3/[[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]+(4)^3.76/3];
TG_33 = [(4^3.76)/3*(4/3)^3.76/3]*(10.^(y/10)/[(4^3.76)/3-(4/3)^3.76/3];
TP31 = TP21*[(4^3.76)/9]/[(4^3.76)/9-(4/3)^3.76/3];
TP32 = TP22*[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]/[[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]-(4/3)^3.76/3];
TP33 = TP21*[(4/3)^3.76/3]/[(4/3)^3.76/3-(4^3.76)/9] + TP22*[(4/3)^3.76/3]/[(4/3)^3.76/3 -
[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]];
TG1 = 4^3.76*(10.^(y/10))/3;
TG_1 = TG_33;
PoutTG1 = 1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG1].^0.5);
PoutTG_1 = 1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG_1].^0.5);
PoutT1 = PoutTG1 + PoutTG_1 - PoutTG1.*PoutTG_1;
PoutTG2 = TP21*[1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG21].^0.5)] + TP22*[1-
marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG22].^0.5)];
PoutTG_2 = TP21*[1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG_21].^0.5)] + TP22*[1-
marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG_22].^0.5)];
PoutT2 = PoutTG2 + PoutTG_2 - PoutTG2.*PoutTG_2;
PoutTG3 = TP31*[1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG31].^0.5)] + TP32*[1-
marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG32].^0.5)] + TP33*[1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG33].^0.5)];
PoutTG_3 = TP31*[1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG_31].^0.5)] + TP32*[1-
marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG_32].^0.5)] + TP33*[1-marcumq(0*2^0.5,4.47./[TG_33].^0.5)];
PoutT3 = PoutTG3 + PoutTG_3 - PoutTG3.*PoutTG_3;
PoutL3 = [PoutTG1 + PoutTG_1 - PoutTG1.*PoutTG_1].* [PoutTG2 + PoutTG_2 -
PoutTG2.*PoutTG_2].* [PoutTG3 + PoutTG_3 - PoutTG3.*PoutTG_3].* Poutg03;
semilogy(y,PoutL3,'g*-',y,PoutL2,'ro-',y,PoutL1,'bd-',y,Poutg03,'h-m')
xlabel('SNR (dB)')
ylabel('Outage Probability')
grid on
legend('K = 3','K = 2','K = 1','K = 0','Location','southwest')
ylim([10.^(-13) 10^0])
title('SNR threshold = 10 dB')

```

iv) Κώδικας για κατώφλι διακοπής του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th} = 20$ dB σε συνθήκες καναλιών διαλείψεων που ακολουθούν την κατανομή Rayleigh ($n = 0$) (Εικόνα 3.4)

```

%L=0,1,2,Rayleigh
γ=0:40;
G21 = [10.^(γ/10)]*(3^3.76)/4;
G22 = [10.^(γ/10)]*(1.5^3.76)/2;
P21 = G21/(G21-G22);
P22 = G22/(G22-G21);
G_11 = (3^3.76)*10.^(γ/10)/(2+2^4.76);
G_22 = (3^3.76)*10.^(γ/10)/(2+2^4.76);
G_21 = 0.5*3^2.76*10.^(γ/10);
PoutG1 = [1-marcumq(0*0,14.14./[(3^3.76)*0.5*10.^(γ/10)].^0.5)];
PoutG_1 = [1-marcumq(0*0,14.14./[G_11.^0.5])];
PoutG2 = P21*[1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[G21.^0.5])] + P22*[1-
marcumq(0*2^0.5,14.14./[G22.^0.5])];
PoutG_2 = P21*[1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[G_21.^0.5])] + P22*[1-
marcumq(0*2^0.5,14.14./[G_22.^0.5])];
Poutg03 = [1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[10.^(γ/20)])];
PoutL2 = [PoutG1+PoutG_1-PoutG1.*PoutG_1].*[PoutG2+PoutG_2-PoutG2.*PoutG_2].*Poutg03;
PoutGG1 = [1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[2^1.88*10.^(γ/20)])];
PoutGG_1 = [1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[2^1.38*10.^(γ/20)])];
PoutL1 = [PoutGG1+PoutGG_1-PoutGG1.*PoutGG_1].*Poutg03;

%L=3
TG21 = (4^3.76)*(10.^(γ/10))/6;
TG22 = (2^3.76)*(10.^(γ/10))/3;
TP21 = TG21/(TG21 - TG22);
TP22 = TG22/(TG22 - TG21);
TG_21 = (4^3.76)*(10.^(γ/10))/(3*2^3.76+6);
TG_22 =(2^3.76)*(10.^(γ/10))/6;
TG31 =(4^3.76)*(10.^(γ/10))/9;

```

```

TG32 = (4^3.76)*(10.^(y/10))/(3*2^3.76+3);
TG33 = (4/3)^3.76*(10.^(y/10))/3;
TG_31 = (4^2.76)*(10.^(y/10))/3;
TG_32 = (10.^(y/10)*[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]*(4)^3.76/3/[[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]+(4)^3.76/3];
TG_33 = [(4^3.76)/3*(4/3)^3.76/3]*(10.^(y/10)/[(4^3.76)/3-(4/3)^3.76/3];
TP31 = TP21*[(4^3.76)/9]/[(4^3.76)/9-(4/3)^3.76/3];
TP32 = TP22*[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]/[[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]-(4/3)^3.76/3];
TP33 = TP21*[(4/3)^3.76/3]/[(4/3)^3.76/3-(4^3.76)/9] + TP22*[(4/3)^3.76/3]/[(4/3)^3.76/3 -
[(4^3.76)/(3*2^3.76+3)]];
TG1 = 4^3.76*(10.^(y/10))/3;
TG_1 = TG_33;
PoutTG1 = 1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG1].^0.5);
PoutTG_1 = 1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG_1].^0.5);
PoutT1 = PoutTG1 + PoutTG_1 - PoutTG1.*PoutTG_1;
PoutTG2 = TP21*[1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG21].^0.5)] + TP22*[1-
marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG22].^0.5)];
PoutTG_2 = TP21*[1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG_21].^0.5)] + TP22*[1-
marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG_22].^0.5)];
PoutT2 = PoutTG2 + PoutTG_2 - PoutTG2.*PoutTG_2;
PoutTG3 = TP31*[1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG31].^0.5)] + TP32*[1-
marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG32].^0.5)] + TP33*[1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG33].^0.5)];
PoutTG_3 = TP31*[1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG_31].^0.5)] + TP32*[1-
marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG_32].^0.5)] + TP33*[1-marcumq(0*2^0.5,14.14./[TG_33].^0.5)];
PoutT3 = PoutTG3 + PoutTG_3 - PoutTG3.*PoutTG_3;
PoutL3 = [PoutTG1 + PoutTG_1 - PoutTG1.*PoutTG_1].* [PoutTG2 + PoutTG_2 -
PoutTG2.*PoutTG_2].* [PoutTG3 + PoutTG_3 - PoutTG3.*PoutTG_3].* Poutg03;
semilogy(y,PoutL3,'g*-',y,PoutL2,'ro-',y,PoutL1,'bd-',y,Poutg03,'h-m')
xlabel('SNR (dB)')
ylabel('Outage Probability')
grid on
legend('K = 3','K = 2','K = 1','K = 0','Location','southwest')
ylim([10.^(-13) 10^0])
title('SNR threshold = 20 dB')

```

▪ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] John G. Proakis, Masoud Salehi, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, Έκδοση: ΕΘΝΙΚΟ και ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, 2002
- [2] Ε. Νισταζάκης, Ασύρματες Ζεύξεις (Διαφάνειες Παραδόσεων), Τμήμα Φυσικής, Ε.Κ.Π.Α., 2012-2013
- [3] A. Goldsmith, (2005), “WIRELESS COMMUNICATIONS”, Cambridge University Press
- [4] H. J. Pain, Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1997
- [5] Raymond A. Serway, PHYSICS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS – ΤΟΜΟΣ ΙΙ – ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ, Υπεύθυνος ελληνικής έκδοσης: Λ. Κ. Ρεσβάνης, 1990
- [6] David J. Griffiths, Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ, 2012
- [7] M. Simon, M.-S. Alouini, (2000), “Digital Communication over Fading Channel. A Unified Approach to Performance Analysis”, JOHN WILEY & SONS, NEW YORK, CHICHESTER, WEINHEIM, BRISBANE, SINGAPORE, TORONTO
- [8] F. Lazarakis, G. Tombras, K. Dangakis, “Average Channel Capacity in a Mobile Radio Environment with Rician Statistics”, IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. E77-B, NO. 7, JULY 1994
- [9] J. Boyer, D. Falconer, H. Yanikomeroğlu, “Multihop Diversity in Wireless Relaying Channels”, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 52, NO. 10, OCTOBER 2004
- [10] P. Anghel, M. Kaveh, “Exact Symbol Error Probability of a Cooperative Network in a Rayleigh-Fading Environment”, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 3, NO. 5, SEPTEMBER 2004
- [11] L. Sungmook, K. Kyunbyoung, “Approximation of Multi-Hop Relay to Dual-Hop Relay and Its Error Performance Analysis”, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 21, NO. 2, FEBRUARY 2017

- [12] A. Panajotovic, N. Sekulovic, A. Cvetkovic, D. Milovic, "Performance of Multi_Hop Relaying Networks with SSC Diversity at the Destination", TELSIXS 2017, Serbia, Nis, October 2017
- [13] C. Conne, M. Ju, Z. Yi, H.-K, Song, I.-M, Kim, "SER Analysis and PDF Derivation for Multi-Hop Amplify-and-Forward Relay Systems", IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 58, NO. 8, AUGUST 2010
- [14] C. Conne, I.-M, Kim, "Outage Probability of Multi-Hop Amplify-and-Forward Relay Systems", IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 9, NO. 3, MARCH 2010
- [15] Tian Zhang, Wei Chen, Zhigang Cao, "Opportunistic DF-AF Selection Relaying with Optimal Relay Selection in Nakagami-m Fading Environments", 2012 1ST IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS IN CHINA (ICCC)
- [16] Chanchal Kumar De, Chanchal Kumar De, "Hybrid Forwarding for Serial and Parallel Wireless Relaying in m-Nakagami Fading Channel", International Conference on Computer & Communication Technology (ICCCT), 2011
- [17] K. Prabu and D.S. Kumar, "Outage Analysis of Relay-Assisted BPSK-SIM Based FSO Systems over Strong Atmospheric turbulence with Pointing errors", International Journal of Computer and Communication Engineering, vol. 3, no. 5, pp. 317-320, 2014