



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Ασυρμάτων Ζεύξεων Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (ΜΕΑ) UAVs

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Δ. Ματσούκας

Επιβλέπων: Αθανάσιος Παναγόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Ασυρμάτων Ζεύξεων Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (ΜΕΑ) UAVs

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Δ. Ματσούκας

Επιβλέπων: Αθανάσιος Παναγόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^η Νοεμβρίου 2015

.....
Αθαν. Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Κωπτής
Καθηγητής Ε. Μ. Π.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε. Μ. Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2015

.....

Γεώργιος Δ. Ματσούκας
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Copyright © , Γεώργιος Ματσούκας, 2015.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια προσπάθεια για την μελέτη των ασυρμάτων ζεύξεων που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της λειτουργίας των Συστημάτων Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (ΣΜΕΑ). Πέραν των τηλεπικοινωνιακών ζητημάτων γίνεται επίσης μια απόπειρα προσέγγισης έτερων ζητημάτων που αφορούν τα Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα όχι μόνο ως δομικά μέρη ευρύτερων συστημάτων αλλά και ως αυτούσια συστήματα. Τα ζητήματα αυτά αφορούν την κινητικότητα των ΜΕΑ ως κόμβων σε κινητά ad hoc δικτύων καθώς και τη σχεδίαση τροχιών για την εκπλήρωση των αναλαμβανόμενων αποστολών.

Η διπλωματική εργασία διαιρείται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στην ανάπτυξη των Συστημάτων Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων και παρατίθενται διάφορα στοιχεία που σχετίζονται με τα συστήματα αυτά (συνθετικά μέρη των ΣΜΕΑ, κατηγοριοποιήσεις , εφαρμογές αυτών και άλλα).

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα ΜΕΑ ως αλληλεπιδρώντα μέρη σε ad hoc δίκτυα κινητού χαρακτήρα. Στα πλαίσια αυτών των δικτύων , τα ΜΕΑ αλληλεπιδρούν με ιδιαίτερα δυναμικό τρόπο ο οποίος καθορίζει και τη κινητικότητά τους. Αυτή περιγράφεται με τη χρήση ειδικών μοντέλων τα οποία παρουσιάζονται με συνοπτικό τρόπο στο κεφάλαιο αυτό.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τρόποι με τους οποίους σχεδιάζονται οι τροχιές πτήσης των ΜΕΑ. Ο σχεδιασμός τροχιών, στη πλειοψηφία των περιπτώσεων, οδηγεί στην ανάγκη επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση των ΜΕΑ στην εκτέλεση αποστολών.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά μια σύντομη αναδρομή στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών και γίνεται μια αναφορά σε βασικά στοιχεία που συνθέτουν την έννοια των ασύρματων ζεύξεων. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφονται οι ασύρματες ζεύξεις που υλοποιούνται για τις διάφορες λειτουργίες των ΣΜΕΑ κατά τη εκπλήρωση μιας αποστολής.

Λέξεις κλειδιά

Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (ΣΜΕΑ), Κινητά ad hoc Δίκτυα, Πρωτόκολλα Δρομολόγησης, Κινητικότητα, Σχεδίαση Τροχιάς, Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός, Έλεγχος Κυλιόμενου Ορίζοντος, Ασύρματες Ζεύξεις Μετάδοσης Δεδομένων, Φάσμα Συχνοτήτων, Αντί-Παρεμβολές, Μεταδιδόμενος Ρυθμός Δεδομένων.

Abstract

This diploma thesis makes an effort for the study of the wireless links that take place along the during the operations of Unmanned Aerial Vehicles Systems (UAS). In addition to telecommunications matters, there is also an attempt to approach of extraneous issues of Unmanned Aerial vehicle not only as components of larger systems but also as separate systems. These issues relate to the mobility of UAVS as nodes in mobile ad hoc networks and designing trajectories for the fulfillment of the undertaken missions.

The thesis is divided into four chapters. The first chapter offers a brief historical overview on the development of UASs and listed various items related to these systems (major components of UASs, categorizations, applications and others).

The second chapter refers to the media as interactive parts on an ad hoc mobile data networks. Within these networks, UAVs interact with highly dynamic manner which determines their mobility. This is described by using specific models that are presented in a concise way in this chapter.

The third chapter describes ways in which UAVs' flight paths are planned. Trajectory design, in most cases, leads to the need of solving optimization problems and it constitutes a determining factor for the performance of the UAVs' mission.

Finally, in the fourth chapter and in its first part is provided a brief overview on the telecommunications history and a reference to basic elements that make up the concept of wireless links, is made . The following part of the chapter describes the wireless links which are implemented for the various functions of the UAS in fulfillment of a mission.

Key Words

Unmanned Aerial Systems (UASs). Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Routing Protocols, Mobility, Trajectory Planning, Mixed Integer Linear Programming (MILP), Recent Horizon Control (RHC), Wireless Data Links, Frequency Spectrum, Anti-Jam, Transmitted Data Rate.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο τόσο για την ανάθεση της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας όσο και για την αμέριστη κατανόηση που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής αλλά και για τον πολύτιμο χρόνο του που αφιέρωσε προκειμένου να διορθώσει την εργασία. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου για την εμπειρία και τις γνώσεις που μου χάρισαν κατά τα χρόνια της φοίτησής μου στη σχολή αλλά και για τον τρόπο σκέψης που μου μεταλαμπάδευσαν . Τέλος , ευχαριστώ τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την διακριτικότητά που επιδείκνυαν καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου αλλά και για την αγάπη τους.

Αφιερώνεται στους γονείς μου , Δημοσθένη και Ελένη , και στην μνήμη του παππού μου, Γεώργιου γιατί με έμαθε να ανακατεύομαι με μηχανές και γιατί αν ήταν παρών, θα χαιρόταν όσο και εγώ.....

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Εισαγωγή.....	σελ.11
1.1 Σύνομη ιστορική αναδρομή.....	σελ.11
1.2 Διάκριση μεταξύ ΜΕΑ (UAVs, Unmanned Aerial Vehicles) και Συστημάτων ΜΕΑ (UASs, Unmanned Aircraft Systems).....	σελ.13
1.3 Συνοπτική παρουσίαση των στοιχείων που συνθέτουν ένα ΣΜΕΑ (UAS).....	σελ.14
1.4 Κατηγορίες των UAVs.....	σελ.15
1.5 Αποστολές των ΜΕΑ(UAVs) και Πλεονεκτήματα τους έναντι των Επανδρωμένων Αεροχημάτων.....	σελ.18
1.6 Εφαρμογή Τεχνολογίας STEALTH (ή Low Observability-Χαμηλής Παρατηρησιμότητας) στα ΜΕΑ.....	σελ.19
1.7 Λειτουργική αυτονομία των ΜΕΑ και δράση σε ομάδες-σχηματισμούς	σελ.21
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Κινητικότητα (mobility) στοιχείων σχηματισμού ΜΕΑ..	σελ.24
2.1 Αυτοοργανωμένα ή κατ' απαίτηση (Ad hoc) Δίκτυα.....	σελ.24
2.2 Κινητά Αυτοοργανωμένα ή κατ' απαίτηση Δίκτυα (Mobile Ad hoc NETwork-MANET).....	σελ.30
2.3 Μοντέλα κινητικότητας των ΜΕΑ ως κόμβων ενός δικτύου MANET.....	σελ.36
2.3.1 Γενικά περί κινητικότητας.....	σελ.36
2.3.2 Κατηγοριοποίηση των μοντέλων κινητικότητας.....	σελ. 37
2.3.3 Εφαρμογή των μοντέλων κινητικότητας στα ad hoc δίκτυα των ΣΜΕΑ.....	σελ.40
2.3.3.1 Τυχαίο Σημειακό Μοντέλο Κινητικότητας (Random - Way Point mobility model , RWP).....	σελ.40
2.3.3.2 Κατανεμημένης Απωθητικής Φερομόνης Μοντέλο Κινητικότητας (Distributed Pheromone Repel mobility model).....	σελ.41
2.3.3.3 ΡΑΡΑΡΑΖΖΙ Μοντέλο Κινητικότητας (ΡΑΡΑΡΑΖΖΙ MOBILITY MODEL, PPRZM).....	σελ.43
2.3.3.4 Ημι-Τυχαίο Κυκλικής Κίνησης Μοντέλο Κινητικότητας (Semi-Random Circular Movement mobility model, SRCM).....	σελ.45
2.3.3.5 Ομαλής Στροφής Μοντέλο Κινητικότητας (The Smooth Turn (ST) mobility Model).....	σελ.46

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Σχεδιασμός τροχιών ΜΕΑ.....σελ. 49

3.1 Γενικά.....	σελ.49
3.2 Το πρόβλημα της σχεδίασης τροχιάς.....	σελ.49
3.3 Μέθοδοι σχεδίασης τροχιών.....	σελ.53
3.3.1 Συνδυασμός Ελέγχου Κυλιόμενου Ορίζοντος και Μικτού Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού	σελ.53
3.3.2 Αλγόριθμος A*	σελ.60
3.3.3 Δομοστοιχείο Λογισμικού Παραγωγής Τροχιάς και Καθοδήγησης (Trajectory Planning and Guidance Module , TG ² M).	σελ.64

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Εφαρμογές ασύρματων ζεύξεων στα ΣΜΕΑ.....σελ.71

4.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή	σελ.74
4.2 Τι είναι καλείται ζεύξη ;.....	σελ.74
4.3 Βασικά στοιχεία ασύρματων ζεύξεων.....	σελ.75
4.3.1 Σήμα.....	σελ.75
4.3.2 Διαμόρφωση.....	σελ.78
4.3.3 Τηλεπικοινωνιακός δίαυλος και αρνητικές επιδράσεις κατά τη μετάδοση	σελ.81
4.3.4 Πομπός	σελ.83
4.3.5 Δέκτης.....	σελ.83
4.4 Εξέλιξη και εφαρμογές των ασύρματων ζεύξεων.....	σελ.86
4.5 Οι ασύρματες ζεύξεις στα ΣΜΕΑ.....	σελ.90
4.5.1 Ασύρματες ζεύξεις για χειρισμό και πλοήγηση των ΜΕΑ.....	σελ.105
4.5.2 Ασύρματες ζεύξεις για ανταλλαγή δεδομένων στα ΣΜΕΑ.....	σελ.110
4.5.3 Ασύρματες ζεύξεις για συνεργασία μεταξύ των ΜΕΑ.....	σελ.118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο Εισαγωγή

1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Στο σύγχρονο κόσμο που χαρακτηρίζεται από τους φρενήρεις ρυθμούς της τεχνολογικής εξέλιξης, μια ιδιαίτερη πραγματικότητα γίνεται όλο και περισσότερο αντιληπτή καθημερινά. Η πραγματικότητα των Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (ΜΕΑ) ή όπως έχουν καθιερωθεί διεθνώς, των UAVs (Unmanned Aircraft Vehicles).

Στο πρώτο και μόνο άκουσμα της ονομασίας, η σκέψη παραπέμπει σε ταινία επιστημονικής φαντασίας, σε κάτι προερχόμενο από το απώτερο μέλλον. Αρκετοί ίσως και να αναρωτηθούν: “Πώς είναι δυνατόν να πετάει ένα όχημα χωρίς έναν άνθρωπο μέσα σε αυτό για να το χειρίζεται;” Ωστόσο, τα “παράξενα” αυτά οχήματα δεν είναι τόσο “μελλοντικά”. Αντιθέτως, υπάρχουν αναφορές για αυτά στο μακρινό παρελθόν. Για να γίνει αυτό κατανοητό θα πρέπει να διευρυνθεί ο όρος “αερόχημα” και να συμπεριλάβει και άλλα αντικείμενα που δύνανται να πετούν όπως ένα βέλος, ένας χαρταετός κτλ. Το κοινό στοιχείο σε όλα αυτά είναι η ανθρώπινη βούληση που προκαλεί αυτή τη κατάστασή τους, για κάποιο σκοπό. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες ημερομηνίες και περίοδοι, σταθμοί στην ιστορία των “οχημάτων” αυτών [1],[2],[3]:

425(π.Χ): Στη πόλη Τάραντα της νότιας Ιταλίας ο Αρχύτας ο Ταραντινός κατασκευάζει ένα μηχανικό περιστέρι που εκτελεί πτήση 200 μέτρων με κινήσεις των φτερών του μέσω ενός μηχανισμού εντός τη κοιλιά του. Η κατασκευή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως η πρώτη αναφορά στην ιστορία των ΜΕΑ.

1849: Οι Αυστριακοί εκπέμπουν περί τα 200 μη επανδρωμένα αερόστατα φορτωμένα με 15 κιλά εκρηκτικών εναντίον της πόλης της Βενετίας (πρώτη αναφορά αποστολής ΜΕΑ για στρατιωτικό σκοπό).

1883: Ο Βρετανός Douglas Archibald προσαρμόζει ένα ανεμόμετρο στο νήμα ενός χαρταετού και υπολογίζει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 365 μέτρων.

1887: Ο ίδιος, προσαρμόζει φωτογραφική μηχανή επί χαρταετού και εκτελεί λήψεις απ’ αέρος (πρώτη αναφορά αναγνωριστικού ΜΕΑ).

1914-1918 (Α΄ ΠΠ): Ο Charles Kettering κατασκευάζει ένα μη επανδρωμένο αερόχημα τύπου διπλάνου (Φωτο. 1.1.1), που ονομάστηκε “Kettering Aerial Torpedo” (Ιπτάμενη Τορπίλη του Kettering) ή όπως αλλιώς είναι γνωστό, “Kettering Bug” ή “Bug” (“Έντομο του Kettering” ή “Έντομο”). Το “Έντομο” είχε την ικανότητα να μεταφέρει 81,624 κιλά ισχυρών εκρηκτικών με ταχύτητα 64-88 χμ/ώρα, προκειμένου να πλήξει στόχους σε μεγάλη απόσταση. Προς το στόχο κατευθυνόταν με τη βοήθεια προκαθορισμένων ρυθμίσεων. Όταν βρισκόταν πλησίον αυτού, οι πτέρυγες αποσπώνταν από τη άτρακτο προκειμένου αυτή να συνεχίσει να κινείται σαν κοινή βόμβα.

1924: Ο Archibald Montgomery Low, γνωστός και ως “ Πατέρας των Κατευθυνόμενων Συστημάτων με Ραδιοκύματα ”, πραγματοποιεί τη πρώτη πτήση ΜΕΑ, ελεγχόμενου εξ’ αποστάσεως με ραδιοκύματα.

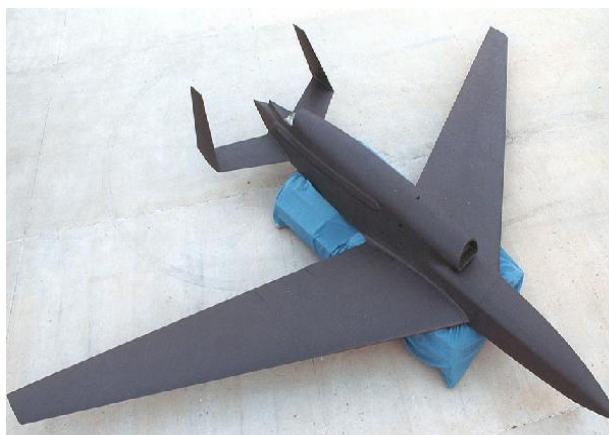
1933: Στη Βρετανία εκτοξεύεται ΜΕΑ τύπου διπλάνου από πλοίο προκειμένου να αντιμετωπιστεί ως κινούμενος εναέριος στόχος. Τα οπλικά συστήματα δεν κατορθώνουν να το καταρρίψουν.



Φωτο. 1.1.1

1939-1945 (Β΄ ΠΠ): Συστήνεται η Radioplane Company η οποία κατασκευάζει χιλιάδες ΜΕΑ-στόχους κατά τη διάρκεια του πολέμου. Από την άλλη πλευρά, η Γερμανία κατασκευάζει και χρησιμοποιεί τους φονικούς πυραύλους V1 και V2 προξενώντας τρομακτικές καταστροφές στη πόλη του Λονδίνου.

1955-1975 (πόλεμος του Βιετνάμ): Ο στρατός των ΗΠΑ χρησιμοποιεί ΜΕΑ για πρώτη φορά σε αποστολές αναγνώρισης. Αυτά εκτοξεύονται από αεροσκάφη C-130 και περισυλλέγονται με τη βοήθεια ειδικά διαμορφωμένων αλεξιπτών. Το βασικότερο ΜΕΑ που λαμβάνει μέρος στις επιχειρήσεις είναι το Ryan Firefly (φωτ. 1.1.2).



Φωτο. 1.1.2

1979: Αναπτύσσεται το σύστημα Aquila, ένα από τα πρώτα ολοκληρωμένα Συστήματα ΜΕΑ στην ιστορία, το πιο σημαντικό ως προς την πληρότητα του αλλά και δύσχρηστο λόγω των διαστάσεων και του όγκου του.

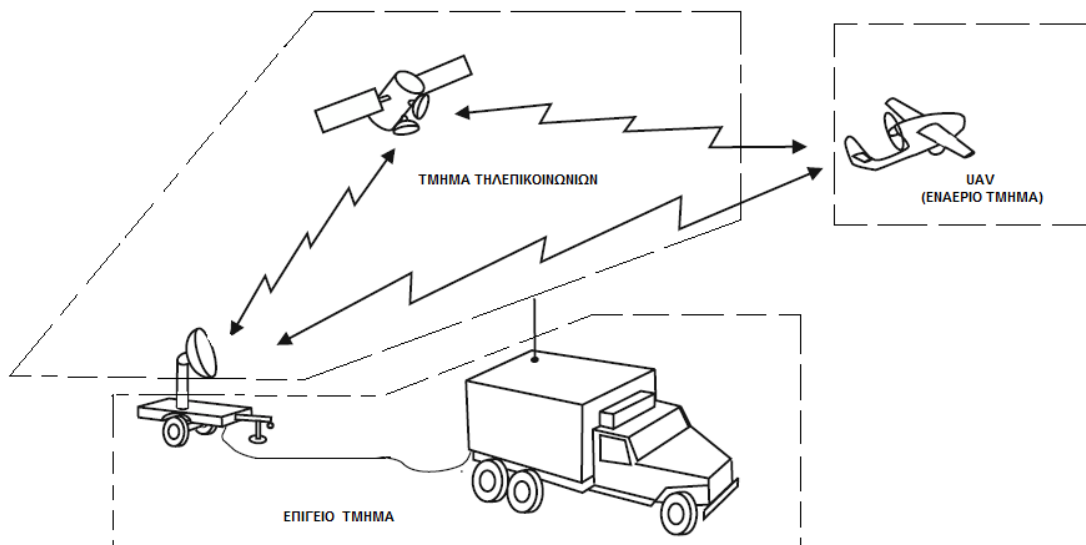
1982: Ο Ισραηλινός στρατός εξουδετερώνει το Σύστημα Αεράμυνας της Συρίας στη κοιλάδα Μπεκάα χρησιμοποιώντας ΜΕΑ για αναγνώρισεις, παρεμβολές και εξαπάτηση. Το γεγονός αυτό ωθεί τις ΗΠΑ σε προσπάθειες για περαιτέρω ανάπτυξη των εν λόγω συστημάτων επαναφέροντας στην επιφάνεια το σύστημα Aquila. Έκτοτε, η

τεχνολογία των συστημάτων MEA ακολουθεί ιδιαίτερα ανοδική πορεία τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε άλλες οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες παγκοσμίως .

Οι παραπάνω αναφορές προκύπτουν επί τω πλείστω από στρατιωτικές εφαρμογές, γεγονός που δικαιολογεί το συμπέρασμα ότι η ιδέα των συστημάτων MEA γεννήθηκε και αναπτύχθηκε για να εξυπηρετήσει στρατιωτικούς σκοπούς. Ωστόσο , με τη πάροδο του χρόνου διαπιστώθηκε η χρησιμότητα αυτών των συστημάτων και για ανθρωπιστικούς σκοπούς . Η σημασία των MEA και οι σκοποί που εξυπηρετούν θα αναπτυχθούν σε επόμενη ενότητα αυτού το κεφαλαίου.

1.2 Διάκριση μεταξύ MEA (UAVs, Unmanned Aerial Vehicles) και Συστημάτων MEA (UASs, Unmanned Aircraft Systems)

Καθώς η τεχνολογία των MEA (UAVs) εξελισσόταν και οι σκοποί που αυτά θα εξυπηρετούσαν , διαφοροποιούνταν, προέκυψε η ανάγκη για διάκριση μεταξύ των εννοιών αυτών και των (ολοκληρωμένων) Συστημάτων MEA (UASs) [1], [3],[4]. Μπορεί να ειπωθεί ότι ένα MEA ,ως διακριτό σύστημα με τα επιμέρους απάρτιά του(αερόχημα , μηχανισμοί ελέγχου , όργανα καταγραφής κτλ), θεωρείται ξεχωριστό υποσύστημα-τμήμα της ευρύτερης έννοιας ενός ΣΜΕΑ. Τα λοιπά βασικά τμήματα που συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο UAS είναι το επίγειο και το τμήμα των τηλεπικοινωνιών, οι έννοιες των οποίων θα αναπτυχθούν παρακάτω. Το χονδρικό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2.1. Σημειώνεται επίσης ότι ένα ΣΜΕΑ μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερα του ενός, MEA.



Σχήμα 1.2.1

Μια ακόμα αναγκαία διάκριση που προέκυψε είναι αυτή μεταξύ των όρων “UAV”(MEA), “Drone” (δεν υφίσταται ακριβής απόδοση στην ελληνική γλώσσα) και “Radio- Controlled model aircraft” (ελεγχόμενο- με- ραδιοκύματα μοντέλο αεροχήματος) [4]. Τα ραδιοελεγχόμενα μοντέλα είναι οι γνωστές από το χώρο του αερομοντελισμού κατασκευές, που εξυπηρετούν κυρίως σκοπούς αναψυχής και προϋποθέτουν την άμεση οπτική επαφή με το χειριστή. Τα αεροχήματα τύπου Drone δεν απαιτούν οπτική επαφή. Δεν διαθέτουν όμως και την απαραίτητη “νοημοσύνη” που θα τα καταστήσει “αυτόνομα” κατά τη διάρκεια της πτήσης τους. Απλώς, εκτοξεύονται και ακολουθούν μια προγραμματισμένη πορεία χωρίς να μεταδίδουν στον χειριστή τα δεδομένα που λαμβάνουν, παρά μόνο όταν και εφόσον περισυλλεχθούν μετά το πέρας της πτήσης τους. Ο όρος UAV αντίθετα, αναφέρεται σε αεροχήματα που χαρακτηρίζονται από κάποιο βαθμό “νοημοσύνης”. Το στοιχείο αυτό τους επιτρέπει την άμεση ανταλλαγή δεδομένων με τον χειριστή, τόσο αυτών που λαμβάνονται από τα εποχούμενα μέσα καταγραφής όσο και αυτών που αφορούν την κατάσταση τους (ταχύτητα ,υψόμετρο, στάθμη καυσίμων κτλ.). Τους επιτρέπει επίσης (σε πιο εξελιγμένες περιπτώσεις) την αυτόματη διάγνωση και επίλυση προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια τις αποστολής τους.

Στη συνέχεια και σύμφωνα με τα παραπάνω, θα χρησιμοποιείται ο όρος MEA (UAV) προκειμένου να περιγραφεί το εναέριο τμήμα ενός ΣΜΕΑ(UAS).

1.3 Συνοπτική παρουσίαση των στοιχείων που συνθέτουν ένα ΣΜΕΑ (UAS).

Έχοντας από προηγουμένως κατανοήσει τη διαφορά μεταξύ των εννοιών “ Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος (UAV) ” και “Σύστημα Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (UAS)” , μπορούμε να προχωρήσουμε στη ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος στα επιμέρους στοιχεία του και στη συνοπτική παρουσίαση αυτών. Κάθε στοιχείο, επιτελεί ξεχωριστό έργο και η αλληλεπίδραση αυτών είναι βασική προϋπόθεση για τη διεκπεραίωση των αποστολών που θα αναλάβει ένα ΣΜΕΑ [1],[3],[4].

i. *Αερόχημα:* Περιλαμβάνει τον κορμό και τα συστήματα προώθησης, πλοήγησης , τηλεπικοινωνιών και παροχής ηλεκτρικής ισχύος. Είναι ο ιπτάμενος φορέας του υλικού που θα εκτελέσει την εκάστοτε επιχείρηση (μέσα παρατήρησης και καταγραφής, ραντάρ, οπτικά συστήματα κτλ). Ενδέχεται να είναι τύπου αεροσκάφους, αερόστατου-αερόπλοιου, ελικοπτέρου ή πιο σύνθετου τύπου.

ii. *Επιχειρησιακός Φόρτος:* Περιλαμβάνει, ανάλογα με το μέγεθος του ΣΜΕΑ και τη φυσιογνωμία της αποστολής, τα συστήματα που απαιτούνται για την καθαυτή εκτέλεσή της. Αυτά μπορεί να είναι:

- Κάμερες για λήψη φωτογραφιών ή βίντεο και συσκευές αποθήκευσης.
- Όργανα νυχτερινής παρατήρησης.
- Ραντάρ για ανίχνευση στόχων.
- Συσκευές laser κατάδειξης στόχου.
- Οπτικά συστήματα .
- Όργανα δειγματοληψίας και ανάλυσης ατμοσφαιρικού αέρα.
- Συσκευές για γεωργικούς ψεκασμούς απ’ αέρος κα.

iii. *Σταθμός Ελέγχου:* Αποτελεί τη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής και είναι το κέντρο ελέγχου των λειτουργιών του Αεροχήματος και του επιχειρησιακού φόρτου. Ο τύπος του εξαρτάται από το μέγεθος του ΣΜΕΑ. Μπορεί να είναι από ένας ειδικά διαμορφωμένος χαρτοφύλακας έως και ένας ολόκληρος θάλαμος. Περιλαμβάνει όλα τα συστήματα που απαιτούνται για τον εξ αποστάσεως χειρισμό του αεροχήματος και του επιχειρησιακού φόρτου και σε κάποιες των περιπτώσεων, για τη σχεδίαση αποστολών από το επιτελείο. Το κέντρο ελέγχου μπορεί να είναι επίγειο (σταθερό ή κινητό) ή εποχούμενο σε κάποιο επανδρωμένο ιπτάμενο ή θαλάσσιο μέσο.

iv. *Τηλεπικοινωνίες:* Βασική προϋπόθεση για τη διεκπεραίωση της εκάστοτε αποστολής είναι η επίτευξη των ασυρμάτων ζεύξεων μεταξύ Κέντρου Ελέγχου και ΜΕΑ-συστημάτων Επιχειρησιακού Φόρτου, για αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων. Τα δεδομένα που μεταδίδονται από το Κέντρο Ελέγχου αφορούν την λειτουργία του Αεροχήματος (καθορισμός πορείας, πλοήγηση κτλ) και το χειρισμό των συστημάτων που απαρτίζουν τον Επιχειρησιακό Φόρτο. Η μετάδοσή τους πραγματοποιείται σε συχνότητες της τάξης των kHz. Στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων μεταδίδονται, από το Αερόχημα προς το Κέντρο Ελέγχου, δεδομένα που αφορούν την κατάσταση του (θέση, ταχύτητα, επίπεδα καυσίμου, βλάβες κτλ). Οι πληροφορίες που προκύπτουν από τον Επιχειρησιακό Φόρτο (φωτογραφίες, βίντεο, δεδομένα από ραντάρ κτλ) μεταδίδονται προς το Κέντρο Ελέγχου σε υψηλότερες συχνότητες. Ειδικά για τις στρατιωτικές εφαρμογές, οι ζεύξεις θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από δυνατότητες εξασφάλισής τους από απειλές ηλεκτρονικού πολέμου. Σε περίπτωση που το ΣΜΕΑ περιλαμβάνει περισσότερα του ενός ΜΕΑ το σύστημα Τηλεπικοινωνιών γίνεται ακόμα πιο σύνθετο.

v. *Συστήματα Εκτόξευσης και Περισυλλογής ΜΕΑ:* Σε περιπτώσεις μεγάλου μεγέθους Αεροχημάτων που δεν έχουν δυνατότητα καθέτου απογείωσης και η μορφολογία του εδάφους δεν εξασφαλίζει την ύπαρξη κατάλληλου αεροδιαδρόμου που θα επιτρέψει την ανάπτυξη της απαιτούμενης για απογείωση ταχύτητας, προϋποτίθεται η ύπαρξη ειδικού συστήματος εκτόξευσης. Αυτό συνήθως έχει τη μορφή κεκλιμένου επιπέδου επί του οποίου επιταχύνεται με κάποιο μηχανισμό (ειδικά λάστιχα, συμπιεσμένος αέρας ή πρωθητικός πύραυλος) το Αερόχημα προκειμένου να αναπτύξει την επιθυμητή ταχύτητα. Στην περίπτωση της προσγείωσης απουσία αεροδιαδρόμου, χρησιμοποιούνται συστήματα περισυλλογής όπως ειδικά αλεξίπτωτα, δίχτυα κα.

vi. *Εξοπλισμός Υποστήριξης:* Περιλαμβάνει οτιδήποτε έχει σχέση με τη συντήρηση, τον ανεφοδιασμό και την μεταφορά των στοιχείων ενός ΣΜΕΑ (εργαλεία, ανταλλακτικά, δεξαμενές καυσίμων, φορητά, κτλ) καθώς και με τις ανάγκες του προσωπικού που το υπηρετεί (σίτιση, μεταφορά κτλ).

1.4 Κατηγορίες των UAVs

Η ποικιλομορφία και η συνεχής εξέλιξη των ΜΕΑ (UAVs) καθιστά δύσκολη την ακριβή κατηγοριοποίηση τους κατά συγκεκριμένο τρόπο. Ωστόσο, ως βασικά κριτήρια έχουν επικρατήσει αυτά των δυνατοτήτων και του μεγέθους ενός ΜΕΑ(UAV). Βάσει αυτών, προκύπτουν οι εξής κατηγορίες [3],[4]:

i. *Αντοχή σε Μεγάλο Υψόμετρο (HALE – High altitude long endurance):* Λειτουργία σε υψόμετρο μέχρι και 15000 μέτρα επί 24ωρο. Δύνανται να φέρουν οπλισμό και ο χειρισμός τους γίνεται από σταθερές βάσεις-σταθμούς ελέγχου.

ii. *Αντοχή σε Μεσαίο Υψόμετρο (MALE – Medium altitude long endurance):* Δυνατότητα λειτουργίας σε υψόμετρο 5000–15000 μέτρα επί 24ωρο. Μικρότερη ακτίνα δράσης σε σχέση με τη προηγούμενη κατηγορία αλλά μεγαλύτερη των 500 χιλιομέτρων.

iii. *Μέσης ακτίνας δράσης ή Τακτικά UAV(TUA –Medium Range or Tactical UAV):* Ακτίνα δράσης 100-300 χιλιόμετρα.

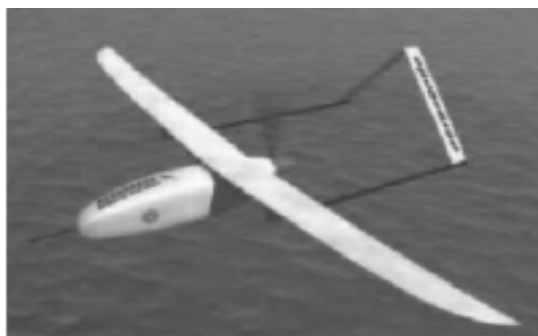
iv. *Μικρής ακτίνας δράσης (Close-Range UAV):* Ακτίνα δράσης έως 100 χιλιόμετρα.

v. *Mini UAV (MUAV):* Ακτίνα δράσης 30 έως χιλιόμετρα. Βάρος 20 χιλιογράμμων περίπου.

vi. *Micro UAV (MAV):* Λειτουργία εντός κτιρίων. Ανάπτυγμα πτερύγων μικρότερο από 150 χιλιοστά.

Ένα ακόμα κριτήριο με βάση το οποίο μπορούν να κατηγοριοποιηθούν τα UAVs είναι η μέθοδος ανύψωσης και πτήσης που τα χαρακτηρίζει κατασκευαστικά. Σύμφωνα με αυτό, προκύπτουν οι εξής κατηγορίες: [3]

α. *Σταθερών πτερύγων (Fixed-wing UAVs):* Προϋποθέτουν ύπαρξη αεροδιαδρόμου ή συστήματος εκτόξευσης για την απογείωσή τους. Επιτυγχάνουν πτήσεις μεγάλης διάρκειας και ταχύτητας (Φωτο 1.3.1).



Φωτο. 1.3.1

β. *Περιστρεφόμενων πτερύγων ή Καθέτου Απογείωσης-Προσγείωσης (Rotary-wing or vertical take-off and landing UAVs):* Χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα αιώρησης και ευχέρειας επίτευξης ελιγμών (Φωτο 1.3.2).



Φωτο. 1.3.2

γ. *UAVs τύπου μικρού αερόστατου (Blimps):* Είναι χαρακτηριστικά για τη μορφή και το μεγάλο μέγεθος τους. Επιτυγχάνουν πτήσεις μεγάλης διάρκειας αλλά χαμηλής ταχύτητας (Φωτο 1.3.3).



Φωτο. 1.3.3

δ. *Παλλόμενων Πτερύγων (Flapping-wing UAVs):* Ίπτανται προσομοιώνοντας τον τρόπο πτήσης των πουλιών(Φωτο 1.3.4).



Φωτο. 1.3.4

ε. Υβριδικά ή μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών(Hybrid configurations or convertible configurations):Συνδιάζουν κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα των 2 πρώτων κατηγοριών (Φωτο 1.3.5).



Φωτο. 1.3.5

1.5 Αποστολές των ΜΕΑ(UAVs) και Πλεονεκτήματα τους έναντι των Επ-ανδρωμένων Αεροχημάτων.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η ιδέα των ΜΕΑ (UASs) αναπτύχθηκε για να εξυπηρετήσει πολεμικούς σκοπούς. Με το πέρασμα του χρόνου, οι ανάγκες στο πεδίο της μάχης, η συνεχής έρευνα , η εξέλιξη και η αξιοποίηση των συστημάτων αυτών διαμόρφωσαν και τις αποστολές που δύνανται να αναλάβουν στα σύγχρονα θέατρα επιχειρήσεων. Αυτές επιγραμματικά είναι οι κάτωθι[1], [3], [4] :

- *Επιτήρηση της εχθρικής κατάστασης.*
- *Αναγνώρισεις.*
- *Κατάδειξη στόχων για καταστροφή από επίγεια, εναέρια ή από θαλάσσης πυρά.*
- *Μεταφορά και εκτόξευση πυρών.*
- *Διεξαγωγή ηλεκτρονικού πολέμου.*
- *Εντοπισμός και περιγραφή Ραδιολογικών-Βιολογικών-Χημικών(PBX) απειλών.*

Εκτός των στρατιωτικών εφαρμογών και λόγω των δυνατοτήτων που τα χαρακτηρίζουν, τα ΣΜΕΑ(UASs) σήμερα αναλαμβάνουν και αποστολές ανθρωπο-κεντρικού χαρακτήρα. Οι εφαρμογές αυτές κατατάσσονται στις επόμενες κατηγορίες:

- *Περιβαλλοντολογικές.*
- *Αντιμετώπισης καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης.*
- *Βελτιστοποίησης των τηλεπικοινωνιών.*
- *Επιτήρησης Εκτάσεων και Εγκαταστάσεων.*
- *Λοιπές όπως, αεροφωτογραφίσεις, γεωργικοί αεροψεκασμοί, μεταφορές κ.α.*

Έχοντας υπόψη τις αποστολές (στρατιωτικού και ανθρωποκεντρικού χαρακτήρα), μπορούν να προκύψουν κάποια από τα πλεονεκτήματα των MEA (UAVs) έναντι των επανδρωμένων αεροχημάτων, όπως [4]:

- Εξάλειψη των μειονεκτημάτων της ανθρώπινης φύσης (σωματική και ψυχολογική κόπωση, περιορισμένη όραση, δύσκολη εκπαίδευση κτλ).
- Εξασφάλιση του προσωπικού έναντι κινδύνων που μπορεί να χαρακτηρίζουν μία αποστολή (αντιαεροπορικά πυρά, τοξικές ουσίες κτλ).
- Έχουν μικρότερο μέγεθος και σε συνδιασμό με stealth τεχνολογία στην κατασκευή τους, είναι λιγότερο ευάλωτα στα εχθρικά πυρά και παρατήρηση . Ιδανικά για αποστολές που απαιτούν πλήρη μυστικότητα.

Πλεονεκτήματα προκύπτουν και από οικονομικής απόψεως [4]:

- Χαμηλότερο κόστος κατασκευής έναντι των επανδρωμένων αεροχημάτων λόγω μικρότερου μεγέθους και πολυετούς εμπειρίας και τεχνογνωσίας.
- Χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων.
- Μείωση εξόδων για εκπαίδευση, πληρωμή και ασφάλιση του προσωπικού.

Βάσει των παραπάνω και με δεδομένη την συνεχή εξέλιξη των συστημάτων, ίσως να μην αποτελεί υπερβολή η άποψη ότι στο απώτερο μέλλον τα επανδρωμένα αεροσκάφη θα εκλείψουν. Το σίγουρο όμως είναι ότι τα MEA θα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης καθημερινότητας.

1.6 Εφαρμογή Τεχνολογίας STEALTH (ή Low Observability-Χαμηλής Παρατηρησιμότητας) στα MEA.

Στις αποστολές στρατιωτικού χαρακτήρα (ή και μη στρατιωτικού, σε ορισμένες περιπτώσεις) που αναλαμβάνει ένα ΣΜΕΑ, η μυστικότητα αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εκτέλεσή τους και αφορά κυρίως τα MEA (Αερόχημα-Επιχειρησιακός Φόρτος). Αυτά, όντας εκτεθειμένα στον ουρανό, είναι δυνατόν να εντοπιστούν εγκαίρως από ηλεκτρονικά μέσα, γεγονός που κατά πάσα πιθανότητα θα προκαλέσει την αποτυχία της αποστολής ή ακόμα και την καταστροφή τους.

Τα στοιχεία που καθιστούν ανιχνεύσιμο ένα MEA είναι [4], [5] τα μήκη κύματος που εκπέμπει στην ορατή (0.4–0.7 μm) , ακουστική(16 m–2 cm) και υπέρυθρη (IR, 0.75 μm –1 mm) περιοχές του φάσματος και στη περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (RF, 3 mm–3 cm). Λόγω της κατασκευαστικής φύσης των MEA (μικρό μέγεθος, κατάλληλη βαφή εξωτερικής επιφάνειας, λιγότερο θορυβώδης κινητήρας έναντι των Επανδρωμένων Αεροχημάτων), οι ορατές και ακουστικές συχνότητες δεν αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την έγκαιρη ανίχνευσή τους. Αντίθετα, οι εκπομπές ραδιοσυχνοτήτων από τα τηλεπικοινωνιακά συστήματά τους ή η ανακλώμενη ακτινοβολία σε περίπτωση που “φωτιστούν” από κάποιο σύστημα RADAR καθώς και η υπέρυθρη ακτινοβολία λόγω θερμότητας των MEA, είναι δυνατόν να ανιχνευθούν ακόμα και αν τα συστήματα εντοπισμού βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από αυτά.

Στη περίπτωση των τηλεπικοινωνιών μεταξύ MEA και Σταθμού Ελέγχου, η δυνατότητα μη-εντοπισμού επιτυγχάνεται με χρήση στενής δέσμης ακτινοβολίας για τη

πραγματοποίηση των εκπομπών. Σημαντικός είναι επίσης ο περιορισμός του αριθμού και του χρόνου διάρκειας αυτών στο βαθμό που είναι δυνατόν να συμβεί. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη συστημάτων που θα εξασφαλίζουν την απαραίτητη αυτονομία και ανεξαρτητοποίηση του MEA από το Σταθμό Ελέγχου.

Για τις περιπτώσεις της ανακλώμενης ακτινοβολίας όταν το MEA φωτιστεί από κάποιο RADAR και της υπέρυθρης λόγω της αναπτυσσόμενης θερμότητας η επίτευξη μη-ανιχνευσιμότητας γίνεται πιο δύσκολη υπόθεση. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή στοιχείων της τεχνολογίας STEALTH (ή Low Observability) στον σχεδιασμό και κατασκευή τους προκειμένου να καταστούν χαμηλής παρατηρησιμότητας. Για να γίνει όμως κατανοητή η έννοια αυτής της τεχνολογίας πρέπει να ληφθεί υπόψη ο τρόπος με τον οποίο τα συστήματα εντοπισμού που εκμεταλλεύονται τις παραπάνω συχνότητες, επιτυγχάνουν τον σκοπό τους.

Πιο συγκεκριμένα και με πολύ απλά λόγια, η ιδέα ενεργείας των συστημάτων RADAR βασίζεται στο φαινόμενο κατά το οποίο όταν ένα αγωγίμο αντικείμενο ακτινοβολείται από κάποιο H/M κύμα, τότε καθίσταται και το ίδιο ακτινοβολητής επανεκπέμποντας προς διάφορες κατευθύνσεις. Βάσει αυτού και προκειμένου να εντοπίσει στόχους στον ουρανό ένα σύστημα RADAR, εκπέμπει H/M κύματα κατάλληλης ισχύος σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Σχεδόν ταυτόχρονα, λειτουργώντας και ως δέκτης (εφόσον το RADAR είναι μονοστατικό, δηλαδή η κεραία του έχει διπλό ρόλο), λαμβάνει την επανεκπεμπόμενη από τους στόχους ακτινοβολία σε πολύ χαμηλό επίπεδο ισχύος αποκαλύπτοντας έτσι την ύπαρξή τους, εφόσον το επίπεδο ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Σημειώνεται επίσης ότι από τη στιγμή που το RADAR αντιληφθεί τον στόχο, δύναται να υπολογίσει τόσο τη απόσταση όσο και την ταχύτητά του, βασιζόμενο σε μεθόδους που δεν κρίνεται αναγκαίο να αναπτυχθούν στη παρούσα φάση [6].

Το επίπεδο ισχύος της ανακλώμενης από στόχο ακτινοβολίας προς κάποια κατεύθυνση εκφράζεται με την έννοια της ραδιοδιατομής ή ενεργού διατομής RADAR (RADAR CROSS SECTION, RCS) του στόχου η οποία αποτελεί το μέτρο της ανακλαστικότητάς του. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η ραδιοδιατομή ενός στόχου τόσο πιο εύκολα μπορεί να ανιχνευτεί από απόσταση. Παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη παράμετρο είναι η γεωμετρία του στόχου, το υλικό της επιφάνειάς του, η συχνότητα της προσπίπτουσας H/M ακτινοβολίας, οι γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης της, ενώ είναι ανεξάρτητη από τη ισχύ εκπομπής και τη απόσταση στόχου-RADAR. [7]

Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα, ότι ένα MEA δύναται να παραμείνει αθέατο από ένα σύστημα RADAR που το "φωτίζει" με H/M ακτινοβολία, εφόσον εμφανίζει μικρή ραδιοδιατομή. Στη τεχνολογία STEALTH η δυνατότητα αυτή επιτυγχάνεται κυρίως με τους εξής τρόπους [4], [6], [7], [9] :

- Κατάλληλη μορφοποίηση του σχήματος του MEA: αφορά κυρίως τον γεωμετρικό προσανατολισμό των εξωτερικών επιφανειών του και τη εξάλειψη εσοχών και κοίλων επιφανειών με σκοπό την επανεκπομπή της προσπίπτουσας H/M ακτινοβολίας προς κατευθύνσεις άσχετες από αυτήν του RADAR. Επιδρά αρνητικά στην αεροδυναμική, την ευστάθεια και τις επιδόσεις.

- Κατασκευή μερών του αεροχήματος από ημιδιαφανή σε ακτινοβολίες RADAR υλικά (Kevlar, γυαλί): ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος εφόσον τα προς κατά-σκευή μέρη δεν χαρακτηρίζονται από μικρό πάχος και δεν εσωκλείουν μεταλλικά αντικείμενα.

- Επικάλυψη επιφάνειας με υλικά που απορροφούν την H/M ακτινοβολία (Radar-Absorbent Materials, RAM): τα υλικά αυτά έχουν την δυνατότητα να απορροφούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία και να την μετατρέπουν σε θερμότητα μειώνοντας το

ποσοστό της ανακλώμενης. Δεν εμφανίζουν την ίδια αποτελεσματικότητα σε όλες τις συχνότητες ενώ εκτεταμένη χρήση τους αυξάνει το βάρος του αεροχήματος.

Όσον αφορά τα συστήματα ανίχνευσης [4], [5] που εκμεταλλεύονται την Υπέρυθρη Ακτινοβολία (Infrared, IR) που εκπέμπει ένα MEA (λόγω του κινητήρα και των καυσαερίων του καθώς και λόγω της τριβής του με τα μόρια του αέρα), ο τρόπος εντοπισμού βασίζεται στη σύγκριση της IR ακτινοβολίας των θερμών μερών του MEA

(8-12 μm) σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος του (ατμοσφαιρικός αέρας, 3-4 μm). Προκειμένου λοιπόν να καταστεί ένα MEA Χαμηλής Παρατηρησιμότητας ως προς αυτά τα συστήματα , επιδιώκεται η τοποθέτηση του κινητήρα εντός του κορμού του αεροχήματος με το ανάλογο σύστημα ψύξης. Αντίστοιχα συστήματα είναι απαραίτητα τόσο για τη ψύξη του κορμού όσο και των καυσαερίων. Σε αυτή τη κατεύθυνση είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί και η ροή του αέρα γύρω από το αεροχέμα σε συνδιασμό με κατάλληλο σχεδιασμό των αεραγωγών και των εξαγωγών των καυσαερίων .

1.7 Λειτουργική αυτονομία των MEA και δράση σε ομάδες-σχηματισμούς.

Στα πλαίσια της συνεχούς ανάπτυξης και εξέλιξης των ΣΜΕΑ , η λειτουργική αυτονομία των MEA αποτελεί βασική επιδίωξη των ερευνών. Στόχος είναι ο περιορισμός της ανθρώπινης παρέμβασης κατά την εκτέλεση μιας αποστολής στον ελάχιστο δυνατό βαθμό με παράλληλη ανάπτυξη της “νοημοσύνης” των MEA που θα την υποκαταστήσει. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις προκειμένου “να ενεργούν από μόνα τους” στη διάρκεια μια αποστολής , προσαρμοζόμενα στις εκάστοτε συνθήκες. Το γεγονός αυτό τους δίνει επιπλέον τη δυνατότητα συνεργασίας με άλλα MEA, των ίδιων ή διαφορετικών χαρακτηριστικών και ικανοτήτων. Η σημασία αυτής της δυνατότητας θα περιγραφεί παρακάτω.

Η έννοια της αυτονομίας αφορά κυρίως την δυνατότητα σχεδίασης και προσαρμογής, από το ίδιο το MEA και όχι από τον άνθρωπο-χειριστή ,του δρομολογίου που θα ακολουθήσει κατά την εκτέλεση της αποστολής καθώς και διατήρησή του επ’ αυτού, σε περιπτώσεις αποκλίσεων. Άλλα στοιχεία της λειτουργικής αυτονομίας είναι η ικανότητα αυτοδιάγνωσης προβλημάτων, η λήψη αποφάσεων για εναλλακτικές μεθόδους εκτέλεσης μιας αποστολής και η δυνατότητα συνέχισης της ακόμα και σε περίπτωση προβληματικής επαφής με το Σταθμό Ελέγχου . Όπως γίνεται κατανοητό , η επίτευξη αυτονομίας κάθε άλλο παρά εύκολη υπόθεση είναι. Προϋποθέτει την ύπαρξη συστημάτων όπως, αισθητήρες (που θα λαμβάνουν δεδομένα για το περιβάλλον και την κατάσταση του MEA), ισχυρά υπολογιστικά συστήματα και συστήματα αυτομάτου ελέγχου (για την επεξεργασία των δεδομένων και τη λήψη αποφάσεων) καθώς και συστήματα τηλεπικοινωνιών (για την αλληλεπίδραση με το Σταθμό Ελέγχου ή τα άλλα συνεργαζόμενα MEA). Ο δύσκολος σχεδιασμός και υλοποίηση καθώς και η πολύπλοκη συνεργασία αυτών των συστημάτων είναι το αντίτιμο της απουσίας της ανθρώπινης νοημοσύνης .

Όπως αναφέρθηκε, ένα MEA που χαρακτηρίζεται από αυτονομία έχει τη δυνατότητα να σχεδιάζει τα δρομολόγια (planning path) στα οποία θα κινηθεί, καθώς και να τα επαναπροσδιορίζει κάθε φορά που αυτό απαιτείται λόγω αλλαγών των δεδομένων (εμπόδια ,αλλαγή καιρικών συνθηκών κτλ) κατά τη διάρκεια της αποστολής. Ο σχεδιασμός βέβαια είναι εφικτός μόνο εφόσον υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα που θα καθορίσουν τους έμμεσους στόχους η επίτευξη των οποίων θα οδηγήσει στην

ολοκλήρωση της. Τα δεδομένα αυτά τροφοδοτούνται στα συστήματα που συνιστούν την τεχνητή “νοημοσύνη” του ΜΕΑ και βασιζόμενα σε αλγόριθμους [2] όμοιους με αυτούς που έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια της ρομποτικής προβαίνουν στην επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης προκειμένου να σχεδιασθούν διαδρομές που θα ικανοποιούν χρονικές και άλλες απαιτήσεις. Μεθοδολογίες-αλγόριθμοι που ακολουθούνται κατά την σχεδίαση δρομολογίων αναφέρονται στα [10], [11], [12], [13]. Προφανώς τα εν λόγω συστήματα πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλές επιδόσεις και η όλη διαδικασία πρέπει να έχει ιδιαίτερα δυναμικό χαρακτήρα ώστε να προσαρμόζεται ταχέως σε τυχούσες αλληπάλληλες αλλαγές της υφισταμένης κατάστασης.

Εξασφαλίζοντας τη δυνατότητα αυτόνομης σχεδίασης των τροχιών που θα ακολουθήσει και κατ’ επέκταση, και των επί μέρους αποστολών που θα εκτελέσει στα πλαίσια μιας ενιαίας και πιο σύνθετης αποστολής, ένα ΜΕΑ καθίσταται ικανό να αποτελέσει μέλος μιας ευρύτερης ομάδος. Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των ομάδων, που καλούνται και Σμήνη, (Swarms) είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων τους ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη συνεργασία τους για την αποτελεσματικότερη διεκπεραίωση αποστολών. Δεν θα ήταν ίσως υπερβολή να ειπωθεί ότι η ανάπτυξη και η λειτουργία αυτών των ομάδων βασίζεται στη φιλοσοφία συνόλων που εντοπίζονται στη φύση όπως μια αποικία μυρμηγκιών ή ένας σμήνος πουλιών [14],[15].

Η αυτονομία που χαρακτηρίζει κάθε ΜΕΑ μίας ομάδας δεν το καθιστά και ανεξάρτητο από τα άλλα. Αντιθέτως, στα πλαίσια αυτού “οφείλει να παρουσιάζει συγκεκριμένη συμπεριφορά” ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση του σχηματισμού και η αποφυγή συγκρούσεων με τα υπόλοιπα. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι επιβάλλεται και να γνωρίζει την κατάσταση όλων των άλλων ΜΕΑ. Αρκεί μόνο να διατηρεί σταθερή απόσταση με κάποιο κοντινό του, αυτό με άλλο κοκ [16], [17]. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην αποκέντρωση του ελέγχου της ομάδος, καθιστώντας τον ευκολότερη υπόθεση. Επαναλαμβάνεται όμως και εδώ η αναγκαιότητα για ύπαρξη ισχυρών συστημάτων που θα εξασφαλίζουν τη συλλογή και την ταχύτατη επεξεργασία δεδομένων προκαλώντας τις απαραίτητες συμπεριφορές των ΜΕΑ.

Τα πλεονεκτήματα της ομαδικής δράσης είναι προφανή και ανάλογα με τη μορφή της αποστολής. Για παράδειγμα, σε μια αποστολή αναγνώρισεων, περισσότερα του ενός ΜΕΑ θα καλύψουν μεγαλύτερη έκταση σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Αν κάποιο από αυτά καταστραφεί ή υποστεί βλάβη, τα υπόλοιπα θα καλύψουν την αποστολή του. Σε περίπτωση πιο σύνθετης αποστολής, αυτή θα διαιρεθεί σε επιμέρους απλούστερες και κάθε ΜΕΑ μπορεί να αναλάβει μία από αυτές. Ως πλεονέκτημα επίσης μπορεί να θεωρηθεί και η μείωση του απαιτούμενου προσωπικού χειρισμού αφού η αλληλεπίδραση μεταξύ των ΜΕΑ εξασφαλίζει ευκολότερο έλεγχο της ομάδος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Κινητικότητα (mobility) στοιχείων σχηματισμού ΜΕΑ.

2.1 Αυτοοργανωμένα ή κατ' απαίτηση (Ad hoc) Δίκτυα.

Όπως έχει αναφερθεί, η σύγχρονη τεχνολογία επιτρέπει πλέον εκτός από την ανεξάρτητη πτήση ενός μόνο ΜΕΑ , τον σχηματισμό ομάδων από αυτά εντός των οποίων τα στοιχεία αυτά αλληλεπιδρούν με ιδιαίτερα δυναμικό τρόπο προκειμένου να εκτελέσουν μια αποστολή. Η αλληλεπίδραση έγκειται σε διαρκή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ αυτών και προϋποθέτει την υλοποίηση ασύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Ο πλέον κατάλληλος τύπος δικτύων για αυτό το σκοπό είναι τα αυτοοργανωμένα ή κατ' απαίτηση (Ad hoc) δίκτυα.

Ένα ασύρματο αυτοοργανωμένο ή κατ' απαίτηση δίκτυο (Ad hoc : είναι λατινική φράση και σημαίνει “για αυτό το σκοπό”) είναι ένας αποκεντρωμένος τύπος ασύρματου δικτύου. Αυτός ο τύπος δικτύων δε βασίζεται σε κάποια προϋπάρχουσα υποδομή, όπως οι δρομολογητές (routers) στα ενσύρματα δίκτυα ή τα ασύρματα σημεία πρόσβασης (access points) στα διαχειριζόμενα ασύρματα δίκτυα. Ανάλογα με την εφαρμογή τους μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής :

- Κινητά ad hoc δίκτυα (MANET - Mobile Ad hoc NETWORKs)
- Ασύρματα δίκτυα πλέγματος (WMN - Wireless Mesh Networks)
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN - Wireless Sensor Networks)

Επίσης, ανάλογα με την περιοχή που δύνανται να καλύψουν αυτά τα δίκτυα, μπορούν να ταξινομηθούν [18] σε:

- Σώματος (Body (Body Area Network ,BAN)
- Προσωπικά (Personal Area Network, PAN)
- Τοπικά (Local Area Network, LAN)
- Μητροπολιτικά (Metropolitan Area Network, MAN)
- Ευρείας περιοχής (Wide area networks,WAN)

Τα δίκτυα αυτού του τύπου αποτελούνται από πολλαπλούς κόμβους, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να εισέρχονται ή να αποχωρούν από το δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή και από οποιοδήποτε σημείο του. Οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασυρμάτων ζεύξεων οι οποίες επηρεάζονται από:

- τους πόρους του κόμβου (π.χ. ισχύς πομπού, υπολογιστική ισχύς, μνήμη),
- τις ιδιότητες συμπεριφοράς (π.χ. αξιοπιστία)
- τις ιδιότητες της ζεύξης (π.χ. μήκος ζεύξης, απώλεια σήματος, παρεμβολές, θόρυβος).

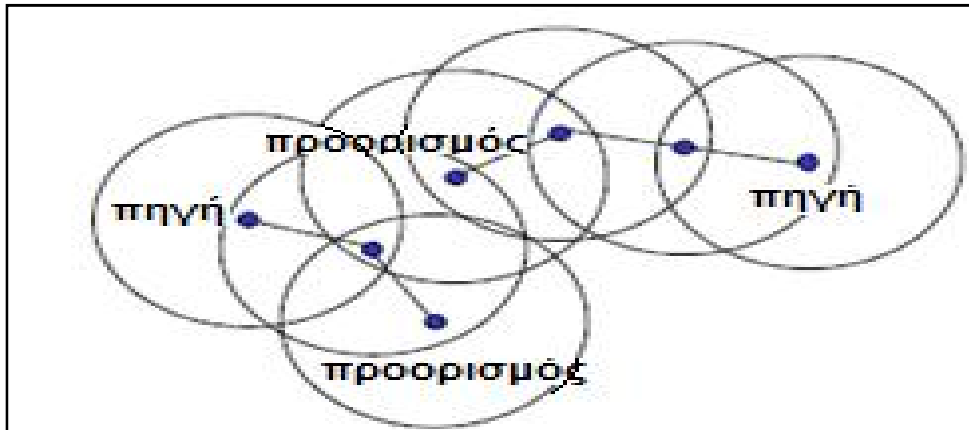
Οι ζεύξεις αυτές δύνανται να υλοποιούνται ή διακόπτονται ανά πάσα στιγμή. Κατά συνέπεια, ένα λειτουργικό ad hoc δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμοστεί σε κάθε πιθανή αναδιάρθρωση, με τρόπο που να είναι έγκαιρη, αποτελεσματική, αξιόπιστη, δυναμική και επεκτάσιμη. Γενικά, το δίκτυο θα πρέπει να επιτρέπει σε οποιοσδήποτε δύο

κόμβους να επικοινωνούν, διαβιβάζοντας την πληροφορία ακόμα και μέσω άλλων κόμβων. Στα περισσότερα ασύρματα ad hoc δίκτυα, οι κόμβοι συναγωνίζονται μεταξύ τους για την πρόσβαση στο κοινόχρηστο ασύρματο μέσο, καταλήγοντας συχνά σε συγκρούσεις (παρεμβολές).

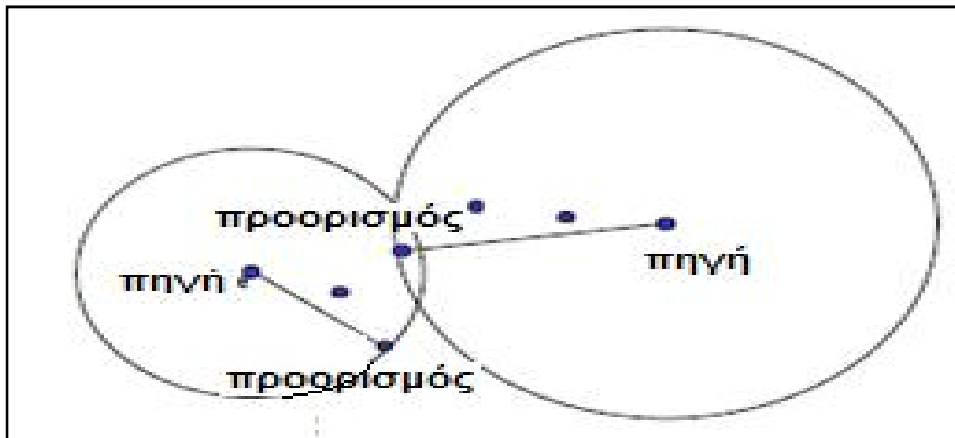
Οι κόμβοι μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους σε πολλά χαρακτηριστικά, όπως την υπολογιστική ισχύ, την ακτίνα εκπομπής ή την διάρκεια ζωής των μπαταριών (αν π.χ. είναι ένας φορητός υπολογιστής ή ένας PDA) και άλλα. Σε αυτή τη περίπτωση προκύπτει ένα ετερογενές δίκτυο ενώ, ως ομογενές χαρακτηρίζεται όταν όλοι οι κόμβοι έχουν τις ίδιες δυνατότητες μετάδοσης και χρησιμοποιούν το ίδιο σχέδιο πρόσβασης στο δίαυλο. Επιπλέον, τα διάφορα ad hoc δίκτυα μπορεί να διαφέρουν σε πολλά χαρακτηριστικά τους, όπως τους χρησιμοποιούμενους ρυθμούς επικοινωνίας, στο αν παρέχουν δυνατότητες broadcast ή multicast, στο αν συνυπάρχουν ή όχι με άλλα δίκτυα τα οποία έχουν κάποια σταθερή υποδομή ή τέλος, αν υποστηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών και με τι ρυθμούς.

Κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να λάβει και να προωθήσει δεδομένα σε άλλους κόμβους λαμβάνοντας έτσι ενεργό ρόλο κατά την δρομολόγηση των πακέτων, αφού εκτός από τα δικά του πακέτα προωθεί και τα πακέτα γειτονικών κόμβων. Ο καθορισμός δε, του ποιοι κόμβοι προωθούν δεδομένα, γίνεται δυναμικά με βάση τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Αυτή η δυνατότητα εξυπηρετεί περιπτώσεις που ο αποστολέας και ο παραλήπτης ενός πακέτου δεν βρίσκονται εντός της ακτίνας ο ένας του άλλου ή μόνο ο ένας από τους δύο βρίσκεται εντός της ακτίνας του άλλου. Κατά συνέπεια, η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου παίζει σημαντικό ρόλο σε κάθε ad hoc δίκτυο. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μικρότερος θα είναι ο μέσος αριθμός μεταδόσεων που θα απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου από ένα κόμβο σε κάποιον άλλο. Από την άλλη μεριά η μικρή ακτίνα εκπομπής των κόμβων μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων μεταξύ των κόμβων. Με άλλα λόγια, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα εκπομπής, τόσο περισσότερες μεταδόσεις θα μπορούν να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η ακτίνα μετάδοσης παίζει καθοριστικό ρόλο και στην κατανάλωση ενέργειας κάθε κόμβου, η οποία είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στα περισσότερα ad hoc δίκτυα. Έτσι, θα πρέπει να επιλέγεται ακτίνα μετάδοσης όσο το δυνατό μικρότερη, φροντίζοντας όμως ταυτόχρονα να μην είναι τόσο μικρή που το δίκτυο να παύει να είναι συνεκτικό .

Σε αυτές τις περιπτώσεις που ο αποστολέας και ο παραλήπτης ενός πακέτου δεν βρίσκονται εντός της ακτίνας ο ένας του άλλου ή , μόνο ο ένας από τους δύο βρίσκεται εντός της ακτίνας του άλλου και προκειμένου να αποφύγει τη συμφόρηση ένας κόμβος που προωθεί πακέτα, χρησιμοποιεί τους υπόλοιπους υλοποιώντας "πολλαπλά άλματα" [19]. Γενικά, η τοπολογία ενός ad hoc δικτύου μπορεί να επιτρέπει είτε πολλαπλά (multiple-hops, Σχήμα 2.1) άλματα είτε απλά (single-hop, Σχήμα 2.2) για τη μετάδοση των δεδομένων. Στα multiple-hops δίκτυα, αυξάνεται η καθυστέρηση μετάδοσης γεγονός όμως που αντισταθμίζεται από την αύξηση του ρυθμού πραγματοποίησης ζεύξεων η οποία με τη σειρά της επωφελεί την από-άκρη-σε-άκρη(end-to-end) καθυστέρηση[20] .Στη πραγματικότητα, τα δίκτυα αυτά είναι αναγκαία για την προσέγγιση απομακρυσμένων κόμβων στο διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων. Οι μεταδόσεις μεγάλης απόστασης όμως προκαλούν παρεμβολές και μειώνουν το διαθέσιμο ωφέλιμο εύρος (bandwidth) διότι αυξάνονται οι κόμβοι που ανταγωνίζονται για το ίδιο εύρος[21].



Σχήμα 2.1



Σχήμα 2.2

Συγκρίνοντας τις 2 υλοποιήσεις δικτύων διαπιστώνεται ότι[20] η multihop υλοποίηση είναι πλέον αποδοτική ως προς την single-hop, εφόσον:

- Αυξάνεται η κλιμάκωση δικτύωσης.
- Μειώνονται οι παρεμβολές.
- Αυξάνεται η συνολική απόδοση του δικτύου.
- Μειώνεται η καθυστέρηση που γίνεται αντιληπτή από την εφαρμογή.
- Μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας κατά τη μεταφορά δεδομένων.

Στα πλαίσια ενός τέτοιου δικτύου η εξασφάλιση αξιόπιστων ζεύξεων, ακόμα κι αν οι κόμβοι μετακινούνται, επιτυγχάνεται βάσει ειδικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης[22]. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε ένα παραδοσιακό δίκτυο για να καθορίσουν μία διαδρομή από έναν κόμβο-πηγή σε έναν κόμβο-προορισμό δεν μπορούν να

χρησιμοποιηθούν άμεσα στα κινητά ασύρματα ad hoc δίκτυα λόγω της ιδιαίτερα δυναμικής τοπολογίας και της έλλειψης κεντρικής διαχείρισης του δικτύου που προκαλούν

την αδυναμία προκαθορισμού των πόρων του. Ένα τέτοιο ειδικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να ικανοποιεί τις εξής προϋποθέσεις:

- Να είναι πλήρως καταναμημένο.
- Να προσαρμόζεται στις συχνές αλλαγές τοπολογίας.
- Ο καθορισμός των διαδρομών (μέσω υπολογισμών) και η συντήρησή τους να περιλαμβάνουν έναν ελάχιστο αριθμό κόμβων.
- Να περιορίζονται οι συγκρούσεις πακέτων.
- Να παρέχεται ένα ορισμένο επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας (QoS).
- Να χρησιμοποιούνται προσεκτικά οι περιορισμένοι πόροι (π.χ. εύρος ζώνης).

Στη περίπτωση των ομογενών δικτύων, αυτά τα πρωτόκολλα μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες[23]:

- Παγκόσμια, προϋπολογισμένη δρομολόγηση.
- Κατ' απαίτηση δρομολόγηση.
- Δρομολόγηση βάσει τοποθεσίας.
- Υπερχείλιση (πλημμύρα).

Σχετικά με τα πλεονεκτήματα [24] των ad-hoc δικτύων, αυτά προκύπτουν από τη φύση τους ως τεχνολογία δικτύων καθώς και από τη δυνατότητα των κόμβων τους για ελεύθερη κίνηση. Τα βασικότερα από αυτά είναι τα κάτωθι:

- *Ευκολία στη συνδεσιμότητα:* Οι χρήστες που συνδέονται ασύρματα σε ένα αδόμητο δίκτυο έχουν μια εύκολη, “διαφανή” δικτυακή εμπειρία παρόμοια με αυτή που έχουν οι χρήστες των (μόνιμα συνδεδεμένων) κινητών τηλεφώνων. Ένα καλά σχεδιασμένο ad-hoc δίκτυο επιτρέπει την πρόσβαση με μια φορητή συσκευή ασχέτως από την τοποθεσία του χρήστη. Επιπλέον, οι σύγχρονες υλοποιήσεις των ασύρματων τεχνολογιών επιτρέπουν υψηλές ταχύτητες αλλά και τη συνύπαρξη πολλών τύπων δεδομένων, όπως streaming, voiceover ip και απλά δεδομένα δικτύου τα οποία συνυπάρχουν σε διαφορετικές ραδιοσυχνότητες.

- *Ευκολία υλοποίησης:* Η υλοποίηση και ανάπτυξη ενός ad-hoc δικτύου είναι πολύ πιο εύκολη και απλή από οποιοδήποτε ενσύρματο δίκτυο που απαιτεί καλωδίωση και επίσης ευκολότερη από την υλοποίηση ενός κυψελωτού δικτύου, όπου απαιτείται εγκατάσταση σταθμών βάσης, που έχουν αρκετά υψηλό κόστος και οργάνωση συγκεκριμένης δομής η οποία είναι χρονοβόρα.

- *Εύκολη εγκατάσταση:* Η εγκατάσταση δικτυακών συνδέσεων είναι πολύ εύκολη σε μέρη τα οποία χρησιμοποιούνται προσωρινά. Όπως, για παράδειγμα, πρόχειρες εγκαταστάσεις μιας υπηρεσίας.

- *Ταχύτητα και ευελιξία στην επικοινωνία:* Σε ένα ad-hoc δίκτυο όλοι οι σταθμοί είναι ισοδύναμοι, αφού όλοι μπορούν να συμπεριφερθούν ως δρομολογητές και να προωθήσουν πακέτα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτητα και την ευελιξία των αδόμητων δικτύων όσων αφορά την μεταφορά δεδομένων.

- *Συνεργασία με άλλα δίκτυα:* Ένα ad-hoc δίκτυο μπορεί να συνυπάρξει και να συνεργαστεί με ένα συμβατικό δίκτυο που στηρίζεται σε μια συγκεκριμένη υποδομή. Έτσι μπορεί να γίνεται ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα σε διαφορετικά είδη δικτύων.

Ως επιπρόσθετο πλεονέκτημα, διαπιστώθηκε ότι η τεχνική του multihop αύξησε τη χωρητικότητα του δικτύου, καθώς ο χώρος μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί για συνεχόμενες, αλλά ξεχωριστές μεταξύ τους multihop συνδιαλέξεις.

Ο αποκεντρωμένος χαρακτήρας, η γρήγορη εγκατάσταση τους (αφού δεν απαιτούν την ύπαρξη σταθερής υποδομής) και η ελάχιστη απαιτούμενη διαμόρφωση των

ασύρματων ad hoc δικτύων, τα καθιστά κατάλληλα για ποικίλες εφαρμογές οι οποίες δε μπορούν να βασίζονται σε κεντρικούς κόμβους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα παρακάτω:

- Στρατιωτικές εφαρμογές
- Διαχείριση εκτάκτων αναγκών(πυρκαγιές, πλημμύρες κτλ.)
- Εφαρμογές σε τοπικό επίπεδο (αίθουσες διαλέξεων, κατοικίες κτλ.)

Πέραν των πλεονεκτημάτων όμως, η τεχνολογία των ad-hoc δικτύων εμφανίζει και μειονεκτήματα[24] . Μερικά από αυτά είναι τα κάτωθι:

- *Περιορισμένο εύρος ζώνης:* Τα ad-hoc δίκτυα, λόγω της ασύρματης φύσης χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο εύρος ζώνης (bandwidth) ως προς τα ενσύρματα δίκτυα. Το ωφέλιμο bandwidth μειώνεται επίσης και λόγω των πρωτοκόλλων ασύρματης διασύνδεσης, διαχείρισης και αποφυγής συγκρούσεων. Επίσης, στις περιπτώσεις που η κινητικότητα των κόμβων είναι μεγάλη, ένα μεγάλο μέρος του εύρους ζώνης καταναλώνεται στην εξεύρεση μονοπατιών.

- *Περιορισμένη ασφάλεια:* Αυτά τα δίκτυα ως ασύρματα, είναι πιο πολύ εκτεθειμένα σε κινδύνους υποκλοπών απ' ότι τα ενσύρματα. Για να ενισχυθεί η ασφάλειά τους εφαρμόζονται συχνά οι υπάρχουσες μέθοδοι ασφάλειας συνδέσμων. Η αποκεντρωτική φύση της διαχείρισης ενός ad-hoc δικτύου, παρέχει μεγαλύτερη στιβαρότητα σε σχέση με περισσότερο συγκεντρωτικές μεθόδους διαχείρισης, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί θετικό σε αυτή την κατεύθυνση.

- *Είναι ευάλωτα σε παρεμβολές:* Τα ad-hoc δίκτυα, όπως και όλα τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα σε παρεμβολές. Όταν ένας αναμεταδότης λειτουργεί στην ίδια ραδιοσυχνότητα με ένα ad-hoc δίκτυο και βρίσκεται κοντά σε αυτό, τότε μπορεί να προκαλέσει στο δίκτυο παρεμβολές και κατά συνέπεια μη αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των χρηστών του δικτύου..

- *Είναι επιρρεπή σε απώλεια πακέτων:* Το ποσοστό των πακέτων που χάνονται είναι αρκετά υψηλό, τόσο λόγω της αυξημένης πιθανότητας λαθών μετάδοσης, όσο και της αυξημένης πιθανότητας μη επίτευξης συνδέσης (π.χ. εξαιτίας της μετακίνησης ενός κόμβου).

- *Έλλειψη κεντρικού ελέγχου:* Η συνεργασία μεταξύ γειτονικών σταθμών ώστε να αποφασίσουν πότε θα εκπέμψει ο καθένας, απουσία κεντρικού ελέγχου και συντονισμού, καθίσταται δύσκολη υπόθεση. Έτσι, σε περιπτώσεις ταυτόχρονης εκπόμπης η κοινή χρήση του ίδιου μέσου διάδοσης (αέρας) από όλους τους σταθμούς, πιθανόν να οδηγήσει σε σύγκρουση των πακέτων και απώλεια πληροφορίας.

- *Περιορισμένη δυνατότητα κλιμάκωσης κατά την single-hop υλοποίηση:* [25] Η δυναμική τοπολογία αυτών των δικτύων και η πιθανή αδυναμία συνάθροισης που συνεπάγεται μεγαλύτερους πίνακες δρομολόγησης, οδηγούν σε προβλήματα κλιμάκωσης. Εξαιτίας της κινητικότητας των κόμβων επίσης, οι πληροφορίες δρομολόγησης αλλάζουν και κατά συνέπεια είναι απαραίτητη η αποστολή μηνυμάτων ελέγχου στο δίκτυο προκειμένου να εξασφαλιστούν οι πίνακες δρομολόγησης. Ο αριθμός αυτών των

μηνυμάτων αυξάνεται όταν οι κόμβοι κινούνται πιο γρήγορα ως προς τους άλλους με αποτέλεσμα να μειώνεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης γεγονός που επίσης περιορίζει η δυνατότητα κλιμάκωσης.

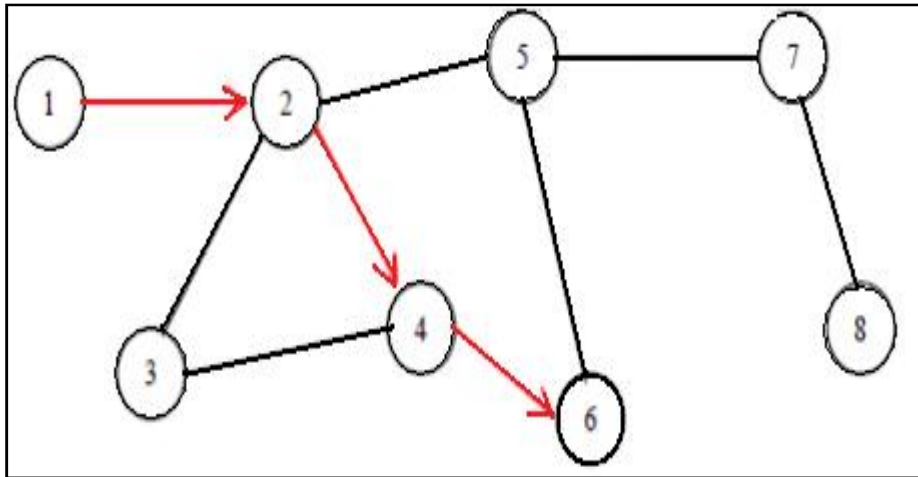
2.2 Κινητά Αυτοοργανωμένα ή κατ' απαίτηση Δίκτυα (Mobile Ad hoc NETWORK-MANET).

Όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου, μια κατηγορία των ad hoc δικτύων είναι αυτή των Κινητών Αυτοοργανωμένων Δικτύων (MANET). Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει και τις τηλεπικοινωνίες των ΜΕΑ ως στοιχεία μιας ευρύτερης ομάδος. Σύμφωνα με την Τακτική Δύναμη Μηχανικών Διαδικτύου (Internet Engineering Task Force, IETF), ως Κινητό ad hoc Δίκτυο ορίζεται ένα αυτόνομο σύστημα κινητών κόμβων που επικοινωνούν μεταξύ τους με ασύρματες ζεύξεις και εντός του οποίου, κάθε κόμβος λειτουργεί τόσο ως τερματική συσκευή όσο και ως δρομολογητής για τους υπόλοιπους.

Ένα δίκτυο συντιθέμενο από κόμβους-ΜΕΑ είναι συνήθως πολύ πιο περίπλοκη υπόθεση σε σύγκριση με άλλα κινητά ασύρματα ad hoc δίκτυα. Οι ενάεριοι κόμβοι δύνανται να κινούνται σε τρεις διαστάσεις, να αναπτύσουν μεγαλύτερες ταχύτητες ,να βρίσκονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις και γενικά, εμφανίζουν μεγαλύτερη κινητικότητα σε σχέση με τους κόμβους των λοιπών δικτύων MANET. Η ασύρματη ζεύξη που υλοποιείται μεταξύ των ΜΕΑ ενδέχεται να εμφανίζει μεταβολές στην ποιότητα της σύνδεσης με τη πάροδο του χρόνου εξαιτίας παραγόντων όπως το φαινόμενο Ντόπλερ (Doppler) ,οι αλλαγές στην απόσταση επικοινωνίας και το μπλοκάρισμα της γραμμής οπτικής επαφής από το σώμα του αεροσκάφους [26] .

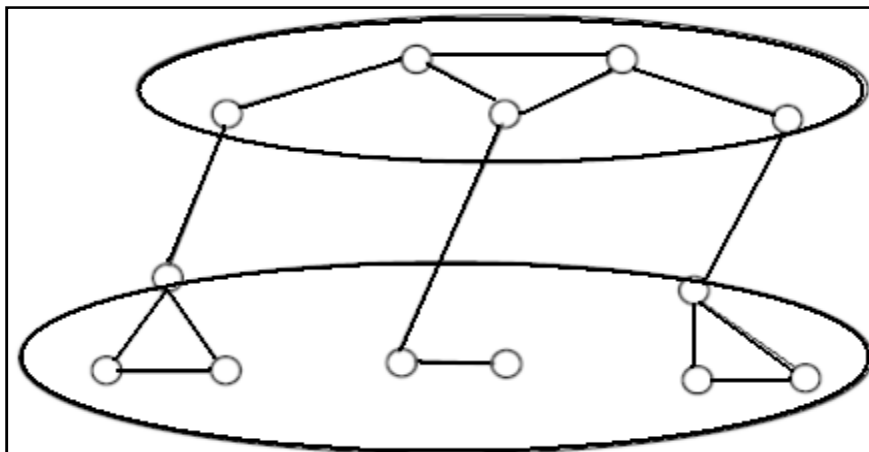
Όσον αφορά την τοπολογία των δικτύων MANET, που χαρακτηρίζονται από την έλλειψη κάποιας προϋπάρχουσας υποδομής, έχουν αναπτυχθεί οι εξής αρχιτεκτονικές:

- Επίπεδη Αρχιτεκτονική: Όλοι οι κόμβοι του δικτύου βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και δεν υπάρχει καθόλου ιεραρχία. Στην προώθηση των μηνυμάτων του δικτύου συμμετέχουν όλοι οι κόμβοι. Για παράδειγμα (Σχήμα 2.3), έστω ότι ο κόμβος 1 επιθυμεί να επικοινωνήσει με τον κόμβο 6 και στέλνει ένα μήνυμα. Το μήνυμα αυτό προωθείται μέσω των ενδιάμεσων κόμβων 2 και 4. Πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής είναι η αυξημένη αξιοπιστία/βιωσιμότητα, η ελάχιστη δρομολόγηση, η μειωμένη χρήση ασύρματων πόρων και η καλύτερη κατανομή του φόρτου καθώς και το ότι οι κόμβοι έχουν εξοπλισμό του ίδιου τύπου.



Σχήμα 2.3

• **Ιεραρχική Αρχιτεκτονική:** Το δίκτυο αποτελείται από τουλάχιστον δυο επίπεδα και οι κόμβοι σχηματίζουν συστάδες (clusters) (Σχήμα 2.4). Κάθε συστάδα έχει έναν επικεφαλή κόμβο (head). Η προώθηση των μηνυμάτων γίνεται μέσω των επικεφαλών των συστάδων, οι οποίοι επιπλέον κρατούν και πληροφορίες σχετικές με τη θέση της συστάδας. Πλεονεκτήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η εύκολη διαχείριση της κινητικότητας και η καλύτερη διαχειρισσιμότητα γενικά.



Σχήμα 2.4

Στα πλαίσια ενός τέτοιου δικτύου, ο τύπος κυκλοφορίας των δεδομένων μπορεί να είναι:

- **Ομότιμων Κόμβων (Peer-to-Peer):** πραγματοποιείται επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων που υλοποιούν ένα άλμα (hop).

- *Απομεμακρυσμένου-σε-απομεμακρυσμένο κόμβο (Remote-to-Remote):* επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων που δεν συντελούν ένα ενιαίο άλμα αλλά που διατηρούν

μια σταθερή διαδρομή μεταξύ τους. Αυτό προκύπτει σε σύνολα πολλών κόμβων, εντός των οποίων το εύρος κάθε κόμβου επικαλύπτεται από το εύρος κάποιου άλλου με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει μια ενιαία επικάλυψη του συνόλου.

- *Δυναμικής Κυκλοφορίας (Dynamic Traffic):* οι κόμβοι είναι δυναμικού χαρακτήρα και κινούνται. Αυτός ο τύπος προϋποθέτει την ανακατασκευή διαδρομών, γεγονός που συνεπάγεται φτωχή συνδεσιμότητα και δικτυακή δραστηριότητα.

Κάθε κόμβος ενός δικτύου MANET , ανάλογα με τις δυνατότητές του, μπορεί να χαρακτηριστεί[27] ως :

- *Πελάτης ή Μικρος Κινητός Οικοδεσπότης (Client or Small Mobile Host) :* χαρακτηρίζεται από μειωμένες δυνατότητες επεξεργασίας, αποθήκευσης, επικοινωνίας και αποθήκευσης ισχύος.
- *Διακομιστής ή Μεγάλος Κινητός Οικοδεσπότης (Server or Large Mobile Host):* χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες δυνατότητες ως προς αυτές ενός κόμβου-πελάτη.

Οι λειτουργικές καταστάσεις δε, στις οποίες μπορεί να περιέλθει με γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας, είναι οι εξής:

- *Ενεργός Λειτουργία ή Λειτουργία Μετάδοσης (Active Mode or Transmit Mode):* Επιτρέπει τόσο την μετάδοση όσο και τη λήψη πληροφορίας και είναι η πιο ενεργειοβόρος λειτουργία.
- *Λειτουργία Ψευδοϋπνου ή Λειτουργία Λήψης (Doze Mode or Receive Mode):* Η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας είναι δυνατόν να επεξεργάζεται πληροφορίες ενώ δύναται και η λήψη μεταδόσεων άλλων κόμβων του δικτύου.
- *Λειτουργία Ύπνου ή Λειτουργία Αναμονής (Sleep Mode or Standby Mode):* Ο κόμβος παραμένει ανενεργός για κάποιο χρονικό διάστημα χωρίς να εκπέμπει/ λαμβάνει ή να επεξεργάζεται δεδομένα και στην ουσία τίθεται εκτός δικτύου μέχρι την ενεργοποίησή του.

Σημειώνεται επίσης, ότι κάθε κόμβος έχει τη δική του περιοχή επιρροής. Είναι αυτή εντός της οποίας οι μεταδόσεις του είναι αξιοποιήσιμες και το μέγεθός της εξαρτάται από την ισχύ που χαρακτηρίζει τον κόμβο . Δημιουργείται έτσι μια ευρύτερη περιοχή κάλυψης εντός της οποίας οι κόμβοι αλληλεπιδρούν με τον πλέον δυναμικό τρόπο προσδίδοντας βασικά χαρακτηριστικά στα δίκτυα MANET, όπως τα κάτωθι [18] :

- *Δυναμική τοπολογία δικτύου:* Από τη στιγμή που οι κόμβοι είναι κινητοί, η τοπολογία του δικτύου είναι δυνατόν να μεταβάλλεται ραγδαία και απρόβλεπτα και η συνδεσιμότητα των κόμβων πιθανόν να αλλάζει με το χρόνο. Το δίκτυο όπως και τα μοντέλα κινητικότητας έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται στις συνθήκες κίνησης και διάδοσης. Επίσης, κάθε χρήστης ενός MANET δικτύου έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί και σε άλλα σε δίκτυα όπως π.χ. το διαδίκτυο (Internet).
- *Κατανεμημένες λειτουργίες:* Ελλείπει κεντρικού σταθμού βάσης, η διαχείριση και ο έλεγχος του δικτύου είναι κατανεμημένα στους επιμέρους κόμβους του δικτύου. Οι κόμβοι που συνιστούν ένα MANET πρέπει να συνεργάζονται σε αυτή την κατεύθυνση και κάθε ένας πρέπει να δρα ως αναμεταδότης όταν χρειάζεται προκειμένου να υποστηρίξει λειτουργίες που φορούν , για παράδειγμα, την ασφάλεια ή τη δρομολόγηση.

- *Δρομολόγηση πολλαπλών αλμάτων:* Οι βασικοί τύποι των ad hoc αλγορίθμων δρομολόγησης μπορεί να είναι απλού ή πολλαπλών αλμάτων, βασιζόμενοι σε διαφορετική διαστρωμάτωση και πρωτόκολλα δρομολόγησης. Στα MANET δίκτυα κάθε κόμβος ξεχωριστά λειτουργεί σαν δρομολογητής και προωθεί πακέτα για την μετάδοση της πληροφορίας μεταξύ των υπολοίπων κινητών κόμβων. Έτσι, κατά τη μεταφορά των πακέτων από την πηγή στον προορισμό, αυτά είναι δυνατόν να προωθούνται μέσω των ενδιάμεσων κόμβων.
- *Αυτονομία Κόμβων:* Στα MANET δίκτυα κάθε κινητός κόμβος είναι αυτόνομος και μπορεί να λειτουργεί είτε ως τερματικό είτε ως δρομολογητής. [28].
- *Ευκολία εγκατάστασης:* Ένα MANET δίκτυο δεν βασίζεται σε κάποια εγκαταστημένη δομή ή σε κεντρική διαχείριση. Κάθε κόμβος λειτουργεί ως ανεξάρτητος δρομολογητής και παράγει τα δικά του δεδομένα γεγονός που δίνει τη δυνατότητα για εφαρμογή των ad hoc δικτύων σε περιπτώσεις που δεν υφίστανται οι αναγκαίες υποδομές ή υπάρχουν και είναι ασύμφορη η χρήση τους . [29].
- *Δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου:* Πολλές εφαρμογές τύπου MANET περιλαμβάνουν δίκτυα με δεκάδες χιλιάδες κόμβους, όπως για παράδειγμα, δίκτυα αισθητήρων και τακτικά δίκτυα. Συνεπώς , η επεκτασιμότητα είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή ανάπτυξη αυτών[30].
- *Διακυμάνσεις της χωρητικότητας της ζεύξης:* Σε ένα δίκτυο MANET , οι υψηλοί ρυθμοί σφαλμάτων είναι πιθανόν το πιο έντονο φαινόμενο. Επίσης, ένα από άκρη-σε-άκρη μονοπάτι μπορεί να χρησιμοποιείται από διάφορες συνδιαλλαγές [29]. Ακόμα, ο δίαυλος επικοινωνίας μεταξύ των τερματικών, υπόκειται σε θόρυβο, διαλείψεις και παρεμβολές και χαρακτηρίζεται από μικρότερο, ως προς τα ενσύρματα δίκτυα, εύρος. Ένα αποτέλεσμα της σχετικά χαμηλής έως μέτριας χωρητικότητας των ζεύξεων είναι ο συνωστισμός. Π.χ. η αυξανόμενη ζήτηση μιας δικτυακής εφαρμογής πιθανότατα θα πλησιάσει ή και θα ξεπεράσει τη χωρητικότητα του δικτύου.
- *Χαμηλού βάρους συσκευές:* Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι κόμβοι ενός δικτύου MANET είναι κινητές συσκευές με Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας περιορισμένων δυνατοτήτων και μικρού μεγέθους μνήμη και πηγή ισχύος[18], [27] ,[31].
- *Λειτουργία με περιορισμένη ενέργεια τροφοδοσίας:* Μερικοί ή όλοι οι κόμβοι σε ένα δίκτυο MANET μπορεί να βασίζονται σε μπαταρίες ή σε άλλα μέσα τροφοδοσίας που χαρακτηρίζονται από περιορισμένη διάρκεια παροχής ισχύος.
- *Περιορισμένη ασφάλεια του φυσικού μέσου μετάδοσης:* Τα κινητά ασύρματα δίκτυα είναι γενικά πιο ευπαθή σε θέματα ασφάλειας του φυσικού μέσου μετάδοσης σε σχέση με τα σταθερά. Συχνά εφαρμόζονται ήδη υπάρχουσες τεχνικές ασφάλειας στα ασύρματα δίκτυα για την βελτίωση ασφάλεια. Η αποκεντρωμένη φύση της διαχείρισης των δικτύων MANET παρέχει επιπλέον κάλυψη για περιπτώσεις που κάποιος κόμβος βγει εκτός λειτουργίας (single point failure) σε σχέση με τις πιο συγκεντρωμένες (centralized) υλοποιήσεις [29] .

Από αυτά τα χαρακτηριστικά προκύπτει ότι ένα δίκτυο MANET, ως σύστημα επικοινωνιών ενός συνόλου απαρτιζόμενου από MEA και προκειμένου να αντιμετωπίζει δυναμικά οποιαδήποτε μεταβολή της τοπολογίας αυτής, προϋποθέτει την ύπαρξη ειδικών πρωτοκόλλων που επεκτείνονται περισσότερο σε σχέση με τα αντίστοιχα των δικτύων σταθερής τοπολογίας. Παράδειγμα αυτών είναι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία είναι υπεύθυνα για την ανακάλυψη-επιλογή διαδρομών για ζευγάρια αποστολέα-παραλήπτη καθώς και για τη παράδοση των πακέτων στον σωστό προορισμό μέσω αυτών των διαδρομών. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι , σημαντικό ρόλο στη ποιότητα της ασύρματης ζεύξης και την απόδοση του δικτύου , διαδραματίζει η συμπεριφορά του

αεροχήματος και πιο συγκεκριμένα, η περιστροφή του ως προς τους τρεις άξονες τρισσορθογωνίου συστήματος που αντιπροσωπεύει το χώρο[26]. Αυτή οδηγεί σε αύξηση των επανεκπομπών και κατά συνέπεια, σε αύξηση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης και στην μείωση της συνολικής ρυθμοαπόδοσης στη μετάδοση πληροφορίας. Προκειμένου να μειωθούν οι επιπτώσεις της συμπεριφοράς των αεροχημάτων, προκύπτει η ανάγκη για σχεδιασμό πρωτόκολλων ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Media Access Control ,MAC) προκειμένου να αντισταθμιστούν αυτές τις επιδράσεις.

Γενικά, η στρατηγική δρομολόγησης είναι το πλέον σοβαρό αντικείμενο έρευνας στα πλαίσια της ανάπτυξης των δικτύων MANET .Παράγοντες όπως η ποιότητα της μεταβλητής ασύρματης σύνδεσης, οι απώλειες διάδοσης, οι διαλείψεις, η παρεμβολή πολλών χρηστών, η καταναλισκόμενη ισχύς και οι τοπολογικές μεταβολές προκαλούν περισσότερες δυσκολίες και αυξάνουν την πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων δρομολόγησης. [32] . Η δρομολόγηση πολυεκπομπής επίσης, είναι μια άλλη πρόκληση στη κατεύθυνση αυτή, διότι το δενδροδιάγραμμα πολυεκπομπής δεν είναι πλέον στατικού χαρακτήρα λόγω της τυχαίας κίνησης των κόμβων μέσα το δίκτυο[33].

Τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα θα πρέπει, να χαρακτηρίζονται από:

- Ελαχιστοποίησή της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος και μνήμης των κόμβων.
- Ελαχιστοποίηση των επιπλέον πακέτων πληροφορίας (overhead).
- Ανίχνευση αλλαγών της τοπολογίας του δικτύου και προσαρμοστικότητα σε αυτές με δημιουργία καινούριων διαδρομών το ταχύτερο δυνατόν και με τον ελάχιστο αριθμό κόμβων.
- Κατανεμημένη λειτουργία.
- Αυτόματη εκκίνηση (self starting).
- Αποφυγή δημιουργίας διαρκών βρόχων (loop free).
- Δυνατότητα επέκτασης και σε μεγαλύτερα δίκτυα.
- Παροχή διαδρομών (routes) που δεν αποτελούν βρόχο.
- Συμβατότητα με τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ενσύρματων δικτύων εφόσον είναι δυνατόν .

Κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης, ανάλογα με τις ιδιότητές του, μπορεί να ταξινομηθεί σε κάποια από τις παρακάτω κατηγορίες [34] :

- *Κεντρικού χαρακτήρα (Centralized) και Κατανεμημένα (Distributed)*: Στα κεντρικού χαρακτήρα, όλες οι αποφάσεις για τις διαδρομές παίρνονται από έναν κεντρικό κόμβο, ενώ στους διανεμημένους αλγόριθμους, ο υπολογισμός των διαδρομών μοιράζεται σε όλους τους κόμβους του δικτύου.
- *Στατικά (Static) και Προσαρμοζόμενα (Adaptive)*: Στα στατικά, η διαδρομή για συγκεκριμένα ζευγάρια αποστολέα-παραλήπτη παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από τη δικτυακή κίνηση έχοντας ως αποτέλεσμα χαμηλή απόδοση σε μεγάλο αριθμό μοτίβων δικτυακής κίνησης. Τα περισσότερα πρωτόκολλα είναι προσαρμοζόμενα, στα οποία οι διαδρομές μπορούν να αλλάξουν ανάλογα με το συνωστισμό του δικτύου.
- *Αντιδραστικά (Reactive) και Ενεργητικά (Proactive)*: Στα αντιδραστικά πρωτόκολλα, διαδρομές δημιουργούνται μόνο όταν είναι απαραίτητο, δηλαδή όταν ένας κόμβος-πηγή θέλει να στείλει πακέτα σε έναν κόμβο-προορισμό για τον οποίο δεν ξέρει τη διαδρομή. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται εύρεση διαδρομής (route discovery).Στα ενεργητικά πρωτόκολλα κάθε κόμβος επιχειρεί να διατηρήσει ένα συνεπή και ενημερωμένο πίνακα με πληροφορίες δρομολόγησης για κάθε κόμβο που ανήκει στο δίκτυο, έτσι ώστε

όταν χρειαστεί να προωθήσει ένα πακέτο σε κάποιον προορισμό, η διαδρομή είναι γνωστή εκ των προτέρων και χρησιμοποιείται αμέσως.

Τα πλέον αποδεκτά πρωτόκολλα είναι αυτά που συνιστά η Τακτική Δύναμη Μηχανικών Internet (IETF). Αυτή έχει δημοσιεύσει δύο ενεργητικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, το OLSR (Optimized Link State Routing) [35] και το TBRPF (Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding) [36] καθώς και δύο αντιδραστικά, το AODV (Ad hoc on-demand distance vector Outing) [37] και το DSR (Dynamic Source Routing) [38]. Πέραν αυτών, ο οργανισμός εργάζεται πάνω στην αντικατάσταση αυτών από ένα πρωτόκολλο για κάθε κατηγορία.

Όσον αφορά την σχετική απόδοση των παραπάνω προτοκόλλων, κάποιες δημοσιευμένες αναφορές [39], [40] συμπεραίνουν ότι το πρωτόκολλο δεν αποδίδει ικανοποιητικά σε κινητά περιβάλλοντα, σε σχέση με τα AODV και DSR πρωτόκολλα (το TBRPF δεν αξιολογείται). Ο βασικός λόγος είναι ο τρόπος λειτουργίας του ενεργητικού OLSR πρωτοκόλλου. Συγκεκριμένα, λόγω των κινητών κόμβων, το πρωτόκολλο πρέπει να καταβάλλει μεγάλη προσπάθεια για την ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης, οι οποίοι δεν θα είναι ποτέ ακριβείς.

Προκειμένου να εξαλειφθεί η ανάγκη για διατήρηση πληροφορίας δρομολόγησης στους πίνακες αυτούς, έχουν προταθεί τα γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Το GPSR (Greedy perimeter state less routing) [41] είναι το πιο γνωστό αυτού του τύπου. Το γεωγραφικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, αντί να διατηρεί μια διαδρομή προς έναν προορισμό, προωθεί πακέτα στη γεωγραφική θέση του προορισμού τοπικά σε κάθε άλμα (hop) επιλέγοντας ένα κόμβο προκειμένου να μειωθεί η απόσταση προς τον προορισμό. Έτσι, παύει να υπάρχει ανάγκη διατήρησης καθολικής πληροφορίας δρομολόγησης από τους κόμβους, γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία σε πολύ δυναμικά περιβάλλοντα. Το αδύναμο σημείο αυτού του τύπου πρωτοκόλλων είναι το πώς θα υλοποιείται η κατανομή των θέσεων των κόμβων στο δίκτυο ώστε να γνωρίζουν οι πηγές που βρίσκονται οι προορισμοί. Αυτό το ζήτημα προϋποθέτει την ύπαρξη υπηρεσίας τοποθεσίας, προσβάσιμης από τις πηγές, η οποία όμως από τη φύση της, εμφανίζει το πρόβλημα της εξισορρόπησης μεταξύ της επιβάρυνσης της διανομής των πληροφοριών τοποθεσίας στους αντίστοιχους εξυπηρετητές και του κόστους ενός ερωτήματος τοποθεσίας[42].

2.3 Μοντέλα κινητικότητας των ΜΕΑ ως κόμβων ενός δικτύου MANET.

2.3.1 Γενικά περί κινητικότητας.

Ο τρόπος με τον οποίο κινείται ένα ή περισσότερα ΜΕΑ διαδραματίζει πρωταρχικό ρόλο τόσο στη σχεδίαση όσο και στην απόδοση του ad hoc δικτύου που συντίθεται από αυτά. [26]. Το ίδιο ισχύει και για τη χωρική κατανομή των θέσεων των κόμβων στο δίκτυο. [42]. Στα πλαίσια της εξέλιξης των ΣΜΕΑ, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στη μελέτη και αξιοποίηση των μοντέλων κινητικότητας που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς για να περιγράψουν την κίνηση ενός ή συνόλου στοιχείων που αλληλεπιδρούν. Τα μοντέλα αυτά έχουν διάφορες εφαρμογές μεταξύ των οποίων είναι και τα Κινητά Αυτοοργανωμένα δίκτυα (MANET) και κατ' επέκταση, τα ad hoc δίκτυα επικοινωνιών ενός συστήματος αποτελούμενου από ένα ή περισσότερα ΜΕΑ και συνιστούν το θεμελιώδες μαθηματικό πλαίσιο για τη μελέτη αυτών ως προς τη συνδεσιμότητα και την αξιολόγηση των επιδόσεων τους [44]. Κάθε μοντέλο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και μπορεί να παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα, ως προς τα άλλα.

Η μοντελοποίηση της κίνησης είναι σημαντική και για την προσομοίωση και την ανάλυση των αντίστοιχων πρωτοκόλλων δρομολόγησης προκειμένου αυτά να είναι αποτελεσματικά και αξιόπιστα [45] ,[46] ,[47]. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να επιλέγονται για τον έλεγχο τους τα πλέον ρεαλιστικά μοντέλα κίνησης τα οποία θα ανταποκρίνονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στη πραγματικότητα της εκάστοτε εφαρμογής. Στην αντίθετη περίπτωση, ένα μη ρεαλιστικό μοντέλο, μπορεί να οδηγήσει σε μη έγκυρα συμπεράσματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την επιλογή θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν και οι φυσικοί περιορισμοί (μηχανικής και αεροδυναμικής φύσεως) των ΜΕΑ [47] ,[48]. Γενικά, τα μοντέλα κίνησης είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό μηχανισμών ενημέρωσης και αναζήτησης θέσης, για τη διαχείριση των ραδιοπύργων (π.χ. δυναμικός καταμερισμός καναλιών) και για την αρχιτεκτονική και τον προγραμματισμό των δικτύων.

Βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν την ανάπτυξη των εν λόγω μοντέλων είναι τα κάτωθι [49]:

- **Διάσταση:** Η κίνηση ενός κόμβου μπορεί να περιγραφεί σε μία, δύο ή και στις τρεις διαστάσεις (πχ, ένα όχημα σε έναν ευθύ δρόμο ή μέσα σε μια πόλη μπορεί να κινηθεί σε μία ή δύο διαστάσεις ενώ ένα ΜΕΑ στον ουρανο, σε δύο ή τρεις).

- **Κλίμακα:** Τα διαφορετικά επίπεδα κίνησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν μια κίνηση, συμπεριλαμβανομένης της μικροκινητικότητας και της μακροκινητικότητας. Τα πρότυπα μικροκινητικότητας περιγράφουν πώς συμπεριφέρεται ένα στοιχείο κινούμενο μέσα σε ένα αυτόνομο δίκτυο. Αντίθετα, τα μοντέλα μακροκινητικότητας αφορούν την κίνηση ενός στοιχείου από ένα δίκτυο σε ένα άλλο.

- **Τυχαιότητα:** Δεδομένου ότι η μετακίνηση ενός στοιχείου είναι κατά πάσα πιθανότητα τυχαία, λόγω των απρόβλεπτων παραγόντων που δύναται να την επηρεάσουν, είναι χρήσιμο να εισαχθεί ένας συντελεστής τυχαιότητας στις παραμέτρους που περιγράφουν γενικότερα την κίνησή του. Τέτοιες παράμετροι είναι: η κατεύθυνση, η ταχύτητα, και ο χρόνος παραμονής μέσα σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

- **Γεωγραφικοί περιορισμοί:** Τα πρότυπα κίνησης μπορούν να είναι πολύ συγκεκριμένα ανάλογα με τα σενάρια προσομοίωσης (πχ, κίνηση μέσα σε κτίρια, κίνηση με κάποιο όχημα κτλ .) Σε ένα μοντέλο εσωτερικού χώρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τρισδιάστατο πρότυπο για να περιγράψει την κίνηση σε ένα πολυώροφο κτίριο όπου εξετάζονται τόσο οι κάθετες όσο και οι οριζόντιες μετακινήσεις.

- *Προσανατολισμός:* Μερικά μοντέλα κίνησης αναπτύσσονται για να περιγράψουν τη διαδρομή ή την πορεία μιας μετακίνησης. Παραδείγματος χάριν, εάν είναι γνωστό ότι ένα κινητό στοιχείο θα πάει σε μια συγκεκριμένη θέση, τότε είναι πολύ πιθανό το μοντέλο να υπολογίσει τη θέση και το χρόνο της διαδρομής του.
- *Δυναμικές παράμετροι:* Προκειμένου να καταγραφεί η κίνηση ενός στοιχείου σε μεταβλητές συνθήκες, τα μοντέλα κίνησης σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραγάγουν την επόμενη κίνηση του στοιχείου ανάλογα με τις τρέχουσες ενέργειές του.

2.3.2 Κατηγοριοποίηση των μοντέλων κινητικότητας .

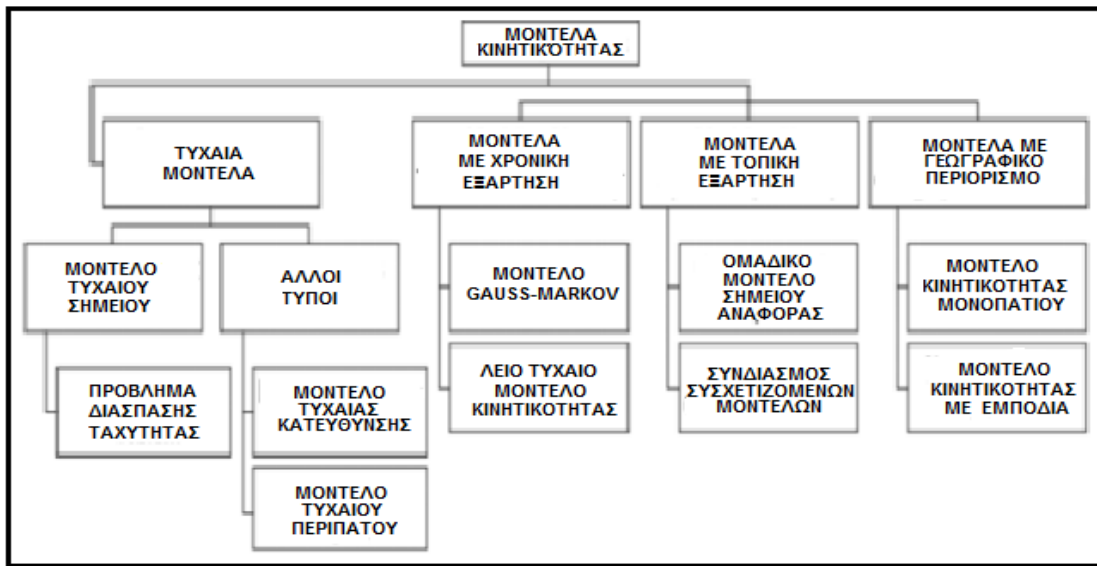
Οι τρόποι με τους οποίους δύνανται να κατηγοριοποιηθούν τα μοντέλα κινητικότητας που έχουν αναπτυχθεί, ποικίλουν. Ένας από αυτούς βασίζεται στο αν παρατηρείται η κίνηση ενός κόμβου ξεχωριστά ή σαν ομάδα [46],[50] . Έτσι, προκύπτουν τα :

- *Μοντέλα οντότητας (Entity Models).* Η κίνηση κάθε κόμβου μοντελοποιείται ανεξάρτητα από τις κινήσεις των υπολοίπων. Παραδείγματα: Μοντέλο Τυχαίου Περιπάτου (Random walk mobility model), Τυχαίου Σημειακού (Random Waypoint), Τυχαίας Διεύθυνσης (Random direction) ,Χωρίς Όρια Περιοχής Προσομοίωσης(Boundless simulation area), Μοντέλο κινητικότητας Γκάους – Μαρκόφ (Gauss Markov mobility model).
- *Μοντέλα Κινητικότητας Ομάδος(Group Mobility Models).*Υπάρχει αλληλεξάρτηση της κίνησης των κόμβων στα πλαίσια της ομάδος. Παραδείγματα: Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης (Column group mobility model) , Μοντέλο Νομαδικής Κοινότητας (Nomadic community mobility model), Μοντέλο Κινητικότητας ομάδος Σημείου Αναφοράς (Reference Point Group Mobility Model , RPGM).

Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των μοντέλων κινητικότητας είναι βάσει των ειδικών κινητικών χαρακτηριστικών τους [35]. Με τον όρο κινητικά χαρακτηριστικά εννοείται για παράδειγμα, η συσχέτιση ή μη , της μετακίνησης ενός κόμβου σε μια δεδομένο χρονικό διάστημα με μια μετακίνηση σε προηγούμενο χρονικό διάστημα. Με βάση αυτό το κριτήριο προκύπτουν οι εξής κατηγορίες (Σχήμα 2.5) :

- *Τυχαία Μοντέλα (Random Models).* Οι κόμβοι κινούνται ελεύθερα και τυχαία με ελάχιστους ή και καθόλου περιορισμούς. Σε αυτά τα μοντέλα , ο προορισμός, η ταχύτητα και η κατεύθυνση κάθε κόμβου επιλέγονται τυχαία και ανεξάρτητα από των άλλων κόμβων και από την προηγούμενη μετακίνηση του.
- *Μοντέλα με Χρονική Εξάρτηση (Models with Temporal Dependency).* Η τρέχουσα ταχύτητα ενός κόμβου εξαρτάται από την προηγούμενη τιμή της. Εδώ εισάγεται η έννοια της χρονοθυρίδας και η ταχύτητα ενός κινούμενου κόμβου σε διαφορετικές χρονοθυρίδες θεωρούνται συσχετιζόμενες [30]. Η χρονική εξάρτηση προκύπτει από το γεγονός ότι στη πραγματική ζωή , η κίνηση ενός κόμβου καθορίζεται και περιορίζεται από φυσικούς νόμους της ταχύτητας , της επιτάχυνσης και του ρυθμού μεταβολής της κατεύθυνσης.

- Μοντέλα με Τοπική Εξάρτηση (Models with Spatial Dependency). Η κίνηση ενός κόμβου επηρεάζεται από τη κίνηση κάποιου άλλου. Οι ταχύτητες διαφορετικών κόμβων συσχετίζονται ως προς το μεταξύ τους διάστημα..
- Μοντέλα με Γεωγραφικό Περιορισμό(Models with Geographic Restriction). Σε αυτά, τα μονοπάτια και τα εμπόδια είναι ολοκληρωμένα.

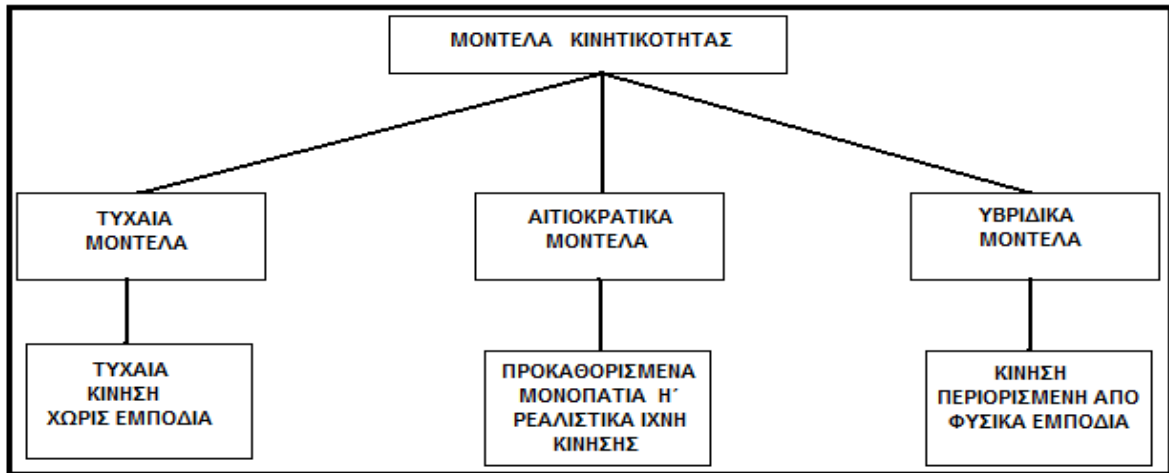


Σχήμα 2.5

Τα μοντέλα κινητικότητας μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σε [51]:

- Περιγραφικά Μοντέλα (Descriptive Models).Προσπάθεια για περιγραφή του πώς κινούνται οι κόμβοι σε κάποιο περιβάλλον.
- Δεσμευτικά Μοντέλα (Prescriptive Models). Καταδεικνύουν το πώς θα έπρεπε να κινείται ένας κόμβος.

Άλλη μια μορφή κατηγοριοποίησης, φαίνεται στο διάγραμμα (Σχήμα 2.6) , περιγραφή της οποίας ακολουθεί μετά από αυτό [52] .



Σχήμα 2.6

- *Τυχαία Μοντέλα (Random Models)*. Προσομοιώνουν τυχαίες κινήσεις σε καθορισμένες περιοχές και η υλοποίησή τους είναι σχετικά εύκολη. Οι παράμετροι της κίνησης αλλάζουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με αποτέλεσμα να προκύπτουν τυχαίες κατευθύνσεις. Τα μοντέλα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως για στρατιωτικές εφαρμογές. Η τυχαία κίνηση δεν μπορεί όμως σε καμιά περίπτωση να περιγράψει τις λεπτομέρειες που ενσωματώνει η πραγματική κίνηση. Παραδείγματα: Μοντέλο Τυχαίου Περιπάτου (Random Walk Model), Κανονικού Περιπάτου (Normal Walk), Μοντέλο Μαρκον, Αφαιρετικό Μοντέλο Καταστάσεων Κίνησης (Abstract Mobility State Model), Μοντέλα Κινητικότητας Ομάδας (Group Mobility Models) , Εξομαλυσμένο Τυχαίο Μοντέλο Κίνησης (Smooth Random Mobility Model).

- *Αιτιοκρατικά Μοντέλα (Deterministic Models)*. Αναπαριστούν την πραγματική πορεία κίνησης στοιχείων στην περιοχή της προσομοίωσης. Μπορούν επίσης να αναπαραστήσουν την πραγματική κίνηση, αλλά περιορίζονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή και απαιτούν μεγάλος αριθμό επαναλήψεων ομοίων προτύπων κίνησης. Η απόκτηση όμως της πληροφορίας της κίνησης απαιτεί υπερβολικό κόπο από την πλευρά του προσομοιωτή. Παραδείγματα: Μοντέλο Κίνησης Βασισμένο σε Ενέργειες (Activity-Based Mobility Model).

- *Υβριδικά Μοντέλα (Hybrid Models)* . Συνδυασμός τυχαίας και αιτιοκρατικής κίνησης. Παραδείγματα: Μοντέλο Gauss-Markov , Καθολικό και Τοπικό Μοντέλο Κίνησης (Global and Local Mobility Model), Γραμμικό Μοντέλο Κίνησης (Kinetic Mobility Model), Αυτοανάδρομο Μοντέλο Κίνησης (Autoregressive (AR-1) Mobility Model) , Μοντέλο Εμποδίων (Obstacle Model).

Τέλος, ένας ακόμα τρόπος να ταξινομηθούν τα μοντέλα κινητικότητας είναι αναλόγως με το αν χρησιμοποιούν ή όχι , ίχνη [47]. Στη πρώτη περίπτωση το μοντέλο βασίζεται στις πραγματικές κινήσεις των κόμβων που καταγράφονται και στη συνέχεια αναπαράγονται σε κάποια προσομοίωση . Στην αντίθετη περίπτωση , τα μοντέλα που υιοθετούνται χαρακτηρίζονται ως συνθετικά.

2.3.3 Εφαρμογή των μοντέλων κινητικότητας στα *ad hoc* δίκτυα των ΣΜΕΑ.

Από τα πολυάριθμα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη και την προσομοίωση της κίνησης των κόμβων των δικτύων MANET, μόνο ορισμένα έχουν εφαρμογή στη σχεδίαση και υλοποίηση των *ad hoc* δικτύων που αφορούν τα ΜΕΑ. Τα δίκτυα αυτά παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς τα υπόλοιπα MANET όπως, ελευθερία κίνησης σε 3 διαστάσεις, μεγαλύτερες ταχύτητες και αποστάσεις μεταξύ των κόμβων, μεγαλύτερο βαθμό κινητικότητας, συχνότερη αλλαγή της τοπολογίας τους, μεγαλύτερο απαιτούμενο εύρος ζώνης και άλλες. Ειδικά στις περιπτώσεις συστημάτων πολλαπλών ΜΕΑ, τα δεδομένα είναι ακόμα πιο σύνθετα. Κατά συνέπεια, τα εφαρμοζόμενα μοντέλα κινητικότητας θα πρέπει να προσαρμόζονται στις ιδιαιτερότητες των δικτύων των ΜΕΑ καθώς επίσης και στα χαρακτηριστικά των αποστολών που δύνανται να αναλάβουν (επιτήρηση της εχθρικής κατάστασης, αναγνωρίσεις, κατάδειξη στόχων, μεταφορά και εκτόξευση πυρών κτλ).

2.3.3.1 Τυχαίο Σημειακό Μοντέλο Κινητικότητας (Random - Way Point mobility model , RWP)

Το Τυχαίο Σημειακό Μοντέλο Κινητικότητας προτάθηκε για πρώτη φορά από τους D.B. Johnson και D. A. Maltz. [53] και είναι ίσως το βασικότερο για την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης των κατ' απαίτηση δικτύων[51]. Αποτελεί παραλλαγή του Μοντέλου Τυχαίου Περιπάτου (Random Walk Model) που συχνά αναφέρεται και ως κίνηση Brownian. Χρησιμοποιείται συχνότατα λόγω της σχετικής του απλότητας αλλά και της συμβατότητας του ως προς πολλούς προσομοιωτές.

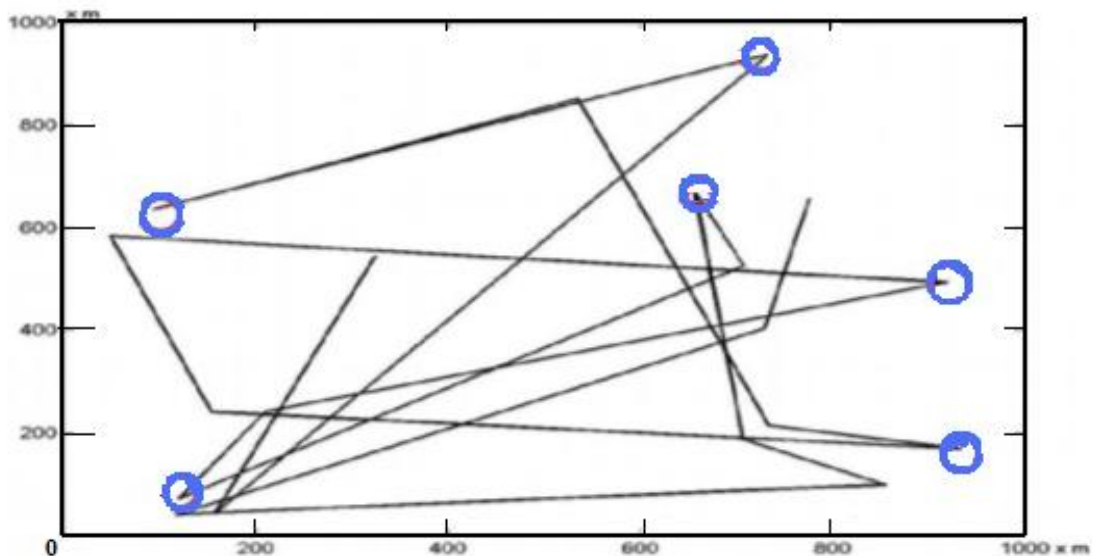
Το μοντέλο βασίζεται στην εξής διαδικασία : Κάθε κόμβος, μπορεί είτε να κινηθεί εμπρός είτε να στρίψει δεξιά ή αριστερά. Επιλέγει τυχαία μια θέση εντός της περιοχής προσομοίωσης και μεταβαίνει σε αυτή ακολουθώντας μια ευθεία πορεία, χρησιμοποιώντας μία τυχαίως επιλεγείσα ταχύτητα, από ένα διάστημα $[u_{min}, u_{max}]$. Οι τυχαίες τιμές που επιλέγονται ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή.

Κατά την άφιξη σε αυτή τη θέση, ο κόμβος σταματά για κάποιο χρονικό διάστημα και επιλέγονται νέα θέση και ταχύτητα ανεξάρτητα από την προηγούμενη ταχύτητα, την

προηγούμενη θέση και το χρόνο παύσης. Οι κόμβοι κατά την κίνησή τους συγκεντρώνονται κυρίως, στο κέντρο της περιοχής στην οποία βρίσκονται. Η πυκνότητα των κόμβων ελαττώνεται με την απομάκρυνση από το κέντρο της περιοχής προς τα άκρα.

Αν ο χρόνος παύσης οριστεί ως μηδενικός, ο κόμβος δεν σταματά ποτέ, παρά μόνο στο τέλος της προσομοίωσης, επιλέγοντας διαρκώς τυχαία νέα θέση για να μετακινηθεί, χωρίς παύση. Γενικά, ο κόμβος υπόκειται σε απότομες στάσεις, ξαφνικές επιταχύνσεις και απότομες αλλαγές ταχύτητας. Το ίδιο ισχύει και για την κατεύθυνση, με ενδεχόμενο ένας κόμβος να κάνει ξαφνικά μια στροφή 180 μοιρών. Στη περίπτωση όμως των ΜΕΑ, αυτά υπόκεινται σε μηχανικούς και αεροδυναμικούς περιορισμούς που δεν επιτρέπουν απότομες στροφές όπως αυτές.

Παρά την ευρεία χρήση αυτού του μοντέλου κινητικότητας, δυστυχώς δεν είναι ικανοποιητικά ρεαλιστικό (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7

Ένα βασικό πρόβλημα που παρουσιάζει το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ότι , όπως έχουν δείξει κάποιες μελέτες[37],το μοντέλο δεν φτάνει σε μια σταθερή κατάσταση όσον αφορά την ταχύτητα, κατά τη πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, η ταχύτητα συνεχώς μειώνεται. Αυτό μπορεί να επιλυθεί ορίζοντας την ελάχιστη ταχύτητα u_{min} με την οποία κινούνται οι κόμβοι ως μη μηδενική. Από πειράματα που έγιναν αποδεικνύεται ότι με αυτό το τρόπο, η ταχύτητα συγκλίνει σε μια σταθερή τιμή.

2.3.3.2 Κατανεμημένης Απωθητικής Φερομόνης Μοντέλο Κινητικότητας (Distributed Pheromone Repel mobility model)

Το συγκεκριμένο πρότυπο βασίζεται στη παρατήρηση του ζωικού βασιλείου[50]. Πιο συγκεκριμένα, ζώα όπως τα μυρμήγκια εκκρίνουν κάποια χημική ουσία, τη φερομόνη, η οποία είναι δυνατόν να τα καθοδηγεί σε θέσεις που υπάρχει τροφή. Η κατανεμημένη φύση των βασιζόμενων στη φερομόνη συστημάτων και η παρατήρηση ότι σύνθετες συμπεριφορές μπορούν να προκύψουν από την απλή λογική ελέγχου των στοιχείων ενός

δυναμικού συνόλου , καθιστούν την ελεγχόμενη βάσει φερομόνης κινητικότητα, σημαντικό αντικείμενο έρευνας. Μέσω προσομοιώσεων και πρακτικών δοκιμών έχουν αποδειχθεί η βιωσιμότητα της συγκεκριμένης θεωρίας και η δυνατότητα εφαρμογής της αποστολής τύπου αναγνώρισης, επιτήρησης και κατάδειξης στόχου καθώς και σε αποστολές καταδίωξης [54].

Όπως και στο Τυχαίο Σημειακό μοντέλο, κάθε κόμβος δύναται να κινηθεί εμπρός είτε να στρίψει αριστερά ή δεξιά.Για την καθοδήγηση των στοιχείων-κόμβων χρησιμοποιούνται δύο τύπων φερομόνη , απωθητική και ελκυστική. Οι απωθητικές φερομόνες υποχρεώνουν ένα κόμβο να αποφύγει μια περιοχή ενώ οι ελκυστικές προσελκύουν τους κόμβους σε κάποια περιοχή. Επειδή προφανώς, δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθούν οι φερομόνες στο

περιβάλλον, όπως συμβαίνει στα φυσικά συστήματα, τοποθετούνται σε έναν ειδικό χάρτη φερομόνης. Αυτός είναι ένα πλέγμα, όπου κάθε στοιχείο του περιέχει μια χρονική σήμανση που αντιπροσωπεύει την τελευταία φορά που το στοιχείο σαρώθηκε. Οι φερομόνες μετά την τοποθέτησή τους, εξασθενούν με την πάροδο του χρόνου.

Σε αποστολές επιτήρησης μια περιοχή μπορούν χρησιμοποιηθούν και οι δύο τύποι φερομόνης. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθείτε στο [54], στην προς επιτήρηση περιοχή τοποθετούνται αρχικά, ελκυστικές φερομόνες. Όταν μια περιοχή δεχθεί επίσκεψη από κάποιο στοιχείο, οι ελκυστικές φερομόνες αφαιρούνται και δεν παράγονται άλλες για κάποιο χρονικό διάστημα. Για να αποφευχθεί η περίπτωση κατά την οποία δύο στοιχεία επιχειρήσουν να ερευνήσουν την ίδια περιοχή, κάθε στοιχείο τοποθετεί απωθητικές φερομόνες στο επόμενο μέρος που θα μεταβεί. Στο [50], η καθοδήγηση των κόμβων γίνεται με διαφορετικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι κατευθύνονται προς περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα φερομόνης. Σε περίπτωση απουσίας αυτής, οι κόμβοι επιλέγουν τυχαία κατεύθυνση. Προκειμένου να αποφευχθεί κίνηση στη εξωτερική των ορίων περιοχή, αυτή χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση φερομόνης. Στη περίπτωση που ένας κόμβος κινείται ακριβώς προς μια γωνία της περιοχής ενδιαφέροντος (οπότε και αντιλαμβάνεται τα ίδια επίπεδα φερομόνης από δεξιά και αριστερά), εκτελεί δεξιά στροφή ώστε να απομακρυνθεί από τη γωνία.

Κατά την εφαρμογή μοντέλων φερομόνης, προκύπτει ένα κύριο ζήτημα. Αφορά το γεγονός του ότι φαίνεται να υπάρχει ένας καθολικός χάρτης φερομόνης στον οποίο

μπορούν να έχουν πρόσβαση όλα τα στοιχεία της κοινότητας. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που προσομοιώνονται σε πολύ καλό βαθμό τα συστήματα φερομόνης που εντοπίζονται στο ζωικό βασίλειο, δεν ισχύει το ίδιο για ένα μηχανικό σύστημα. Στη περίπτωση αυτού, οι φερομόνες πρέπει να τοποθετηθούν σε έναν εικονικό χάρτη και επομένως προκύπτει η απαίτηση για την ύπαρξη ενός κεντρικού κόμβου διαχείρισης του χάρτη. Κατά συνέπεια ο συγκεκριμένος σχεδιασμός καθιστά το σύστημα ευαίσθητο στην αποτυχία του εν λόγω κόμβου και προϋποθέτει τη επίτευξη καλής επικοινωνίας των υπόλοιπων κόμβων προς τον κόμβο-διαχειριστή.

Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι δεν καθορίζεται το προς τα που θα κινηθεί ένας κόμβος. Ενώ ο χάρτης φερομόνης είναι σαφής, οι περιοχές που αξιολογούνται δεν περιγράφονται προκειμένου να καταστεί δυνατή η επιλογή κάποιας από αυτές για κίνηση του κόμβου προς αυτή. Ο Parunak [55] προτείνει δύο προσεγγίσεις του ζητήματος για τις περιπτώσεις αποστολών εντοπισμού και περιγραφής στόχου. Κατά τη μία, με χαρακτήρα οντότητας, οι κόμβοι χρησιμοποιούν оф λάιν (offline) καθορισμένα μονοπάτια για να πραγματοποιήσουν τις μεταβάσεις τους. Κατά την άλλη προσέγγιση, που έχει ομαδικό χαρακτήρα, χρησιμοποιούνται φερομόνες που δηλώνουν ότι μια συγκεκριμένη περιοχή έχει πρόσφατα ελεγχθεί αποτρέποντας τους άλλους κόμβους να κινηθούν προς αυτή.

Για να προκύψει μια στιβαρή και κατανεμημένη λύση σε αυτή την κατεύθυνση, θα πρέπει κάθε κόμβος να διατηρεί τον δικό του χάρτη φερομόνης τον οποίο θα

ενημερώνει κάθε φορά που θα περνά μέσα από μια περιοχή. Για να μοιραστεί αυτές τις πληροφορίες φερομόνης με τους άλλους κόμβους, θα πρέπει να μεταδίδει τακτικά (ανά 10 δευτερόλεπτα) το χάρτη φερομόνης της περιοχής. Οι υπόλοιποι κόμβοι που βρίσκονται εντός εμβέλειας επικοινωνίας, λαμβάνουν την εκπομπή και ενημερώνουν αντίστοιχα τον χάρτη τους με τις νέες πληροφορίες. Η συχνότητα εκπομπής και το μέγεθος του χάρτη που μεταδίδεται πρέπει να ρυθμίζονται ώστε να περιορίζεται το εύρος ζώνης που απαιτείται για τη μεταφορά της πληροφορίας φερομόνης. Έτσι, όταν ένας κόμβος αποφασίζει για την επόμενη μετακίνησή του, επιλέγει τυχαία μια θέση, με

πιθανότητα που είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την απόσταση από τη θέση και τη συγκέντρωση φερομόνης σε αυτή. Στη συνέχεια ενημερώνει το χάρτη του και τους υπόλοιπους κόμβους.

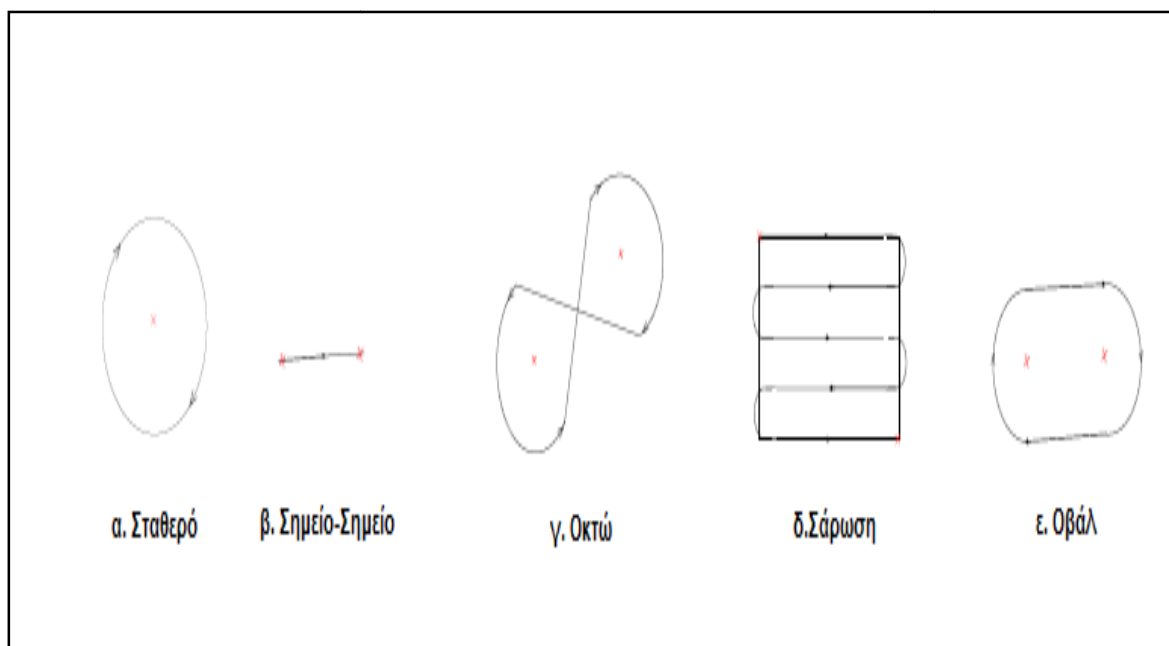
Η αξιολόγηση των παραπάνω προσεγγίσεων είναι δύσκολη υπόθεση[56]. Για την ακρίβεια, δεν υπάρχει κάποια κοινή μέθοδος για την αξιολόγηση ενός καινούριου μοντέλου κινητικότητας ή για την σύγκρισή του με κάποιο άλλο. Στο [47] επιχειρείται μια προσπάθεια σύγκρισης κάποιων συνήθων προτύπων κινητικότητας λαμβάνοντας υπόψη μόνο μεγέθη απόδοσης του δικτύου, όπως το ρυθμό παράδοσης πακέτων δεδομένων ή τον αριθμό των αλμάτων

2.3.3.3 PAPERAZZI Μοντέλο Κινητικότητας (PAPERAZZI MOBILITY MODEL , PPRZM)

Ένα άλλο κατάλληλο μοντέλο για προσομοίωση σε ρεαλιστικές συνθήκες προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση πρωτοκόλλων, βασίζεται στο σύστημα Paparazzi [56]. Αυτό είναι ένα ανοικτού κώδικα σύστημα υλικού και λογισμικού και προορίζεται τόσο για MEA τύπου σταθερής πτέρυγας όσο και για τύπου περιστρεφόμενων πτερύγων. Αποτελείται από τον αυτόματο πιλότο, τον επίγειο σταθμό για το σχεδιασμό της αποστολής και το λογισμικό παρακολούθησης.

Τα MEA ενός τέτοιου συστήματος, δύνανται να εκτελέσουν 5 κινήσεις:

- *Σταθερή (Stay-At)*. Αιώρηση πάνω από μια σταθερή θέση (Σχήμα 2.8α)
- *Σημείο-Σημείο (Way - Point)*. Ευθεία διαδρομή προς τη θέση προορισμού (Σχήμα 2.8β).
- *Οκτώ (Eight)*. Η τροχιά του αεροχήματος έχει τη μορφή του αριθμού 8 γύρω από 2 σταθερές θέσεις (Σχήμα 2.8γ).
- *Σάρωση (Scan)*. Σάρωση μιας περιοχής που ορίζεται από 2 σημεία κατ μήκος των τροχιών μετ' επιστροφής (Σχήμα 2.8δ).
- *Οβάλ (Oval)*. Διαδρομή ελλειψοειδούς μορφής γύρω από 2 σημεία (Σχήμα 2.8ε).

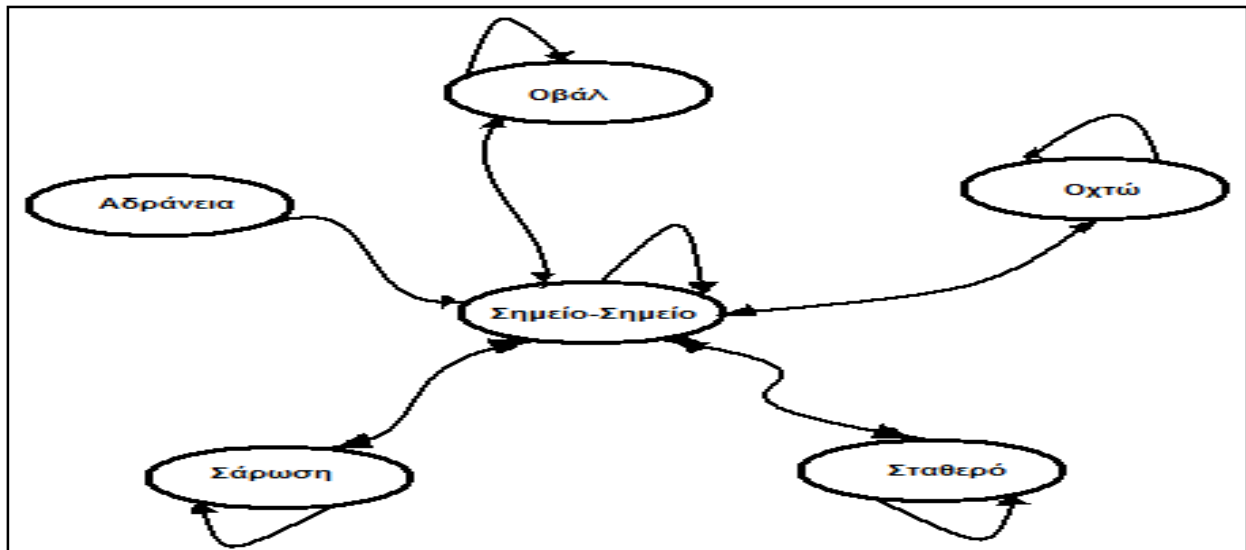


Σχήμα 2.8

Το ομώνυμο μοντέλο κινητικότητας (Paparazzi Mobility Model , PPRZM) είναι ένα στοχαστικό μοντέλο , το οποίο μιμείται τη συμπεριφορά των ΜΕΑ , με βάση διάγραμμα της μηχανής καταστάσεων (Σχήμα 2.9) .

Κάθε ΜΕΑ επιλέγει έναν τύπο κίνησης και προσαρμόζει ανάλογα τα εξής χαρακτηριστικά του [56]:

- **Θέση.** Λαμβάνει κεντρικές θέσεις για κινήσεις τύπου « Σταθερό », «Οκτώ» , και «Οβάλ » ή τις θέσεις αφετηρίας και τέλους για τις κινήσεις τύπου «Σάρωση » και «Σημείο-Σημείο» .
- **Ταχύτητα.** Λαμβάνει τυχαία τιμή μεταξύ 15 - 25 m/s.



Σχήμα 2.9

Έτσι , κάθε ΜΕΑ καταλαμβάνει αρχικά μια θέση κατά τη «Σημείο-Σημείο» κίνηση του και στη συνέχεια ακολουθεί ένα καλώς ορισμένο μονοπάτι σύμφωνα με τον τύπο κίνησης που επιλέχθηκε . Το ύψος κάθε αεροχήματος καθορίζεται τυχαία στην αρχή και παραμένει σταθερό μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

Κάθε τύπος κίνησης έχει διαφορετικές πιθανότητες εμφάνισης. Συνήθως οι πιο πιθανοί τύποι είναι οι « Σταθερό », «Οβάλ » και «Σάρωση » . Ωστόσο , χρησιμοποιούνται προκαθορισμένες πιθανότητες σύμφωνα με τις οποίες οι προαναφερθέντες τύποι έχουν εξίσου 30% πιθανότητα εμφάνισης ενώ οι τύποι «Οκτώ» και «Σημείο-Σημείο» έχουν 5% πιθανότητα [56].

2.3.3.4 Ημι-Τυχαίο Κυκλικής Κίνησης Μοντέλο Κινητικότητας (Semi-Random Circular Movement mobility model, SRCM)

Το Ημι-Τυχαίο Κυκλικής Κίνησης μοντέλο κινητικότητας (Semi-Random Circular Movement ,SRCM) έχει σχεδιαστεί για περιπτώσεις που χαρακτηρίζονται από καμπύλη πορεία και είναι κατάλληλο για την προσομοίωση των ΜΕΑ που στρέφονται γύρω από μια

συγκεκριμένη θέση, προκειμένου να συγκεντρώσουν πληροφορίες όπως για παράδειγμα, σε αποστολές έρευνας και διάσωσης[43] . Πιο συγκεκριμένα, τα ΜΕΑ κινούνται κυκλικά με τυχαία ακτίνα γύρω από ένα σταθερό κέντρο. Αφού ολοκληρώσουν έναν κύκλο, επιλέγεται νέα ακτίνα και εκτελούν νέα κυκλική πορεία γύρω από το ίδιο κέντρο. Προφανώς, η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος.

Το συγκεκριμένο μοντέλο φαίνεται να περιορίζεται, λόγω της εξάρτησης της προς κάλυψη περιοχής από ένα σημείο του οποίου η θέση δεν αλλάζει [43]. Ωστόσο όμως , αποδίδει πολύ καλά την κινητικότητα των ΜΕΑ σε αποστολές έρευνας και διάσωσης. Σε αυτές της περιπτώσεις συνήθως, είναι διαθέσιμες εκ των προτέρων κάποιες πληροφορίες

για την πιθανή θέση του προς αναζήτηση στόχου και τα ΜΕΑ αποστέλλονται προκειμένου να εντοπίσουν την ακριβή θέση αυτού. Κατά συνέπεια είναι εύλογο να χρησιμοποιηθούν αυτές οι πληροφορίες για την επιλογή του κατάλληλου σημείου που θα αποτελέσει το σταθερό κέντρο των κυκλικών πορειών επί των οποίων θα αιωρούνται τα ΜΕΑ για τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης. Επιπλέον, η γνώση σχετικά με τη πιθανή θέση του στόχου (ή ισοδύναμα, το σταθερό κέντρο) παρέχει πληροφορίες για την πρόβλεψη της συνολικής πορείας αλλά και για την κατανόηση των δομών συνδεσιμότητας του εναέριου ασύρματου δικτύου.

Γενικά, τα υπάρχοντα μοντέλα κινητικότητας που χαρακτηρίζονται από τυχαιότητα και απλές ευθύγραμμες κίνησης οδηγούν συνήθως σε μη ρεαλιστικά σενάρια και σε μη ομοιόμορφες κατανομές των κόμβων οι οποίες έχουν αρνητική επίδραση στη μελέτη, μέσω του μοντέλου κινητικότητας, των χαρακτηριστικών ενός δικτύου επικοινωνιών για ΜΕΑ. Τα παραπάνω ζητήματα τείνουν να επιλυθούν με την εισαγωγή του Ημι-Τυχαίου Κυκλικής Κίνησης μοντέλου κινητικότητας. Αποδεικνύεται δε μέσω προσομοίωσης[43] ότι, το εν λόγω μοντέλο με ομοιόμορφη κατανομή παρέχει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με το Τυχαίο Σημειακό μοντέλο, που χρησιμοποιείται ευρέως στη αξιολόγηση των MANET δικτύων.

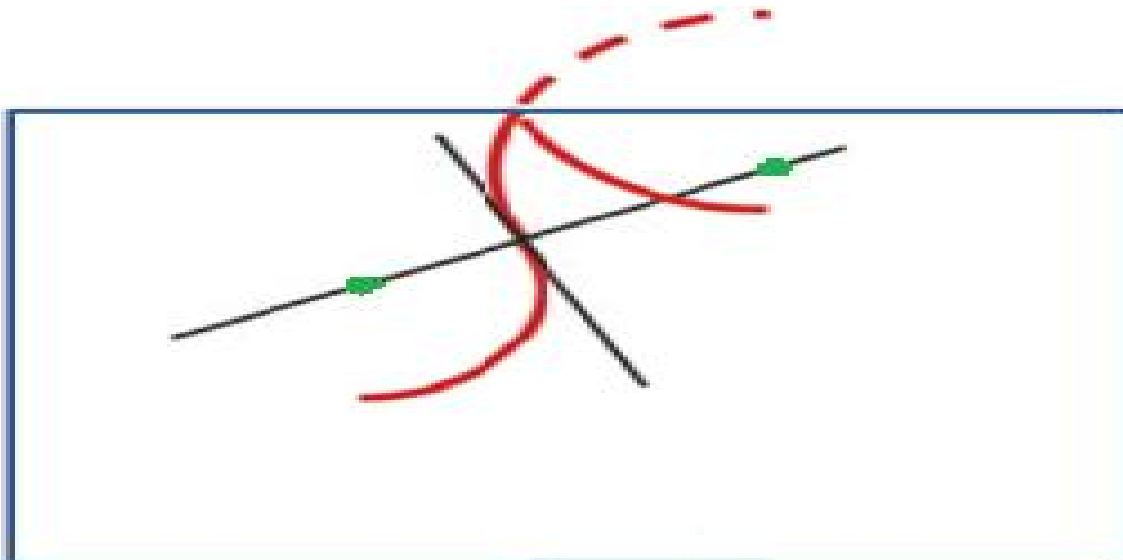
2.3.3.5 Ομαλής Στροφής Μοντέλο Κινητικότητας (The Smooth Turn (ST) mobility Model)

Το Ομαλής Στροφής μοντέλο κινητικότητας [34] βασίζεται στην εξής ιδέα: Ο κόμβος επιλέγει τυχαία ένα σημείο κατά μήκος μιας κάθετης γραμμής προς την πορεία κατεύθυνσης και εκτελεί κύκλους γύρω από το σημείο αυτό για μια χρονική περίοδο. Σημειώνεται ότι, χάριν στη καθετότητα διασφαλίζεται η ομαλότητα των τροχιών. Όταν η χρονική περίοδο της κυκλικής κίνησης λήξει, ο κόμβος επιλέγει με τον ίδιο τρόπο νέο κέντρο και εκτελεί κύκλους γύρω από αυτό για ακόμα μια χρονική περίοδο, πιθανότατα διαφορετική από την προηγούμενη. Έτσι, ο κόμβος κινείται συνεχώς σε κυκλικά τόξα. Η επιλογή των κέντρων είναι τυχαία καθώς και η επιλογή της διάρκειας της κίνησης κατά μήκος του αντίστοιχου κυκλικού τόξου. Ωστόσο, η ποιότητα της τυχαιότητας είναι διαφορετική. Για τις χρονικές περιόδους, η κατανομή είναι εκθετική, προκειμένου η χρονική στιγμή της αλλαγής του κέντρου να μην εξαρτάται από τη διάρκεια για την οποία ο κόμβος έχει διατηρήσει το τρέχον κέντρο. Αυτές οι χρονικές περιόδους κατά τις οποίες ένας κόμβος κάνει κύκλους γύρω από ένα συγκεκριμένο κέντρο που αναφέρονται επίσης και ως χρόνοι αναμονής και δεν χαρακτηρίζονται από την έννοια της μνήμης.

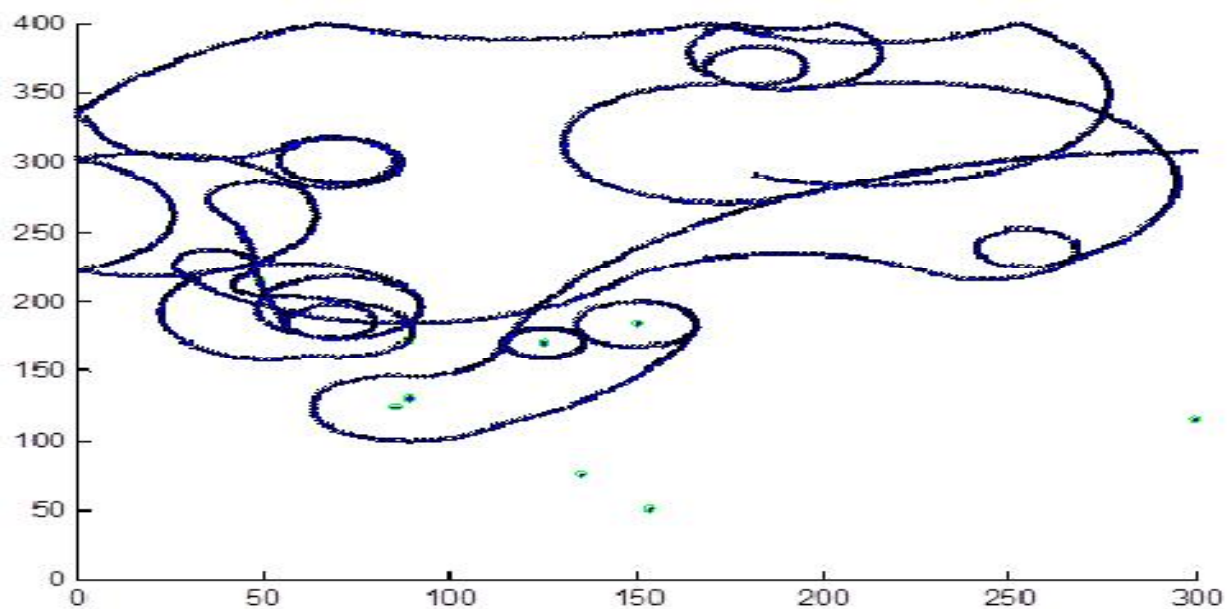
Για την επιλογή των κέντρων, μοντελοποιείται το αντίστροφο μήκος της ακτίνας στροφής ως κατανομή Γκάους. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι οι ευθείες γραμμές και οι μικρές στροφές ευνοούνται σε σχέση με τις πολύ απότομες στροφές. Έχοντας

πολύ μεγάλη ακτίνα, το κυκλικό τόξο μοιάζει με μια ευθεία γραμμή. Στο όριο, εφαρμόζεται ένα μοντέλο «αντανάκλασης», που συνίσταται απλώς στο καθρεπτισμό της εκτός περιοχής τροχιάς ως προς το εν λόγω όριο, (Σχήμα 2.10). Τα πράσινα σημεία αντιπροσωπεύουν τα κέντρα των κυκλικών τόξων. Στο Σχήμα 11 φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από προσομοίωση με εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου [35]. Τα κέντρα των στροφών σημειώνονται ως πράσινα σημεία. Πρέπει να

σημειωθεί ότι αυτά τα κέντρα δεν βρίσκονται κατ 'ανάγκη μέσα στην περιοχή προσομοίωσης, δεδομένου μάλιστα ότι, πολύ συχνά επιλέγονται μεγάλες ακτίνες.



Σχήμα 2.10



Σχήμα 2.11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Σχεδιασμός τροχιών ΜΕΑ.

3.1 Γενικά

Η έρευνα για την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση των ΜΕΑ προσανατολίζεται εκτός των άλλων και στην κατεύθυνση της επίτευξης καθολικής αυτονομίας αυτών. Στην δυνατότητά τους δηλαδή, να επιχειρούν περιορίζοντας την ανθρώπινη παρέμβαση στον ελάχιστο δυνατό βαθμό και αυξάνοντας τα οφέλη της χρησιμοποίησής τους έναντι των επανδρωμένων αεροχημάτων. Στα πλαίσια αυτής, ένα ΜΕΑ δύναται να καταστεί ικανό να ελέγχει την λειτουργική κατάστασή του, να χρησιμοποιεί τον εξοπλισμό του “αυτοβούλως” προκειμένου να διεκπεραιώσει την αποστολή του κατά τον βέλτιστο τρόπο αλλά και να αλληλεπιδρά με άλλα ΜΕΑ στα πλαίσια ενός δυναμικού συνόλου-ομάδος.

Επιπλέον, δύναται να ενημερώνεται διαρκώς για τις μεταβολές του περιβάλλοντος στο οποίο επιχειρεί και να προσαρμόζεται σε αυτές. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιλέγει την τροχιά επί της οποίας θα κινηθεί κατά την εκτέλεση μιας αποστολής αλλά και να την επαναπροσδιορίζει εφόσον αυτό επιβάλλεται από τις εκάστοτε συνθήκες. Η παραπάνω δυνατότητα επιτρέπει πτήσεις σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη απαγορευμένων ζωνών λόγω παρουσίας φυσικών εμποδίων, ραντάρ ανίχνευσης ή διαφόρων άλλων απειλών. Κατά συνέπεια , ο σχεδιασμός των τροχιών κατά αυτόνομο τρόπο, από το ίδιο ΜΕΑ, αποτελεί σημαντικό ζήτημα στα πλαίσια της αύξησης των οφελών του σε σχέση με τα αντίστοιχα επανδρωμένα μέσα.

3.2 Το πρόβλημα της σχεδίασης τροχιάς.

Η εκτέλεση αποστολών από ένα ή περισσότερα ΜΕΑ προϋποθέτει το σχεδιασμό δρομολογίων πτήσης επί των οποίων θα κινηθούν αυτά προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι που συνθέτουν την εκάστοτε αποστολή. Τα δρομολόγια αυτά θα πρέπει να είναι τα βέλτιστα δυνατά, εξασφαλίζοντας την ικανοποίηση παραγόντων όπως η ασφάλεια των μέσων έναντι απειλών, η ταχύτητα εκτέλεσης της αποστολής και η εξοικονόμηση των ενεργειακών πόρων. Ο σχεδιασμός τους είναι δυνατόν να ολοκληρώνεται πριν την έναρξη της αποστολής, ειδικά για τα μη αυτόνομα ΜΕΑ, ή να συνεχίζεται κατά τη διάρκεια της, προκειμένου να προσαρμόζεται σε τυχούσες νέες συνθήκες.

Στη πρώτη περίπτωση προϋποτίθεται ότι τα δεδομένα (θέσεις εμποδίων, ύπαρξη ραντάρ εντοπισμού, ρυθμός μείωσης ενεργειακών αποθεμάτων, χρόνος πέρατος αποστολής κτλ) είναι γνωστά εξ αρχής κατά ντετερμινιστικό τρόπο και δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης με αποτέλεσμα να γίνεται απλούστερος ο σχεδιασμός, έχοντας όμως πάντα ως γνώμονα την εξαγωγή των βέλτιστων τροχιών. Στη δεύτερη περίπτωση, αυτή η διαδικασία είναι πιο σύνθετη. Οι μεταβολές των δεδομένων (οι οποίες ενίοτε είναι δυνατόν να εκτιμούνται εκ των προτέρων βάσει γνώσης της πιθανότητας εμφάνισής των διάφορων στοιχείων) οδηγούν στην ανάγκη επαναπροσδιορισμού της τροχιάς και κατά συνέπεια θα πρέπει να γίνονται άμεσα αντιληπτές από το σχεδιαστή.

Αυτό προϋποθέτει την ανάπτυξη επιπλέον σύνθετων υποσυστημάτων των MEA, ικανών να αντιλαμβάνονται άμεσα τις όποιες αλλαγές προκύψουν στο επιχειρησιακό περιβάλλον και να τις μεταφέρουν στον σχεδιαστή, το ρόλο του οποίου στη περίπτωση των αυτόνομων MEA , είναι επιθυμητό να τον αναλαμβάνουν τα ίδια. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του τα καθιστά ακόμα πιο πολύπλοκα ως συμπλέγματα υποσυστημάτων, που θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από ισχυρές υπολογιστικές ικανότητες και ταχύτατες αποκρίσεις. Προφανώς, το αντίτιμο αυτής της πολυπλοκότητας είναι η αποφυγή εμπλοκής του ανθρωπίνου στοιχείου στην εκτέλεση της αποστολής , που σε αντίθετη περίπτωση θα περιόριζε τη σχέση κόστους- αποτελεσματικότητας της χρησιμοποίησης MEA για την εκτέλεση αποστολών [57], [58].

Όπως δύναται να γίνει κατανοητό, εκτός από την ανάπτυξη αυτών των υποσυστημάτων, απαιτείται και η ύπαρξη κατάλληλων μεθόδων σχεδίασης πάνω στις οποίες θα βασιστεί η λειτουργία των εν λόγω μηχανισμών. Με το συνδυασμό αυτών των στοιχείων θα εξασφαλίζεται η παραγωγή αξιόπιστων και αποτελεσματικών τροχιών σε πραγματικό χρόνο και σε ποικίλα επιχειρησιακά περιβάλλοντα δυναμικού χαρακτήρα, στοιχεία που καθιστούν το σχεδιασμό τροχιών μια μορφή προβλήματος βελτιστοποίησης. Οι συγκεκριμένοι μέθοδοι βασίζονται στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την περιγραφή των τροχιών των MEA. Η ανάπτυξη ορισμένων από αυτές τις μεθόδους θα παρουσιαστεί παρακάτω. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, ένα από τα βασικά μέσα για αυτό το σκοπό είναι ο Προβλεπτικός Έλεγχος, έννοια η οποία διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης .

Όσον αφορά την γενικότερη περιγραφή του προβλήματος του σχεδιασμού δρομολογίου για ένα MEA που επιχειρεί σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον, αυτή μπορεί να δοθεί μέσα από τις παρακάτω παραδοχές[57] :

- Το όχημα μοντελοποιείται ως ένα μοντέλο χώρου καταστάσεων διακριτού χρόνου που υπόκειται σε μία διαταραχή άγνωστης αλλά φραγμένης φυσιογνωμίας.

- Η θέση $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ του οχήματος απαιτείται να παραμένει εντός ενός συνόλου περιβαλλοντικών ορίων κυρτού χαρακτήρα. Η ταχύτητα $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ και η επιτάχυνση $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^3$ εισόδου υπόκεινται επίσης σε πιθανούς περιορισμούς μη- κυρτού χαρακτήρα οι οποίοι προκύπτουν από κριτήρια ασφαλείας και/ή περιορισμούς του υπολογιστικού υλικού.

- Το περιβάλλον μπορεί να περιέχει πεπερασμένο αριθμό από κυρτού χαρακτήρα ζώνες απαγόρευσης πτήσης οι οποίες υποτίθεται ότι είναι στατικής φυσιογνωμίας. Κάθε τέτοια ζώνη πρέπει να κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας είτε σκληρούς είτε χαλαρούς περιορισμούς , ανάλογα με τη φύση της.

- Το σύνολο των ζωνών απαγόρευσης πτήσης πιθανόν να μην είναι παντελώς γνωστό από το όχημα ανά πάσα χρονική στιγμή. Υποτίθεται όμως ότι η γνώση του περιβάλλοντος είναι ακριβής για κάποια ακτίνα R_d . Στη περίπτωση που το όχημα έχει πλήρη γνώση του περιβάλλοντός του ισχύει ότι $R_d = +\infty$.

- Σε κάθε χρονικό βήμα, το όχημα χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο επιδιωκόμενο σημείο p_G , το οποίο πιθανόν να συσχετίζεται με μία επιδιωκόμενη ταχύτητα v_G και / ή άλλους παράγοντες όπως κάποιος χρόνος άφιξης συγκεκριμένης τιμής.

- Η αντικειμενική συνάρτηση περιγραφής της κίνησης πιθανόν να είναι συνδυασμός από επιμέρους παράγοντες όπως, όροι ελάχιστου χρόνου, κατάσταση και βάρη εισόδου καθώς και κυρώσεις παραβίασης χαλαρών περιορισμών.

Έχοντας δοθεί μια περιγραφή του προβλήματος, τα βασικότερα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιεί η επιτυχής επίλυση αυτού, είναι τα παρακάτω:

- Ικανοποίηση όλων των αυστηρών περιορισμών σε κάθε χρονική στιγμή και για κάθε δυνατή αλληλουχία παρενοχλήσεων και όσο το δυνατόν πιο συχνή ικανοποίηση των χαλαρότερων περιορισμών σύμφωνα με το αντίτιμο του καθενός επί της αντικειμενικής συνάρτησης.

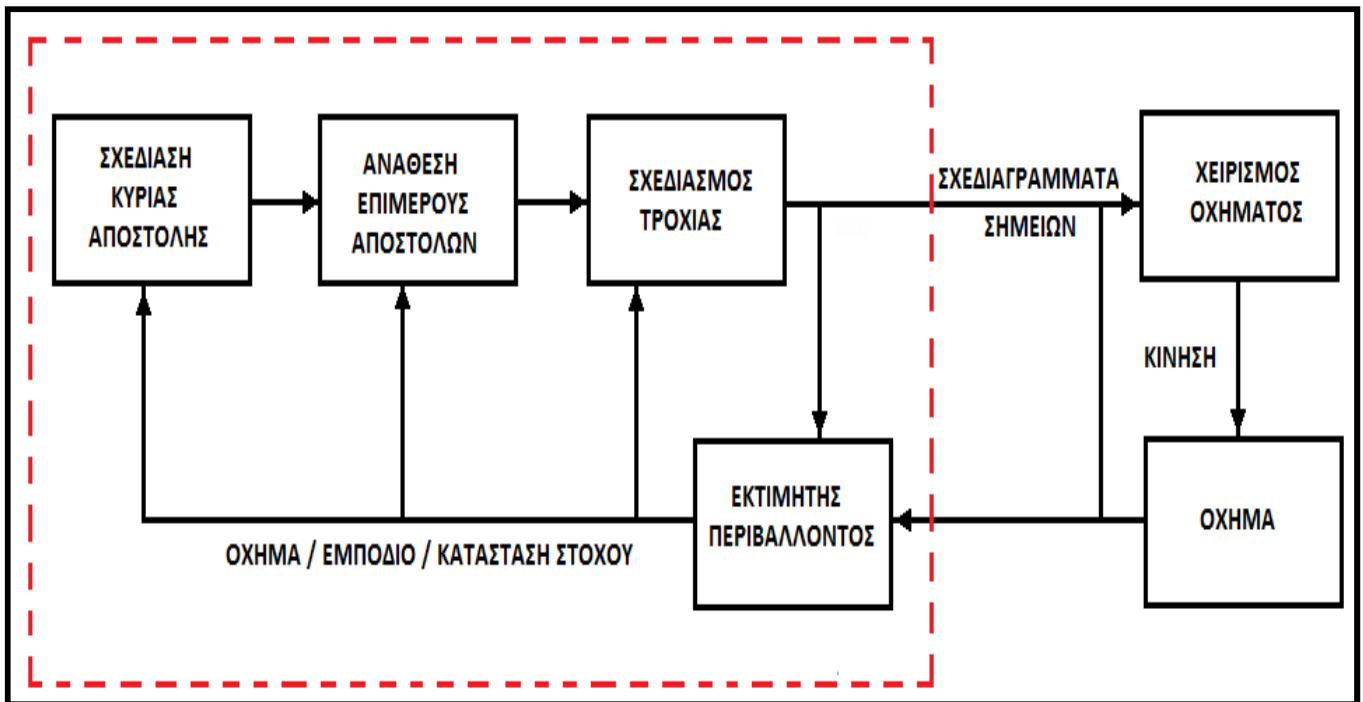
- Εξασφάλιση καλής απόδοσης από τις προκύπτουσες τροχιές , μετρούμενης από τη πλευρά των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης.

- Εξασφάλιση δυνατότητας για σχεδίαση πραγματικού χρόνου σε επιχειρήσεις με την έννοια ότι η βελτιστοποίηση δύναται να αποκριθεί επαρκώς και άμεσα στις αλλαγές του περιβάλλοντος.

- Εξασφάλιση σταθερότητας των ποιοτικών χαρακτηριστικών του σχεδίου τροχιάς σε περίπτωση απουσίας νέων πληροφοριών.

- Διατήρηση της κίνησης του ΜΕΑ, από τον χαμηλού-επιπέδου ελεγκτή του, σε τροχιά όσο το δυνατόν πλησιέστερη ως προς την τροχιά εισόδου , με έμφαση στην ακριβή χρονικά άφιξη επί των σημείων που τη συνθέτουν.

Σχετικά με την ανάλυση του προβλήματος της σχεδίασης τροχιών, ένας τρόπος διαχωρισμού αυτού σε επιμέρους, απλούστερα υποπροβλήματα, προκειμένου να επιτευχθεί η ανεξάρτητη αντιμετώπιση των θεμελιωδών προκλήσεων της σχεδίασης, φαίνεται[57], [59]στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1

Σύμφωνα με αυτό τον τρόπο ανάλυσης διακρίνονται τα εξής υποπροβλήματα:

vii. *Σχεδίαση Κύριας Αποστολής*: ορισμός των ενδιάμεσων αντικειμενικών σκοπών που πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να εκπληρωθεί η αποστολή στο βέλτιστο βαθμό.

viii. *Ανάθεση Επιμέρους Αποστολών*: καθορισμός του ποιο ή ποια ΜΕΑ θα εκτελέσουν την κάθε ενδιάμεση αποστολή.

ix. *Σχεδιασμός Τροχιάς*: αναγνώριση κάποιας εφικτής αλληλουχίας σημείων της τροχιάς εκάστου ΜΕΑ βάσει των σημείων που προκύπτουν από τις παραπάνω ενδιάμεσες αποστολές .

x. *Χειρισμός Οχήματος*: υπολογισμός μιας τροχιάς αναφοράς που θα χρησιμοποιηθεί από τον αντίστοιχο ελεγκτή ο οποίος θα υπολογίσει τις απαραίτητες εισόδους ενεργοποίησης για το όχημα βασιζόμενος στις αποκλίσεις από αυτή τη τροχιά αναφοράς.

Γενικά, η βελτιστοποίηση περιορισμένων δυναμικά και κινηματικά διαδρομών είναι ένα σημαντικό ζήτημα όσον αφορά τον έλεγχο αυτόνομων οχημάτων. Λόγω του ότι το πεδίο των δυνατών ενεργειών ελέγχου είναι πολύ μεγάλο και του ότι είναι δύσκολο να επιτευχθούν απλοποιήσεις χωρίς υποβάθμιση του μέγιστου δυνατού επιθυμητού αποτελέσματος[60],[61],[62] η σχεδίαση βέλτιστων και δυναμικών εφικτών τροχιών καθίσταται ιδιαίτερα περίπλοκο πρόβλημα.

3.3 Μέθοδοι σχεδίασης τροχιών.

Όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη ενότητα, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για το σχεδιασμό των διαδρομών που θα ακολουθήσουν τα ΜΕΑ προκειμένου να εκτελέσουν την αποστολή τους. Αυτές έχουν ως επιδίωξη την μοντελοποίηση κατά μαθηματικό τρόπο και κατ' επέκταση, τη βελτιστοποίηση της εκάστοτε τροχιάς, ώστε να καταστεί εφικτή η υλοποίησή της κίνησης των αεροχημάτων επί αυτών, μέσω της λειτουργίας των υποσυστημάτων που τα συνθέτουν. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη επιδίωξη αποτελεί στοιχείο ενός ιδιαίτερα περίπλοκου προβλήματος βελτιστοποίησης για το οποίο ο πολυδιάστατος χαρακτήρας του χώρου και ο μεγάλος βαθμός ελευθερίας των ενεργειών ελέγχου καθιστά την επίλυση του μία δύσκολη υπόθεση. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάπτυξη ορισμένων μεθόδων σχεδίασης που έχουν εφαρμοστεί στο επιστημονικό πεδίο των ΜΕΑ.

3.3.1 Συνδυασμός Ελέγχου Κυλιόμενου Ορίζοντος και Μικτού Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού

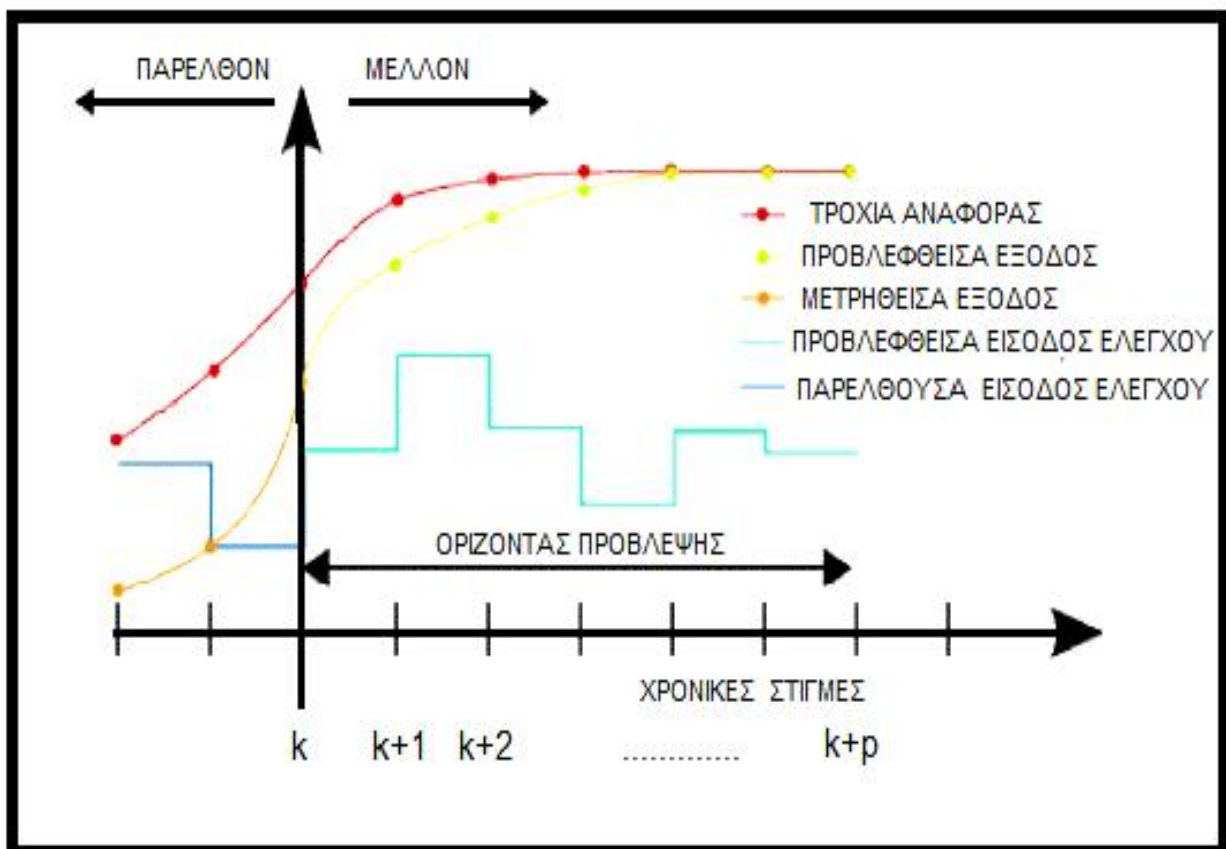
Σημαντικό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων σαν το παραπάνω είναι το Μοντέλο Προβλεπτικού Ελέγχου (Model Predictive Control, MPC) [57], [59] . Το όνομα αυτό [63] προέκυψε από την ιδέα της χρησιμοποίησης ενός σαφούς μοντέλου της εκάστοτε ελεγχόμενης διαδικασίας για τη πρόβλεψη της συμπεριφοράς των μελλοντικών εξόδων αυτής. Πρόκειται [64] για ένα σύνολο τεχνικών ελέγχου με κοινό χαρακτηριστικό τη χρήση μαθηματικών μοντέλων, προκειμένου να προβλεφθούν μελλοντικές συμπεριφορές των προς ανάπτυξη συστημάτων και να επιλεγεί η καταλληλότερη διαδικασία ελέγχου, πάντα στην κατεύθυνση της βελτιστοποίησης. Οι ρυθμιστές του Μοντέλου Προβλεπτικού Ελέγχου στηρίζονται σε δυναμικά μοντέλα της διεργασίας, πολύ συχνά γραμμικού χαρακτήρα αλλά και σε εμπειρικά μοντέλα που προσδιορίζονται από ένα σύστημα αναγνώρισης. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται αποσκοπούν, στις περισσότερες των περιπτώσεων, στην προσομοίωση της συμπεριφοράς σύνθετων δυναμικών συστημάτων.

Σε κάποιες των περιπτώσεων το Μοντέλο Προβλεπτικού Ελέγχου δεν είναι απαραίτητο για την εξασφάλιση ελέγχου σε απλά συστήματα, εφόσον αυτά δύναται να ρυθμίζονται ικανοποιητικά από τους κλασικούς PID ρυθμιστές. Οι συγκεκριμένοι όμως

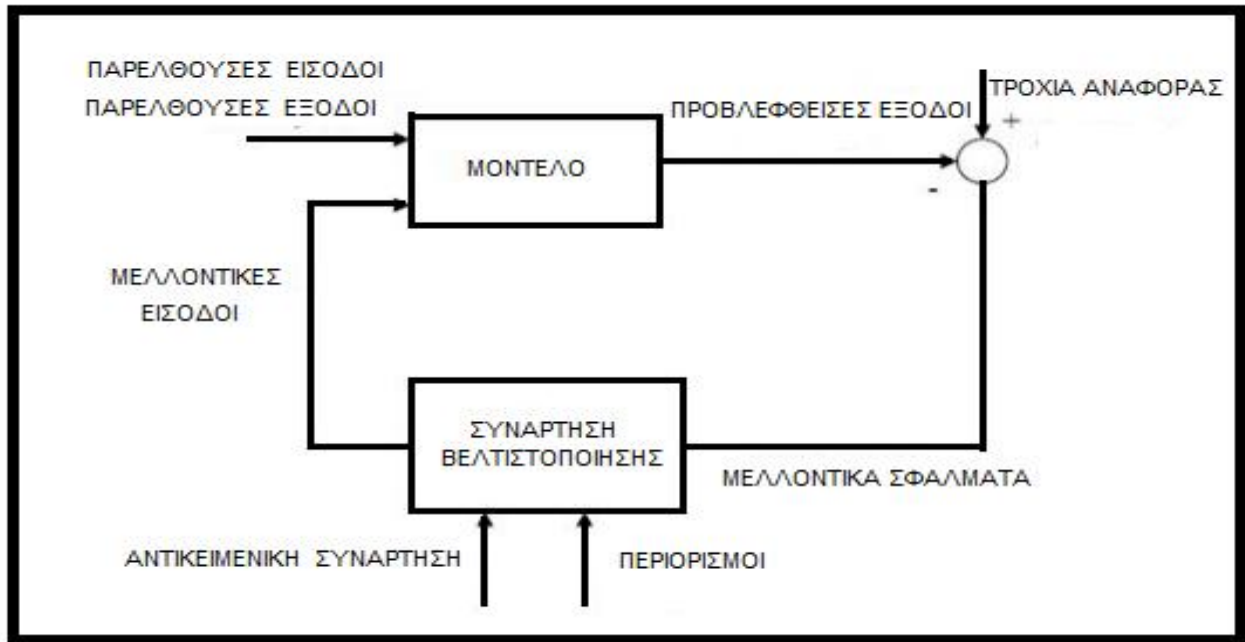
αδυνατούν να αντεπεξέλθουν σε χαρακτηριστικά όπως, οι μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις και οι δυναμικές υψηλής τάξης. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται

προβλέπουν τις αλλαγές στις εξαρτημένες μεταβλητές του συστήματος, που οφείλονται σε μεταβολές των ανεξάρτητων μεταβλητών αυτού. Οι δε ανεξάρτητες μεταβλητές που δεν μπορούν να ρυθμιστούν από τους ρυθμιστές γίνονται αντιληπτές ως διαταραχές.

Ο Προβλεπτικός Έλεγχος χρησιμοποιεί τα τρέχοντα χαρακτηριστικά και την τρέχουσα δυναμική κατάσταση της εκάστοτε διεργασίας, τα διαθέσιμα δυναμικά μοντέλα καθώς και, τους στόχους και τα όρια των ρυθμιζόμενων μεταβλητών προκειμένου να υπολογίσει τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού μέσα στα όρια ενός ορίζοντα πρόβλεψης. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται προκειμένου να προσεγγίζονται πάντα οι τεθέντες στόχοι και να ικανοποιούνται οι περιορισμοί του συστήματος. Στα πλαίσια του Μοντέλου Προβλεπτικού Ελέγχου εφαρμόζεται συνήθως μόνο η αρχική ρυθμιστική διαδικασία και οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται εκ νέου στις επόμενες χρονικές στιγμές. Στο Σχήμα 3.2 αναπαριστάται η γενική ιδέα αυτού, ενώ στο Σχήμα 3.3 , η βασική δομή του[64] .



Σχήμα 3.2



Σχήμα 3.3

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι ο Προβλεπτικός Έλεγχος είναι γνωστός στη βιβλιογραφία και ως Έλεγχος Υποχωρόντος Ορίζοντος (Receding Horizon Control, RHC). Η ονομασία αυτή οφείλεται στη μετατόπιση του ορίζοντα πρόβλεψης προς μεγαλύτερες χρονικές τιμές.

Το Μοντέλο Προβλεπτικού Ελέγχου μπορεί να διατυπωθεί στο χώρο των καταστάσεων με την βοήθεια των παρακάτω γραμμικών εξισώσεων διακριτών τιμών χρόνου [7]:

$$\Sigma: \begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad x(0) = x_0 \quad , \quad \text{όπου:}$$

- Σ είναι το μοντέλο της προς έλεγχο διεργασίας που περιγράφεται,
- $x(t) \in R^n$ δηλώνει την κατάσταση,
- $u(t) \in R^m$ δηλώνει τη την είσοδο ελέγχου,
- $y(t) \in R^p$ δηλώνει την έξοδο.

Μέσω της $x(t+k, x(t), \Sigma)$ δηλώνεται η πρόβλεψη που επιτυγχάνεται από τις παραπάνω εξισώσεις, k φορές μετά από τη τρέχουσα κατάσταση $x(t)$.

Βασικά , ο Έλεγχος Υποχωρούντος Ορίζοντος συνίσταται [6] στην επίλυση του παρακάτω προβλήματος βελτιστοποίησης ανοιχτού βρόχου:

$$\mathbf{U} \triangleq \{u(t+k|t)\}_{k=t}^{t+N_m-1} \quad J(\mathbf{U}, x(t), N_p, N_m) = x^T(N_p)P_0x(N_p) + \sum_{k=0}^{N_p-1} x'(t+k|t)Qx(t+k|t) + \sum_{k=0}^{N_m-1} u'(t+k|t)Ru(t+k|t) \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} F_1 u(t+k|t) &\leq G_1 \\ E_2 x(t+k|t) + F_2 u(t+k|t) &\leq G_2 \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\text{"ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ"} \quad (2c)$$

όπου:

- N_p , η απόσταση του ορίζοντα πρόβλεψης ή του ορίζοντα εξόδου
- N_m , η απόσταση του ορίζοντα ελέγχου ή του ορίζοντα εισόδου (με $N_m \leq N_p$)

Όταν η απόσταση N_p λαμβάνει άπειρη τιμή το πρόβλημα αναφέρεται ως άπειρου ορίζοντα ενώ στη περίπτωση πεπερασμένης τιμής , ως πεπερασμένου ορίζοντα. Επίσης, προκειμένου να αποκτήσει νόημα το πρόβλημα υποτίθεται ότι το πολύεδρο που δίνεται από της συνθήκες:

$$\{ (x,u) : F_1 u \leq G_1 \quad , \quad E_2 x + F_2 u \leq G_2 \}$$

περιέχει και την αρχική συνθήκη :

$$(x=0 , u=0).$$

Τέλος, η εισαγωγή των "περιορισμών σταθερότητας" στο πρόβλημα βελτιστοποίησης εξυπηρετεί την διασφάλιση σταθερότητας κλειστού βρόχου.

Γενικά, ο βασικός νόμος του Μοντέλου Προβλεπτικού Ελέγχου μπορεί να περιγραφεί μέσω του παρακάτω αλγόριθμου:

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

1. Λάβε τη νέα κατάσταση $x(t)$
2. Λύσε το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης
3. Εφάρμοσε μόνο όταν $u(t) = u(t + 0|t)$
4. $t \leftarrow t + 1$. Πήγαινε στο 1

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του Μοντέλου Προβλεπτικού Ελέγχου είναι οι δυνατότητα θεώρησης κάποιων μη γραμμικών διεργασιών ως κατά προσέγγιση τέτοιων, σε ένα μικρό εύρος λειτουργίας, γεγονός που διευκολύνει την αντιμετώπιση του προβλήματος. Στις περιπτώσεις αυτές τα σφάλματα της πρόβλεψης, αντισταθμίζονται μέσω μηχανισμού ανατροφοδότησης, εξαιτίας της δομικής αναντιστοιχίας ανάμεσα στο μοντέλο και την διαδικασία. Στις δε περιπτώσεις που υπάρχουν μόνο γραμμικά μοντέλα, λόγω της αρχής της επαλληλίας, δύναται να προστίθενται οι επιδράσεις των αλλαγών στις πολλαπλές ανεξάρτητες μεταβλητές, προκειμένου να προβλεφθεί η απόκριση των εξαρτημένων μεταβλητών.

Όπως δύναται να γίνει αντιληπτό από τα παραπάνω, το Μοντέλο Προβλεπτικού Ελέγχου βρίσκει εφαρμογή σε διάφορα πεδία. Κάποιες από αυτές είναι στις πτήσεις αεροχημάτων, στις αμογεννήτριες και σε λέβητες, σε διαδικασίες απόσταξης, στη καταλυτική διάσπαση πετροχημικών, στους αντιδραστήρες πυρόλυσης υδρογονανθράκων, οι βιομηχανίες χάρτου κ.α.

Στη περίπτωση των αεροχημάτων η εφαρμογή του ΜΠΕ αφορά την παραγωγή δρομολογίων πτήσης. Μία εκ των μεθόδων που έχει προταθεί για τη σχεδίαση τροχιών είναι ένας συνδυασμός του Μοντέλου Προβλεπτικού Ελέγχου (ή Ελέγχου Υποχωρούντος Ορίζοντος) και του Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, ΜΑΓΠ (Mixed Integer Linear Programming ,MILP). Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την εφαρμογή της “σε πραγματικό χρόνο” βελτιστοποίησης τροχιών σε σενάρια με πολλαπλά επίπεδα και αεροχήματα που επιχειρούν σε δυναμικά περιβάλλοντα τα οποία χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη εμποδίων [59] .

Ο ΜΑΓΠ είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική μαθηματικής μοντελοποίησης εντός ενός πολύ γενικού πλαισίου και επιδίωξή της είναι η μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση κάποιας γραμμικής συνάρτησης που υπόκειται σε ορισμένους γραμμικούς περιορισμούς. Στην ουσία, προκύπτει από τον απλό γραμμικό προγραμματισμό εισάγοντας σε αυτόν την απαίτηση τουλάχιστον μία από τις μεταβλητές απόφασης να λαμβάνει μία ακέραια (τυπικά δυαδική) τιμή. Στο παρελθόν, ο ΜΑΓΠ αποτελούσε τη βάση για διάφορες μελέτες[65],[66],[67] για την off-line σχεδίαση τροχιών ΜΕΑ που χαρακτηρίζονταν από ποικίλους δυναμικούς και κινηματικούς περιορισμούς.

Τα στοιχεία που περιλαμβάνει ο ΜΑΓΠ είναι τα εξής:

- Ένα σύνολο από συνεχείς μεταβλητές διακριτής απόφασης εκ των οποίων τουλάχιστον μία πρέπει να λαμβάνει ακέραια (τυπικά δυαδική) τιμή και οι οποίες είναι οι μεταβλητές κατάστασης του αεροχήματος.
- Μία αντικειμενική συνάρτηση που περιλαμβάνει μετρητές της ποιότητας της λύσης του εκάστοτε προβλήματος.
- Ένα σύνολο από περιορισμούς που προκύπτουν από ένα απλοποιημένο μοντέλο του ΜΕΑ και από το περιβάλλον στο οποίο επιχειρεί. Αυτοί διακρίνονται σε δυναμικούς, περιορισμούς αποφυγής εμποδίων, προσέγγισης στόχου και αποφυγής συστημάτων εντοπισμού.

Πιο συγκεκριμένα, η σχεδίαση τροχιάς ενός ΜΕΑ με τη βοήθεια του ΜΑΓΠ γίνεται αντιληπτή ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, τριών διαστάσεων, υπό ιδιαίτερες συνθήκες εντός του Ευκλειδείου χώρου, το οποίο χαρακτηρίζεται από τα παραπάνω στοιχεία[58].

Γενικά, η τεχνική βελτιστοποίησης που βασίζεται στο ΜΑΓΠ θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μοντελοποίηση των προβλημάτων σχεδίασης τροχιών των ΜΕΑ που ενδεχομένως να χαρακτηρίζονται από μη-κυρτού χαρακτήρα περιβάλλοντα, ανάγκη αποφυγής συγκρούσεων, αλληλουχίες σημείων και διάφορους άλλους χρονικούς ή/και λογικούς περιορισμούς [57]. Μπορεί επίσης να παρέχει ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης υπεύθυνο να διαχειριστεί βασικές δυναμικές δεσμεύσεις όπως οι περιορισμοί που αφορούν τη στροφή του οχήματος. Χάρης αυτών παρέχεται η δυνατότητα συμπερίληψης διακριτών αποφάσεων και περιορισμών μη-κυρτού χαρακτήρα στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης μίας τροχιάς. Για παράδειγμα, με τη χρήση δυαδικών μεταβλητών απόφασης επιτρέπεται η επιλογή αποφυγής ενός εμποδίου από δεξιά ή αριστερά αυτού ή επίσης, η επίτευξη διακριτής ανάθεσης στόχων στα πλαίσια της επίλυσης ενός προβλήματος σχεδίασης. Η δε εύρεση της βέλτιστης λύσης στο εκάστοτε πρόβλημα δύναται να υλοποιηθεί εύκολα με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών για μαθηματικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά όμως, η χρήση του ΜΑΓΠ για σχεδίαση τροχιάς σε πραγματικό χρόνο καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη λόγω του γεγονότος ότι η απαιτούμενη υπολογιστική προσπάθεια αυξάνεται ραγδαία καθώς αυξάνονται το μήκος της τροχιάς και ο αριθμός των προς αποφυγή εμποδίων.

Ο συγκεκριμένος περιορισμός δύναται να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας ορίζοντα σχεδίασης, κυλιόμενου χαρακτήρα ως προς τη πάροδο του χρόνου. Εντός αυτού, ο ΜΑΓΠ παράγει ένα μικρότερης έκτασης πλάνο που εκτείνεται προς το στόχο χωρίς απαραίτητα να τον προσεγγίζει. Η ιδέα αυτή προκύπτει από την έννοια του Ελέγχου Υποχωρόντος Ορίζοντος που αναφέρθηκε πιο πάνω. Η απόδοση αυτής της προσέγγισης του προβλήματος του σχεδιασμού, εξαρτάται άμεσα από τη ορθή εκτίμηση του τελικού τιμήματος-επιβάρυνσης που θα προκύψει επί της σχεδίασης ενός πλάνου μικρότερου μεγέθους από το επιθυμητό.

Η εκτίμηση της επιβάρυνσης καθίσταται δύσκολη σε περιπτώσεις που πρέπει να είναι εξασφαλισμένη η βιωσιμότητα της τροχιάς και πέρα από τα όρια του μικρής έκτασης, αρχικά σχεδιασμένου πλάνου. Η προσέγγιση για την εκτός ορίων φυσιογνωμία της τροχιάς, υλοποιείται με χρήση μονοπατιών ευθείας γραμμής που επιτρέπουν την εκτίμηση του κόστους μετάβασης από το σύνορο του αρχικού πλάνου έως τον επιθυμητό στόχο.

Τα ευθύγραμμα μονοπάτια επίσης, επιτρέπουν την πρόβλεψη των μελλοντικών καταστάσεων λόγω του ότι η συντομότερη διαδρομή από οποιαδήποτε τοποθεσία προς το τελικό σημείο προορισμού, προκύπτει ως αλληλουχία ευθυγράμμων τμημάτων, που είναι και ο απλούστερος τρόπος για να μοντελοποιηθεί μία τροχιά MEA [68] , [69] , εφόσον βέβαια δεν λαμβάνονται υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος και δεν υφίστανται τυχόν παρενοχλήσεις αυτού. Οι δε μελλοντικές καταστάσεις χρησιμοποιούνται από τον Έλεγχο Υποχωρόντος Ορίζοντος προκειμένου να εξασφαλιστούν οι τρέχουσες είσοδοι ελέγχου. Επιπλέον, βάσει των προσεγγίσεων των ευθυγράμμων τμημάτων (και με τη χρήση κατάλληλου αλγόριθμου) παράγεται ένας χάρτης κόστους μέσω του οποίου προσεγγίζεται το κόστος μετάβασης από συγκεκριμένα σημεία του περιβάλλοντος προς το τελικό, παρέχοντας μια καλή πρόβλεψη για τη πλέον βέλτιστη μελλοντική διαδρομή πέρα από τον οριζοντα σχεδίασης, ειδικά σε περιπτώσεις που περιλαμβάνουν μεγάλες αποστάσεις ή χρονικά διαστήματα. Έτσι, ο Έλεγχος Υποχωρόντος Ορίζοντος δύναται να σχεδιάζει μία λεπτομερή και ικανοποιητική τροχιά εκτιμώντας τη τελική κατάσταση μέσω αυτού του χάρτη.

Ένας απλός τρόπος παραγωγής αυτού του χάρτη βασίζεται σε έναν αλγόριθμο συντομότερου μονοπατιού για την γραφική αναπαράσταση του περιβάλλοντος. Όταν αυτό είναι δύο διαστάσεων, η αναπαράσταση προκύπτει κυρίως από τις κορυφές εμποδίων ενώ λαμβάνεται υπόψη η προσέγγιση με επεκτάσεις για περιβάλλοντα τριών διαστάσεων. Επίσης, εφόσον είναι απαραίτητο, ο χάρτης δύναται να τροποποιείται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι βέλτιστες διαδρομές που αναγνωρίζονται μέσα από την γραφική αναπαράσταση είναι δυναμικά εφικτές [70], [71]. Με την προσέγγιση του κόστους μετάβασης ο σχεδιαστής καθίσταται ικανός να αναγνωρίζει τοπικά “νεκρά τερματικά σημεία” εντός του επιχειρησιακού περιβάλλοντος και να τα αποφεύγει ακόμα και αν βρίσκονται πέραν του τρέχοντος ορίζοντα σχεδίασης [57].

Παρόλο όμως που με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται πολύ καλά αποτελέσματα στη πράξη, η σχεδίαση μπορεί να καταστεί ανέφικτη στη περίπτωση που οι θέσεις των κοντινών εμποδίων στο χώρο δεν επιτρέπουν την ύπαρξη δυναμικά εφικτής διαδρομής που πρόκειται να προσεγγιστεί από το όχημα. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν δύναται να ληφθεί υπόψη η δυναμική του οχήματος κατά την κατασκευή του χάρτη κόστους. Σε αυτή τη περίπτωση , το όχημα δεν μπορεί να ακολουθήσει τις ασυνέχειες που εμφανίζονται επί της πορείας όπου τα ευθύγραμμα τμήματα τέμνονται, εφόσον η διαδρομή που συσχετίζεται με την εκτίμηση του κόστους διαδρομής, δεν είναι εφικτή. Η συγκεκριμένη δυσκολία είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί με την αξιολόγηση της εκτίμησης του κόστους μετάβασης με διαδρομές ευθύγραμμων τμημάτων που θεωρούνται σχεδόν εφικτές, κινητικά και δυναμικά, διαδρομές προς το τελικό προορισμό [59] .

Ο συνδυασμός Μικτού Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού και Ελέγχου Κυλιόμενου Οριζοντα αποδεικνύεται ιδιαίτερα κατάλληλος για περιπτώσεις σχεδίασης στατικών τροχιών που περιλαμβάνουν πολλαπλά οχήματα και σημεία και απαιτούν την εξασφάλιση ελάχιστου χρόνου άφιξης [59]. Επίσης, ο ΜΑΠΓ είναι ιδανικός στις περιπτώσεις που το επιχειρησιακό περιβάλλον περιλαμβάνει απειλές που θέτουν την αποστολή των ΜΕΑ σε κίνδυνο, όπως η ανίχνευση και η πλήξη από κατευθυνόμενους πυραύλους[58].

3.3.2 Αλγόριθμος A*

Μία άλλη μέθοδος σχεδίασης είναι αυτή που βασίζεται στον αλγόριθμο A* [58]. Πρόκειται για έναν γενικό αλγόριθμο αναζήτησης, από τους πιο γνωστούς της Τεχνητής Νοημοσύνης που χρησιμοποιείται ευρέως σε διαδικασίες εξεύρεσης μονοπατιών (pathfinding). Ανήκει στην κατηγορία των αλγορίθμων ευρετικής αναζήτησης οι οποίοι χρησιμοποιούν ευρετική συνάρτηση προκειμένου να αξιολογήσουν τις επόμενες πιθανές καταστάσεις ώστε να επιλέξουν την καλύτερη από αυτές.

Σκοπός του αλγορίθμου είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης , δηλαδή το συντομότερο μονοπάτι μεταξύ 2 σημείων που ονομάζονται κόμβοι και με το λιγότερο κόστος. Η ευρεία χρήση αυτού προκύπτει από την ακρίβεια και τις επιδόσεις του. Είναι αποτέλεσμα συνδυασμού της αναζήτησης με βάση το κόστος και της άπληστης αναζήτησης. Πραγματοποιεί μια ταξινόμηση των καταστάσεων(κόμβων) με βάση την συνάρτηση $f(k) = g(k) + h(k)$. Η συνάρτηση g αντιπροσωπεύει το κόστος για τη μετάβαση από την αρχική στην τρέχουσα κατάσταση, ενώ η συνάρτηση h είναι μια ευρετική συνάρτηση που εκτιμά την απόσταση από την παρούσα στην επιθυμητή τελική κατάσταση.

Η αναζήτηση A* είναι πλήρης, βέλτιστη και ικανοποιητικά αποδοτική σε σχέση με τους αλγορίθμους αυτής της κατηγορίας χωρίς όμως να δίνει πάντα λύσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα περισσότερα προβλήματα, ο αριθμός των κόμβων εντός του χώρου αναζήτησης αυξάνεται εκθετικά ως προς το μήκος της λύσης εκτός αν, το σφάλμα της ευρεστικής συνάρτησης δεν αυξάνεται γρηγορότερα από το λογάριθμο του πραγματικού κόστους διαδρομής. Στην πράξη όμως για όλους σχεδόν τους ευρεστικούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται, το σφάλμα είναι τουλάχιστον ανάλογο με το κόστος διαδρομής με αποτέλεσμα η εκθετική αύξηση που προκύπτει, να τίθεται εκτός των δυνατοτήτων των υπολογιστικών συστημάτων. Το γεγονός αυτό σε αρκετές των περιπτώσεων καθιστά άσκοπη τη προσπάθεια εύρεσης βέλτιστης λύσης. Ένα άλλο βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου A* επίσης , εκτός αυτού του περιορισμού του υπολογιστικού χρόνου, είναι και η εξάντληση της διατιθέμενης μνήμης αφού διατηρεί σε αυτή όλους τους κόμβους που παράγονται κατά τη διαδικασία.

Όσον αφορά τη σχεδίαση τροχιών των ΜΕΑ , ο αλγόριθμος A* έχει πολύ καλή απόδοση σε περιπτώσεις που το πεδίο της επιχείρησης παρουσιάζει ιδιαίτερη ανωμαλία και οι ελιγμοί επιβάλλεται να πραγματοποιούνται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Η πολύ καλή απόδοση όμως αντισταθμίζεται από το υψηλό υπολογιστικό κόστος που αναφέρθηκε προηγουμένως, ειδικά στη περίπτωση τρισδιάστατων περιβαλλόντων. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να περιοριστεί από την επίτευξη της απαραίτητης κλιμάκωσης, στοιχείο το οποίο λαμβάνεται όλο και περισσότερο υπόψη στην έρευνα της σχεδίασης με τη χρήση του αλγόριθμου αυτού. Έτσι, ο βασικός A* τροποποιείται κατάλληλα προκειμένου να δώσει βέλτιστες τροχιές σε δυναμικά θέατρα επιχειρήσεων. Οι τροποποιήσεις περιλαμβάνουν λογικούς περιορισμούς οι οποίοι αποτιμούν τότε οι διάδοχοι του κάθε πιθανού σημείου μιας τροχιάς διαγράφουν καμπύλες με την ελάχιστη ακτίνα, κατά την αποφυγή εμποδίων ή απειλών[58].

Σχετικά με τον περιορισμό που επιβάλλεται για την κατεύθυνση κατά την πτήση, αυτός έχει ως αντικείμενό του τον υπολογισμό της γωνίας μεταξύ της κατεύθυνσης κατά την άφιξη και οποιασδήποτε πιθανής κατεύθυνσης αναχώρησης , για όλα τα σημεία-κόμβους της τροχιάς του ΜΕΑ. Η γωνία αυτή δύναται να υπολογιστεί από την σχέση του εσωτερικού γινομένου των διανυσμάτων της ταχύτητας κατά την άφιξη και κατά την αναχώρηση, όπως παρακάτω :

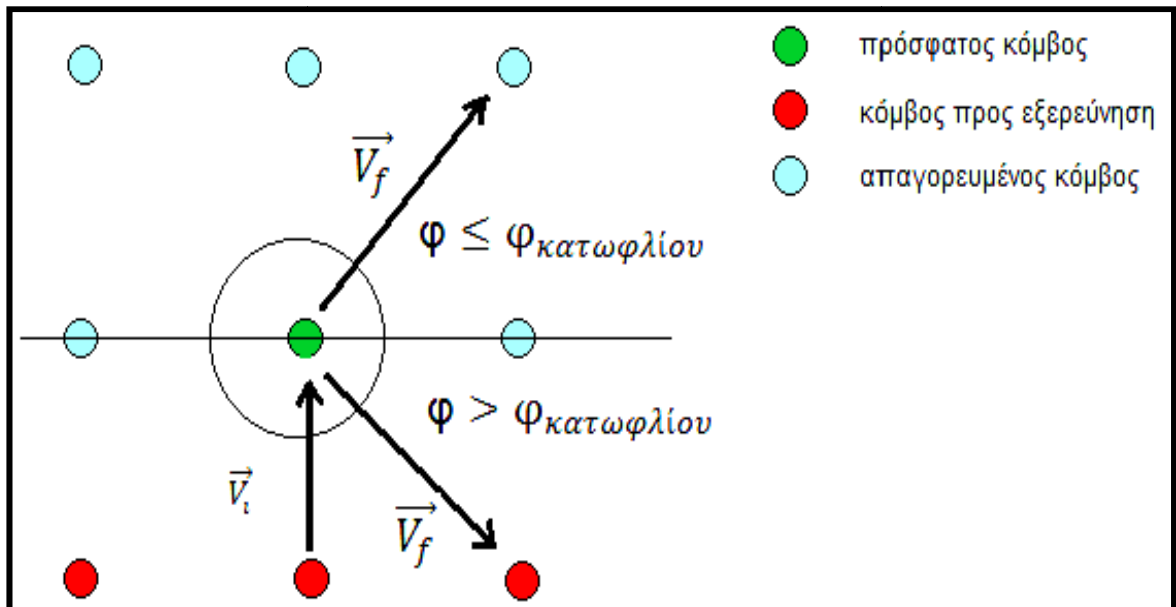
$$\varphi = \arccos \left(\frac{\vec{V}_f \cdot \vec{V}_i}{|\vec{V}_f| |\vec{V}_i|} \right) \text{ όπου,}$$

φ η ζητούμενη γωνία,

\vec{V}_f το διάνυσμα της ταχύτητας κατά την αναχώρηση και ,

\vec{V}_i το διάνυσμα της ταχύτητας κατά την άφιξη.

Ο περιορισμός που εισάγεται για αυτή την παράμετρο, επιβάλλει την μη υπέρβαση της τιμής της γωνίας φ πιο πάνω από μία τιμή κατωφλίου. Αναπαράσταση της συγκεκριμένης απαίτησης, εκπεφρασμένη σε χώρο 2 διαστάσεων, φαίνεται στο Σχήμα 3.4 [58].



Σχήμα 3. 4

Με την εισαγωγή της συγκεκριμένης τροποποίησης επιδιώκεται η προσέγγιση της φυσιογνωμίας των ΜΕΑ σταθερών πτερύγων που χαρακτηρίζονται από τον περιορισμό στη πραγματοποίηση άμεσης στροφής σε υψηλές ταχύτητες. Επιτυγχάνεται επίσης η μείωση του υπολογιστικού χρόνου, αφού ο τροποποιημένος αλγόριθμος καλείται να προσπελάσει λιγότερους κόμβους από ότι ο βασικός A^* .

Ένας ακόμα περιορισμός που τίθεται προκειμένου να καταστεί αυτή η μέθοδος πιο αποδοτική, έχει σχέση με την αδράνεια του ΜΕΑ. Προκύπτει από την ανάγκη επιβολής ενός συνόλου συνθηκών συνέχειας των σημείων που συνθέτουν τις σχεδιασμένες αποστολές, για όλες τις διαδρομές από τον ένα τομέα στον άλλο, για τις κινηματικές εκφράσεις του αεροχήματος:

- $r(t + \Delta t) \rightarrow r(t)$
- $u(t + \Delta t) \rightarrow u(t)$
- $a(t + \Delta t) \rightarrow a(t)$
- $\forall t \wedge \Delta t \rightarrow 0$

Η μοντελοποίηση εντός του αλγορίθμου επιτυγχάνεται περιορίζοντας τον πρώτο κόμβο να εξαπλωθεί από κάθε σημείο σύμφωνα με τις αρχικές συνθήκες. Έτσι, η αρχική κατεύθυνση πτήσης δίνεται ως είσοδος στον αλγόριθμο ώστε να μπορέσει να την προβάλλει επί όλων των πιθανών κατευθύνσεων προς τον επεκτεινόμενο κόμβο. Η προβολή με τη υψηλότερη τιμή είναι αυτή που θα επιλεγεί και η οποία ορίζει τον επόμενο κόμβο που θα

ενσωματωθεί στην τροχιά. Γενικά, αυτή τροποποίηση του αλγορίθμου αποσκοπεί στη μοντελοποίηση της αδράνειας του ΜΕΑ ενώ η συμπεριφορά της προκύπτουσας τροχιάς εξαρτάται από την ανάλυση του A^* η οποία θα πρέπει να διαμετράται καταλλήλως σε σχέση με το μέγεθος της επιχείρησης και την ταχύτητα του ΜΕΑ.

Τέλος, πραγματοποιείται μια ακόμα τροποποίηση η οποία αφορά την ανάλυση του χώρου στον οποίο καλείται να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος. Αυτή σχετίζεται με το λόγο μεταξύ του συνολικού αριθμού των κόμβων και του χώρου πτήσης του ΜΕΑ. Για παράδειγμα, η ορισμένη γεωγραφική πυκνότητα ρ_i κατά μήκος του i -οστού άξονα προκύπτει από το κλάσμα του συνόλου N_i των κόμβων που επιλέχθηκαν να αντιπροσωπεύσουν την πραγματική διάσταση στον χώρο του αλγόριθμου, προς το συνολικό μήκος L_i του χώρου της επιχείρησης επί αυτού του άξονα, δηλαδή:

$$\rho_i = \frac{N_i}{L_i}$$

Από το παραπάνω ορισμό είναι δυνατόν να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κόμβων στο χώρο του A^* , τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ανάλυση του αλγορίθμου. Ωστόσο, υπάρχει ένας σοβαρός περιορισμός για την εκάστοτε επιλεγείσα ανάλυση αφού προϋποθέτει μια συνδυαστική διαδικασία περίπου της τάξης N_i^3 κατά την αναζήτηση για το βέλτιστο μονοπάτι. Έτσι, για χώρους με 100 κόμβους κατά προσέγγιση σε κάθε διάσταση, το συγκεκριμένο γεγονός επιφέρει ως αποτέλεσμα υψηλό υπολογιστικό κόστος. Στην αντίθετη περίπτωση όμως, μια ανάλυση χαμηλότερης τιμής ενδεχομένως να μην επαρκεί όταν πρόκειται να αναπαρασταθεί ένας χώρος με επιφανειακές ανωμαλίες.

Προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος χωρίς απώλεια πληροφορίας του θεάτρου επιχειρήσεων, υλοποιείται κατάλληλη δειγματοληψία μεταξύ κάθε ζευγαριού κόμβων που αναπτύσσεται από τον αλγόριθμο. Αυτή με τη σειρά της εισάγει στο ερευνητικό τμήμα του αλγορίθμου, μια συνδυαστική διαδικασία της τάξης N_i^2 , κατά προσέγγιση. Η διαδικασία λαμβάνει υπόψη μόνο τις συντεταγμένες στο επίπεδο X-Y και συγκρίνει το ύψος του σημείου της δειγματοληψίας με το υψόμετρο της επιφάνειας προκειμένου να διακρίνει κόμβους οι οποίοι θα μπορούσαν να αποκρύψουν απότομες αλλαγές του εδάφους όπως γκρεμούς ή κορυφές βουνών. Με αυτό τον τρόπο, το υπολογιστικό κόστος του αλγόριθμου A^* παραμένει σε ικανοποιητικά πλαίσια όταν η εκάστοτε επιφάνεια περιλαμβάνεται στην σχεδίαση με μια αποδεκτή ανάλυση.

3.3.3 Δομοστοιχείο Λογισμικού Παραγωγής Τροχιάς και Καθοδήγησης (Trajectory Planning and Guidance Module , TG²M).

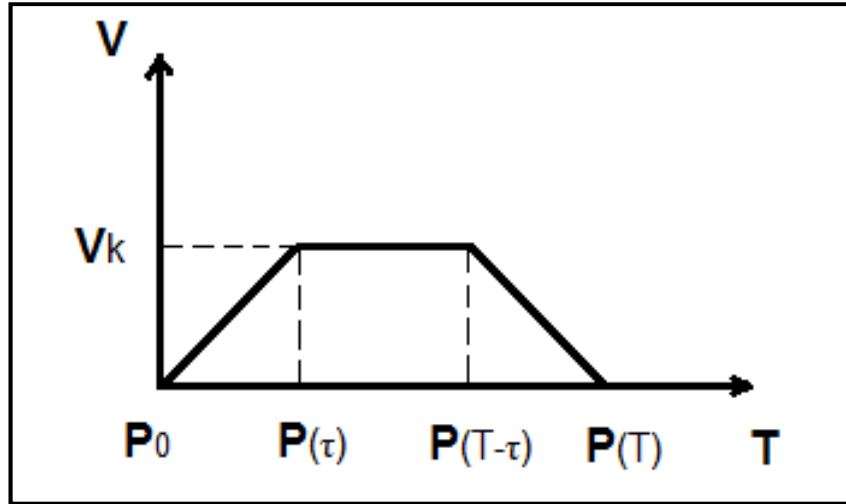
Στα πλαίσια των μεθόδων σχεδίασης δρομολογίων των ΜΕΑ εντάσσεται ακόμα μία η οποία βασίζεται επί του Δομοστοιχείου Λογισμικού Παραγωγής Τροχιάς και Καθοδήγησης (Trajectory Planning and Guidance Module , TG²M) [72] . Πρόκειται για ένα εργαλείο λογισμικού που έχει τη δυνατότητα να παράγει σύνθετες τροχιές με έξι βαθμούς ελευθερίας σε τρισδιάστατο χώρο και με περιορισμούς στην ταχύτητα, την επιτάχυνση, τον προσανατολισμό και το χρόνο. Η βασική συνεισφορά του δε, έγκειται στην γεωμετρική αναπαράσταση της τροχιάς και στον παραμετρικό προσδιορισμό του.

Το συγκεκριμένο δομοστοιχείο αποτελεί τμήμα της Γλώσσας Ελέγχου Αεροχημάτων (Aerial Vehicle Control Language, AVCL), μια αρχιτεκτονική λογισμικού και γλωσσική προδιαγραφή που καθορίζει τα ζητήματα του ορισμού της αποστολής, του ελέγχου, της επικύρωσης και της εποπτείας των ΜΕΑ. Η πλατφόρμα αυτής της γλώσσας διαθέτει ένα τρισδιάστατο οπτικό εξομοιωτή ο οποίος χρησιμοποιεί ένα Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (Geographic Information System, GIS), όπως το παγκόσμιο μοντέλο δεδομένων. Όλα τα στοιχεία του συστήματος αναφέρονται κατά γεωγραφικό τρόπο ενώ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν από αυτό οι διάφορες επίσημες και εμπορικές βάσεις δεδομένων (δρόμοι, αεροδρόμια, χωράφια κτλ) για τη σχεδίαση της αποστολής. Επίσης, στη γλωσσική προδιαγραφή εμπεριέχεται και ένα ευρύ σύνολο οδηγιών που επιτρέπει την απευθείας ή μη, εποπτεία και την σύνθεση αποστολών, ανεξάρτητων ως προς τα εκάστοτε αεροχήματα.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το ΔΛΠΤΚ σχεδιάστηκε για την μοντελοποίηση τροχιών τριών διαστάσεων με παραμετρικούς περιορισμούς. Για το σκοπό αυτό και προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι διάφορων τύπων κινήσεις του ΜΕΑ χρησιμοποιεί δύο μαθηματικά στοιχεία, τις αναλυτικές συναρτήσεις και την πολυωνυμική παρεμβολή[72].

Οι απλοί ελιγμοί όπως κίνηση επί γραμμών ή τόξων περιφέρειας κύκλου υλοποιούνται με αναλυτικές συναρτήσεις που περιορίζουν τη γεωμετρία της επιθυμητής τροχιάς. Στη συνέχεια εφαρμόζονται και οι αντίστοιχοι παραμετρικοί περιορισμοί οι οποίοι, τυπικά, είναι κινηματικού χαρακτήρα και αφορούν σταθερή ταχύτητα, επιτάχυνση, καμπύλες τραπεζοειδούς χαρακτήρα για να διακοπή της κίνησης και διάφορα άλλα στοιχεία. Ο συγκεκριμένος τρόπος παραμετροποίησης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε αποστολές κατά τις οποίες απαιτείται στάση του ΜΕΑ με αποτελεσματικό τρόπο σε κάποιο επιθυμητό σημείο.

Τόσο για την υλοποίηση ευθύγραμμων κινήσεων όσο και για κινήσεις επί κυκλικών τομέων , επιβάλλεται η τήρηση τραπεζοειδούς χαρακτήρα από το σύνολο των ταχυτήτων που θα λάβει το αερόχημα. Αυτή η προϋπόθεση επεξηγείται στο Σχήμα 3.5 [72] :



Σχήμα 3.5

Τα τρία δομικά τμήματα της παραπάνω τραπεζοειδούς καμπύλης αποτελούν στην ουσία τον ορισμό της συνολικής συνάρτησης που θα αποδώσει τον απλό ελιγμό.

Πιο συγκεκριμένα και ξεκινώντας από τα ενδιάμεσα σημεία $P(\tau)$ και $P(T-\tau)$, οι συντεταγμένες τους ως προς τους x , y και z δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω σχέσεις:

- $$P(\tau)_{x,y,z} = \frac{1}{2\|P(T)_{x,y,z}-P_0_{x,y,z}\|} \frac{V_k}{t} t^2 (P(T)_{x,y,z} - P_0_{x,y,z}) + P_0_{x,y,z}$$

- $$P(T - \tau)_{x,y,z} = \frac{V_k(T-2\tau)}{\|P(T)_{x,y,z}-P_0_{x,y,z}\|} (P(T)_{x,y,z} - P_0_{x,y,z}) + P(\tau)_{x,y,z}$$

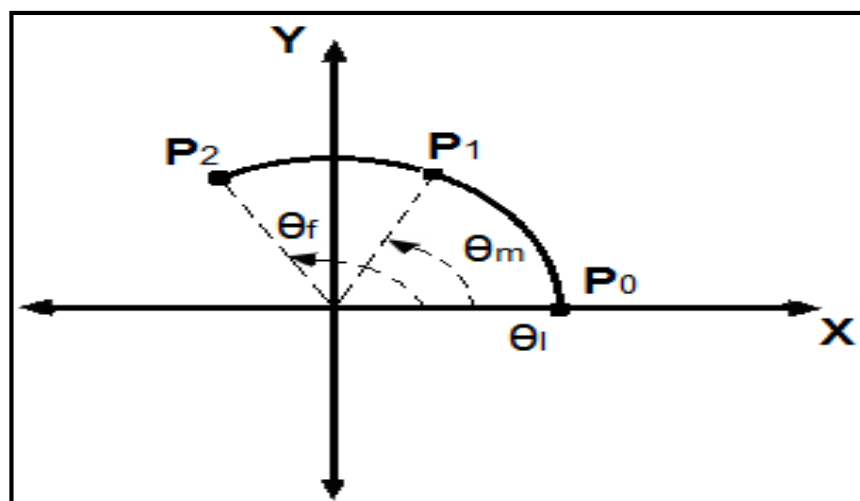
Αφού έχουν καθοριστεί τα σημεία αυτά, η συνολική συνάρτηση περιγραφής της ευθύγραμμης κίνησης προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{V_k}{2\tau(P(\tau) - P_0)} t^2 (P(\tau) - P_0) + P_0, & 0 \leq t \leq \tau \\ \frac{V_k}{(P(T-\tau) - P(\tau))} (t - \tau) (P(T-\tau) - P(\tau)) + P(\tau), & \tau \leq t \leq T - \tau \\ \frac{(t - T + \tau)}{(P(T) - P(T-\tau))} \left(-\frac{V_k}{2\tau} (t - T + \tau) + V_k \right) (P(T) - P(T-\tau)) + P(T-\tau), & T - \tau \leq t \leq T \end{cases}$$

Για το τμήμα της καμπύλης μεταξύ P_0 και $P(\tau)$ η ταχύτητα θεωρείται αρχικά μηδενική και αυξάνεται σταδιακά μέχρι τη τελική τιμή V_k που είναι και η μέγιστη. Η τιμή αυτή διατηρείται για όλο το τμήμα της καμπύλης μεταξύ $P(\tau)$ και $P(T-\tau)$. Τέλος, το τμήμα από $P(T-\tau)$ έως και $P(T)$ αντιστοιχεί σε μείωση της ταχύτητας μέχρι αυτή να μηδενιστεί.

Η ίδια προσέγγιση εφαρμόζεται και για τις κινήσεις σε κυκλικούς τομείς. Για αυτού του τύπου τις διαδρομές χρησιμοποιούνται τρία σημεία-κόμβοι που ορίζουν τη καμπυλόγραμμη διαδρομή ενώ ταυτόχρονα αναζητείται η γωνία απόκλισης του ίχνους του MEA από το αρχικό σημείο της καμπύλης τροχιάς.

Μια γενική εικόνα των προηγούμενων αποτυπώνεται στο Σχήμα 3. 6 [72] όπου P_0 , P_1 και P_2 είναι τα τρία σημεία-κόμβοι επί της καμπύλης διαδρομής στο επίπεδο XY και θ_l , θ_m , θ_f οι αντίστοιχες γωνίες.



Σχήμα 3.6

Η εξίσωση της καμπύλης προκύπτει με τον υπολογισμό του εξωτερικού γινομένου μεταξύ των διανυσμάτων των σημείων-κόμβων:

$$P_0 \vec{P}_1 \times P_0 \vec{P}_2 = N(A, B, C)$$
$$Ax + By + Cz = cte$$

Πρωταρχικός στόχος κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο σχεδιασμού είναι ο καθορισμός του κέντρου του κυκλικού τομέα που περιλαμβάνει τα τρία συγκεκριμένα σημεία. Δεδομένου ότι κέντρο $c (x_c, y_c, z_c)$ της κυκλικής καμπύλης ισαπέχει από όλα τα σημεία αυτής, προφανώς θα ισχύει:

$$(x_{o,1,2} - x_c)^2 + (y_{o,1,2} - y_c)^2 + (z_{o,1,2} - z_c)^2 = K^2$$
$$Ax_c + By_c + Cz_c = cte$$

όπου οι δείκτες 0,1,2 αντιστοιχούν στα σημεία- κόμβους και K μια σταθερά.

Όσον αφορά την σχέση μεταξύ της γωνίας θέσης θ του ΜΕΑ ως προς το σημείο έναρξης, της γωνιακής ταχύτητας ω και της εφαπτομενικής επιτάχυνσης ταχύτητας u_t , και θεωρώντας το ρυθμό της κίνησης σταθερό, προκύπτει ότι:

- $\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{u_t}{r}$
- $\theta(t) = \frac{u_t}{r} t + \theta_1$, για $t \in [0, T]$

ενώ τέλος, στη περίπτωση ύπαρξης γωνιακής επιτάχυνσης a ισχύει:

$$\theta(t) = \frac{a}{2r} t^2 + \frac{u_0}{r} t + \theta_1, \quad \text{για } t \in [0, T] \text{ και όπου } u_0 \text{ κάποια αρχική τιμή}$$

Πιο περίπλοκοι ελιγμοί περιγράφονται με τη πολυωνυμική παρεμβολή, έχοντας παράλληλα προσαρμοστεί στα κρίσιμα σημεία ελέγχου της τροχιάς, στην επιθυμητή θέση συνάντησης και στους αντίστοιχους περιορισμούς ταχύτητας και χρόνου. Οι πολυωνυμικές συναρτήσεις βασίζονται σε τμηματικά πολυώνυμα τρίτης και τετάρτης τάξης (splines) [73] με τυποποιημένες φραγμένες συνθήκες όπως για παράδειγμα οι αρχικές και τελικές ταχύτητες που ικανοποιούν όλα τα σημεία ελέγχου σε μια συνεχή και ομαλή διαδρομή.

Η θεμελιώδης ιδέα της παρεμβολής με τμηματικά πολυώνυμα στηρίζεται στην έννοια των λείων καμπυλών που διέρχονται μέσα από έναν αριθμό σημείων. Οι καμπύλες αυτές περιγράφονται από πολυωνυμικές, συνήθως τρίτου βαθμού, συναρτήσεις οι οποίες ορίζονται από κάποιους συντελεστές. Οι συγκεκριμένοι καθορίζουν το τμηματικό πολυώνυμο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη παρεμβολή των σημείων των αριθμητικών δεδομένων και είναι υπεύθυνοι για την καμπύλωση της γραφικής παράστασης προκειμένου να διέλθει από όλα τα σημεία των δεδομένων χωρίς να εμφανίζεται κάποια λανθάνουσα συμπεριφορά και χωρίς να διακόπτεται η συνέχεια.

Στην ουσία, επιδιώκεται ο ορισμός μιας τριτοβάθμιας πολυωνυμικής συνάρτησης της μορφής:

$$S(t) = a_i t^3 + b_i t^2 + c_i t + d$$

η οποία θα πρέπει να συμμορφώνεται στις εξής απαιτήσεις προκειμένου να παρεμβάλλεται σε όλους τους επιθυμητούς κόμβους σημεία:

- Η ίδια καθώς και η πρώτη και δεύτερη παράγωγος αυτής θα πρέπει να είναι συνεχείς στο φραγμένο χρονικό διάστημα που ορίζονται.

- Εφόσον η καμπύλη $S(t)$ πρέπει να είναι συνεχής σε όλο το χρονικό διάστημα, θα πρέπει και η κάθε υποσυνάρτηση να συμπεριλαμβάνει τα σημεία των δεδομένων.

Βάσει των παραπάνω συνθηκών, η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφεί και ως:

$$s_i(t_i) = a_i h_i^3 + b_i h_i^2 + c_i h_i + d_i \text{ όπου,}$$

- $S(t_i) = s_i(t_i)$ για κάθε $i=1,2,\dots,n-1$ και $t_i \in [t_i, t_{i+1}]$,
- $h_i = \sum_{i=1}^{n-1} (t_{i+1} - t_i)$

Ακόμη, προκειμένου να είναι λεία η καμπύλη κατά μήκος του χρονικού διαστήματος, απαιτείται η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης να είναι ίση με τη παράγωγο των σημείων θέσης αναφοράς, δηλαδή θα πρέπει να ισχύουν οι σχέσεις:

- $s_i'(t_i) = 3 a_i h_i^2 + 2b_i h_i + c_i$
- $s_i'(t_i) = s_{i-1}'(t_i)$
- $s_i'(t_i) = c_i = 3 a_{i-1} h_i^2 + 2b_{i-1} h_i + c_{i-1}$

Ομοίως προκύπτουν οι αντίστοιχες σχέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για την δεύτερη παράγωγο:

- $s_i''(t_i) = 6 a_i h_i + 2b_i$
- $s_i''(t_i) = s_{i+1}''(t_i)$
- $s_i''(t_i) = 2b_{i+1}$

Η εύρεση των πολυωνυμικών συντελεστών επιτυγχάνεται με την επίλυση κατάλληλου συστήματος που προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις.

Τα κριτήρια που καλείται να ικανοποιήσει η συγκεκριμένη μέθοδος ,όπως και κάθε άλλη, έχουν άμεση σχέση με δύο βασικά ενδιαφέροντα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία της σχεδίασης και είναι η δυνατότητα υλοποίησης και η βελτιστοποίηση. Το πρώτο αφορά τη παραγωγή ενός σχεδίου ασφαλούς πτήσης του ΜΕΑ προς τον εκάστοτε στόχο χωρίς να δίνεται σημασία στην ποιότητα αυτού. Αντίθετα, μέσω της βελτιστοποίησης επιδιώκεται όχι μόνο ένα εφικτό σχέδιο αλλά και το πλέον ικανοποιητικό , χαρακτηριστικό που αξιολογείται με διάφορους τρόπους, ανάλογα με το κάθε πρόβλημα. Δυστυχώς όμως η βέλτιστη λύση δεν επιτυγχάνεται πάντα και επιπλέον, η εξασφάλιση της δεν αποτελεί βασική επιδίωξη στα περισσότερα πραγματικά προβλήματα και ειδικά όταν συνεπάγεται αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Για το λόγο αυτό, επιδίωξη στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι εξασφάλιση απλά ικανοποιητικών και εφικτών τροχιών.

Θέτοντας τη συγκεκριμένη επιδίωξη, το πρόβλημα της σχεδίασης καθίσταται λιγότερο περίπλοκο. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο απλούστερος τρόπος για να μοντελοποιηθεί η διαδρομή ενός ΜΕΑ είναι αυτός που βασίζεται στην ένωση συγκεκριμένων σημείων με ευθύγραμμα τμήματα, τόσο στον δυσδιάστατο όσο και στο τρισδιάστατο χώρο. Αυτή η απλούστευση λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι σε τυπικές αποστολές ΜΕΑ, οι συντομότερες τροχιές προκύπτουν από ευθείες γραμμές που ενώνουν σημεία τα οποία περιλαμβάνουν την αφετηρία, τις κορυφές πολυγωνικών εμποδίων και τους επιδιωκόμενους στόχους. Στη περίπτωση όμως που δε συμπεριληφθούν πολλά σημεία, αυτός ο απλουστευμένος τρόπος αναπαράστασης δεν αποδίδει μια ρεαλιστική και ακριβή εικόνα της εκάστοτε τροχιάς που θα ακολουθήσει το ΜΕΑ, αφού δεν λαμβάνονται υπόψη παράγοντες κινηματικού χαρακτήρα που αφορούν την πορεία του. Από την άλλη, η αύξηση του αριθμού των σημείων συνεπάγεται αντίστοιχα μεγάλη αύξηση των μεταβλητών σχεδίασης κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης καθώς και του υπολογιστικού χρόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Εφαρμογές ασύρματων ζεύξεων στα ΜΕΑ.

4.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή των τηλεπικοινωνιών .

Αναμφισβήτητα , ο ρόλος των τηλεπικοινωνιών στην πρόοδο και την εξέλιξη της ανθρωπότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικός . Από τη στιγμή που ο άνθρωπος άρχισε να οργανώνεται σε κοινωνίες και καθώς αυτές διευρύνονταν και εξαπλώνονταν, η ανάγκη για επίτευξη επικοινωνίας εξ αποστάσεως, δηλαδή τηλεπικοινωνίας (από την αρχαία ελληνική πρόθεση τηλε- που σημαίνει “από μακριά”), γινόταν όλο και μεγαλύτερη. Απλό παράδειγμα πρώιμης μορφής αυτής την έννοιας θα μπορούσε να αποτελέσει η δυνατή κραυγή ενός προϊστορικού ανθρώπου-παρατηρητή για την προειδοποίηση του υπόλοιπου καταυλισμού ως προς την έλευση κάποιας απειλής. Δεν θα ήταν ίσως υπερβολικό το συμπέρασμα ότι οι τηλεπικοινωνίες είναι στενά συνδεδεμένες με την ζωική ύπαρξη και την κοινωνικότητα των έμβιων όντων.

Η εξελικτική πορεία της έννοιας αυτής κατά την πάροδο των χρόνων είναι δυνατόν να αποτυπωθεί συνοπτικά μέσα από χρονολογίες-σταθμούς της ανθρώπινης ιστορίας, όπως οι παρακάτω [74],[75],[56] [77] :

- 1200 π.Χ. : Αναφορά αποστολής σημάτων φωτιάς και καπνού στην Ιλιάδα του Ομήρου.
- 700 π.Χ -300 π.Χ.: Χρήση ταχυδρομικών περιστεριών στα πλαίσια των Ολυμπιακών Αγώνων.
- 6^{ος} αιώνας π.Χ.: Ο Κύρος εγκαθιδρύει στη περσική αυτοκρατορία το πρώτο ταχυδρομικό σύστημα της παγκόσμιας ιστορίας.
- 150 π.Χ.: Επινόηση ειδικού αλφαβήτου για αποστολή μηνυμάτων με χρήση ενός ζεύγους πυρσών αρχαίο Έλληνα ιστορικό Πολύβιο.
- 37 π.Χ.: Πρώτη ιστορική καταγραφή για αποστολή μηνυμάτων με τη χρήση κατόπτρων (ηλιογράφος) από τον αυτοκράτορα Τιβέριο.
- 11 π.Χ.: Σύσταση ταχυδρομικών υπηρεσιών στη Ρώμη.
- 1588 μ.Χ.: Γνωστοποίηση της άφιξης της ισπανική αρμάδας με χρήση σημάτων καπνού.

- 1747 μ.Χ.: Ο William Watson επιτυγχάνει εξ αποστάσεως 2 μιλίων, εκκένωση ηλεκτρικού φορτίου προς γη μέσω σύρματος αντίστοιχου μήκους.
- 1791 μ.Χ.: Οι αδελφοί Charpe επινοούν ένα σύστημα αποστολής μηνυμάτων βασιζόμενο σε δύο κινητούς βραχίονες επί στύλου εγκατεστημένου σε πύργο (σημαφόρος). Στα επόμενα χρόνια το σύστημα εγκαθίσταται σε όλη τη Γαλλία.
- 1830 μ.Χ.: Ο Joseph Henry επιτυγχάνει τη πρώτη μετάδοση ηλεκτρικού σήματος επιδεικνύοντας άλλη μία εφαρμογή του ηλεκτρομαγνητισμού.
- 1837 μ.Χ.: Οι Wheatsone και Cooke στην Αγγλία και ο Morse στην Αμερική επινοούν τον ηλεκτρικό τηλεγράφο.
- 1844 μ.Χ.: Υλοποιείται η πρώτη πρακτική τηλεγραφική σύνδεση απόστασης 16 χμ. μεταξύ Ουάσινγκτον και Βαλτιμόρης.
- 1847 μ.Χ.: Γέννηση του Alexander Graham Bell.
- 1858 μ.Χ.: Πρώτη απόπειρα εγκατάστασης υπερατλαντικού καλωδίου τηλεγράφου.
- 1865 μ.Χ.: Ο James Clerk Maxwell προβλέπει μαθηματικά τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω του χώρου.
- 1866 μ.Χ.: Επιτυχής εγκατάσταση καλωδίου τηλεγράφου που ενώνει Ευρώπη και Αμερική.
- 1876 μ.Χ.: Ο Bell κατοχυρώνει την πρώτη πατέντα τηλεφώνου.
- 1880 μ.Χ.: Ο Bell μεταδίδει φωνή μέσω ακτίνας φωτός (φωτόφωνο). Πρόκειται για τη πρώτη ασύρματη μετάδοση φωνής.
- 1893 μ.Χ.: Ο Nikolai Tesla υλοποιεί τη πρώτη επιτυχή μετάδοση ραδιοκυμάτων.
- 1906 μ.Χ.: Ο Lee De Forest κατασκευάζει τη πρώτη τρίοδο ενισχύτρια λυχνία δίνοντας τη δυνατότητα ενίσχυσης ασθενών σημάτων.

- 1918 μ.Χ.: Ο Edwin Armstrong ανακαλύπτει τον υπερετερώδικο δέκτη AM . Ο ίδιος ευθύνεται και για την FM διαμόρφωση που ακολούθησε έπειτα από 15 χρόνια.
- 1930 μ.Χ.: Η AT&T πραγματοποιεί δοκιμές πάνω στη ιδέα του εικονοτηλεφώνου για μετάδοση εικόνας και ήχου μεταξύ των επικοινωνούντων .
- 1936 μ.Χ.: Επίδειξη του RADAR.
- 1936 μ.Χ.: Ο BBC εκπέμπει τηλεοπτικό σήμα.
- 1947 μ.Χ.: Κατασκευή του πρώτου transistor που εγκαινιάζει μια νέα εποχή της ηλεκτρονικής.
- 1958 μ.Χ.: Μετάδοση δεδομένων μέσω τηλεφωνικών γραμμών.
- 1962 μ.Χ.: Ο δορυφόρος Telstar I τίθενται σε γεωστατική τροχιά για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς.
- 1978 μ.Χ.: Κυψελοειδή ασύρματη τηλεφωνία.
- 1983 μ.Χ.: Επίσημη εμφάνιση του INTERNET.
- 1989 μ.Χ.: Το διαστημόπλοιο Voyager II στέλνει σήματα 4.4 δισεκατομμύρια χιλιόμετρα από τον πλανήτη Ποσειδώνα.
- 1993 μ.Χ.: Εμφάνιση των διαδικτυακών ραδιοφωνικών σταθμών
- 1996 μ.Χ.: Υποβάλλεται η πατέντα για τη τεχνολογία του Wi-Fi.
- 1998 μ.Χ.: Ανάπτυξη δορυφορικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας.
- 2001 μ.Χ.: Πραγματοποιείται η πρώτη ασυμπίεστη μετάδοση τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HDTV) κατά μήκος δικτύων μεγάλης έκτασης βασισμένων στο πρωτόκολλο IP.

Στη σημερινή εποχή, η απουσία των τηλεπικοινωνιών θεωρείται αδιανόητη. Ο τρόπος ζωής του σύγχρονου ανθρώπου στις περισσότερες εκφάνσεις αυτής είναι πλέον εξαρτημένος από την συγκεκριμένη έννοια. Η οικονομία, η παραγωγή αγαθών, η ενημέρωση, η μόρφωση, οι διαπροσωπικές σχέσεις και άλλοι τομείς που συνθέτουν την καθημερινότητα των σημερινών ανεπτυγμένων λαών δεν θα βρισκόνταν στο σημερινό εξελιγμένο επίπεδο χωρίς την αντίστοιχη εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών. Και η εξέλιξη αυτή δεν θα είχε προκύψει αν οι τηλεπικοινωνίες παρέμεναν δέσμιες του σύρματος...

4.2 Τι καλείται ασύρματη ζεύξη ;

Θεμελιώδες στοιχείο για την υλοποίηση των τηλεπικοινωνιών είναι η οντότητα μέσω της οποίας θα επιτευχθεί η ζεύξη, δηλαδή η σύνδεση, των επικοινωνούντων εξ αποστάσεως μερών και μέσω της οποίας θα πραγματοποιηθεί το "ταξίδι" της πληροφορίας μεταξύ αυτών. Όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη ενότητα, η πρώτη τηλεπικοινωνιακή ζεύξη με ηλεκτρομηχανικό χαρακτήρα, υλοποιήθηκε μέσω σύρματος δια του οποίου "ταξίδευε" η πληροφορία με τη μορφή ηλεκτρικού σήματος. Η ανοδική πορεία που ακολούθησε αυτός ο τρόπος μετάδοσης οδήγησε με τη σειρά της στην ιδέα της ζεύξης μέσω του αέρα, χωρίς τη χρήση συρμάτινων αγωγών αλλά και χωρίς τους χωρικούς περιορισμούς που επέβαλλε η φύση αυτών.

Η ιδέα αυτή βεβαία δε θα ήταν υλοποιήσιμη αν δεν βασιζόταν στην ανάπτυξη της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας η οποία επέτρεπε την διάδοση της πληροφορίας με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Έτσι προέκυψε η έννοια των ασυρμάτων ζεύξεων η οποία με τη σειρά της και χάριν της ελευθερίας που παρέχει στον χρήστη ως προς το χώρο, έδωσε τεράστια ώθηση στην ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών καθώς και σε διάφορες άλλες εφαρμογές.

Τα είδη των ασυρμάτων ζεύξεων, ανάλογα με την φυσιογνωμία και τον τρόπο λειτουργίας αυτών, διακρίνονται ως εξής:

- *Σημείου προς σημείο* : όταν πραγματοποιούνται μεταξύ δύο σημείων. Παράδειγμα αποτελούν οι μικροκυματικές ζεύξεις μεταξύ απομακρυσμένων κέντρων μέσω ενδιάμεσων επαναληπτών.

- *Ευρείας κάλυψης* : ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας προς πολλούς αποδέκτες που βρίσκονται σε διασπορά εντός μίας ευρείας γεωγραφικής περιοχής. Η ραδιοφωνία και η τηλεόραση είναι παραδείγματα αυτής της κατηγορίας.

- *Κινητές* : σε αυτή τη κατηγορία ο δέκτης ή ο πομπός είναι κινητοί. Παράδειγμα αποτελεί η κινητή τηλεφωνία.

- *Οπτικής Επαφής (Line of Sight , LOS)*: για την υλοποίηση τους απαιτείται μια σχετική οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη και η μετάδοση είναι ευθύγραμμη με μέγιστη απόσταση που εξαρτάται από τα ύψη και την απόσταση του πομπού και του δέκτη . Η ραδιοφωνία είναι ένα παράδειγμα.

- *Πέραν του ορίζοντος (Beyond Line of Sight , BLOS)*: ξεπερνούν τα όρια της προηγούμενης κατηγορίας χάριν των φαινομένων της περίθλασης και της διάθλασης της ακτινοβολίας στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.

4.3 Βασικά στοιχεία ασύρματων και είδη ζεύξεων.

Η έννοια της ασύρματης ζεύξης αποκτά υπόσταση μέσα από στοιχεία-έννοιες που αναπτύχθηκαν στο πέρασμα των χρόνων από επιστήμονες βασιζόμενους στα μαθηματικά και τη παρατήρηση. Τα στοιχεία αυτά είναι:

- το σήμα
- η διαμόρφωση σήματος
- ο πομπός
- ο δίαυλος
- οι αρνητικές επιδράσεις επί του σήματος κατά τη διάδοση του
- ο δέκτης

Κάθε ένα από αυτά αποτελεί θεμέλιο λίθο και δεν νοείται η απουσία έστω και ενός εξ αυτών για την υλοποίηση μίας ζεύξης. Στις επόμενες υποενότητες ακολουθεί περιγραφή των παραπάνω εννοιών και των συνθετικών στοιχείων αυτών.

4.3.1 Σήμα.

Ο ορισμός του στοιχείου αυτού είναι δύσκολη υπόθεση. Πολλές και διαφορετικές “οντότητες” σε αυτό τον κόσμο αποτελούν σήματα. Η ομιλία ενός ανθρώπου, η θερμοκρασία ενός σώματος, το φως των αστεριών, το ερέθισμα κάποιου νεύρου, καθώς και άλλα πολλά παραδείγματα, δύνανται να χαρακτηριστούν ως σήματα. Όλα αυτά έχουν ένα κοινό σημείο αναφοράς: το γεγονός ότι μεταφέρουν πληροφορία.

Γενικά, ως σήμα μπορεί να οριστεί ένα φυσικό μέγεθος το οποίο μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο ή το χώρο ή με οποιαδήποτε χαρακτηριστικό. Από μαθηματική άποψη, ένα σήμα εκφράζεται ως πραγματική ή μιγαδική μονοσήμαντη συνάρτηση μίας ή περισσότερων πραγματικών μεταβλητών, η οποία αντιστοιχίζει τις τιμές ενός πεδίου όπως ο χρόνος ή ο χώρος σε κάποιο άλλο πεδίο τιμών, σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα “ποσοτικοποίησης” της έννοιας που αντιπροσωπεύει. Η μορφή τους μπορεί να είναι ηλεκτρική, ηχητική, οπτική είτε κάποια άλλη. Στοιχεία ταυτότητας ενός σήματος είναι το πλάτος και το φάσμα των συχνοτήτων των συνιστωσών που το συνθέτουν.

Τα σήματα είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

- *Συνεχούς Χρόνου (Continues Time, CT) ή Αναλογικά:* το πεδίο ορισμού περιλαμβάνει συνεχείς τιμές.
- *Διακριτού Χρόνου (Discrete Time, DT):* το πεδίο ορισμού περιλαμβάνει διακριτές τιμές.
- *Ψηφιακά (Digital):* το πεδίο ορισμού περιλαμβάνει “προκαθορισμένες” διακριτές τιμές. Στην ουσία πρόκειται για σήματα διακριτού χρόνου με κβαντοποιημένες τιμές.

Δύνανται επίσης να διακριθούν σε :

- *Περιοδικά:* όταν έχουν επαναλαμβανόμενη φυσιογνωμία.
- *Μη περιοδικά :* όταν δεν χαρακτηρίζονται από την έννοια της επανάληψης.

Αυτός ο τρόπος κατηγοριοποίησης είναι σημαντικός γιατί τα περιοδικά σήματα είναι μια ιδιαίτερη κατηγορία για τις τηλεπικοινωνίες και την ηλεκτρονική. Τα συγκεκριμένα έχουν καθορισμένη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος που αποτελεί και τη περίοδο αυτού. Η συμπεριφορά αυτή επαναλαμβάνεται ανά περίοδο καθώς ο χρόνος μεταβάλλεται.

Ένας άλλος τρόπος διάκρισής τους είναι σε:

- *Αιτιοκρατικά ή ντετερμινιστικά:* όταν οι τιμές που λαμβάνουν για κάθε τιμή του πεδίου ορισμού ορίζονται χωρίς αβεβαιότητα. Η περιγραφή αυτών πραγματοποιείται είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας. Στη πρώτη περίπτωση η περιγραφή είναι άμεσα αντιληπτή και η μεταβολή του σήματος αποδίδεται με αναλυτική συνάρτηση ή με γραφική παράσταση. Στη δεύτερη περίπτωση η περιγραφή υλοποιείται με χρήση σειράς ή μετασχηματισμού Fourier μέσω των οποίων το σήμα αποδίδεται από το φασματικό του περιεχόμενο. Η αντίστοιχη συνάρτηση που προκύπτει αποτελεί το φάσμα του σήματος.
- *Τυχαία ή Στοχαστικά:* όταν οι τιμές που λαμβάνουν για κάθε τιμή του πεδίου ορισμού τους, δεν ορίζονται με βεβαιότητα εκ των προτέρων αλλά βάσει πιθανοτήτων και στατιστικών στοιχείων.

Τέλος, τα σήματα δύναται να κατηγοριοποιηθούν ως:

- *Ισχύος*
- *Ενεργειακά*

Αυτή η ταξινόμηση είναι αμοιβαία αποκλειστική. Τα σήματα ισχύος έχουν άπειρη ενέργεια ενώ τα ενεργειακά χαρακτηρίζονται από μηδενική μέση ισχύ.

Τα σήματα υπόκεινται σε επεξεργασία προκειμένου να προσδοθούν σε αυτά ορισμένες ιδιότητες-χαρακτηριστικά ή να μεταδοθούν από κάποιο σημείο σε κάποιο άλλο. Στα πλαίσια αυτής προκύπτει άλλη μια μορφή διάκρισης τους:

- *Βασικής ζώνης:* το φασματικό τους περιεχόμενο εντοπίζεται στις χαμηλές περί τη μηδενική, συχνότητες.
- *Ζωνοπερατά:* το φασματικό τους περιεχόμενο εντοπίζεται μεταξύ δύο μεγαλύτερων του μηδενός συχνοτήτων.

Η επεξεργασία των σημάτων πραγματοποιείται με συγκεκριμένες διατάξεις οι οποίες στη πλειοψηφία των περιπτώσεων, δέχονται ως είσοδο και παρέχουν στη έξοδο τους σήματα ηλεκτρικού χαρακτήρα. Κατά συνέπεια, απαιτείται η μετατροπή του οποιασδήποτε μορφής αρχικού σήματος, σε ηλεκτρικό και αντίστροφα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διατάξεων που ονομάζονται μετατροπείς εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Παράδειγμα της πρώτης κατηγορίας είναι το μικρόφωνο και της δεύτερης, το ηχείο. Τα προκύπτοντα υπόκεινται σε άλλες μορφές επεξεργασίας όπως η ενίσχυσή τους και η διαμόρφωση. Η τελευταία έννοια αναπτύσσεται στην υποενότητα που ακολουθεί.

4.3.2 Διαμόρφωση.

Όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη υποενότητα, προκειμένου να επιτευχθεί η εκπομπή ενός σήματος , φωνής για παράδειγμα, μέσω κάποιου διαύλου, απαιτείται προηγουμένως η μετατροπή του σε ηλεκτρικό ώστε να καταστεί εφικτή η περαιτέρω επεξεργασία του από ηλεκτρονικά μέσα. Προφανώς, το ηλεκτρικό σήμα που θα προκύψει θα χαρακτηρίζεται από τις συχνότητες του αρχικού σήματος πληροφορίας. Σύμφωνα όμως με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, η ενέργεια ενός σήματος είναι ανάλογη της συχνότητας του. Κατά συνέπεια και με δεδομένο ότι η φωνή χαρακτηρίζεται από

χαμηλές συχνότητες και κατ' επέκταση, από χαμηλές τιμές ενέργειας, προκύπτει ότι δεν είναι δυνατή η μετάδοση του αντίστοιχου ηλεκτρικού σήματος σε μεγάλη απόσταση. Επιπλέον, η μετάδοση πολλών τέτοιων σημάτων μέσα από το ίδιο μέσο καθίσταται αδύνατη αφού όπως είναι ευνόητο, οι κοινές συχνότητες τους θα προκαλούσαν σύγχυση.

Τα προαναφερθέντα προβλήματα επιλύονται με την τεχνική της διαμόρφωσης. Η διαδικασία της βασίζεται στη μεταβολή χαρακτηριστικών ενός σήματος με βάση τη στιγμιαία τιμή αυτού(του *διαμορφώνοντος*) που περιέχει τη πληροφορία. Το συγκεκριμένο καλείται *φέρων* (γιατί θα αποτελεί τον φορέα της πληροφορίας) ενώ το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης καλείται *διαμορφωμένο* σήμα το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλότερες συχνότητες και είναι κατάλληλο για την μετάδοση της πληροφορίας στο εκάστοτε μέσο που "ενώνει" την πηγή της με τον επιθυμητό προορισμό. Επίσης, το φασματικό περιεχόμενο του διαμορφωμένου σήματος δύναται να μετατοπιστεί σε επιθυμητές περιοχές του πεδίου των συχνοτήτων ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή του σε/από άλλα σήματα επιτρέποντας έτσι την ταυτόχρονη μετάδοση τους μέσα από τον ίδιο δίαυλο επικοινωνίας.

Γενικότερα, με τη διαμόρφωση επιτυγχάνονται:

- Η ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων του ενός σημάτων στον ίδιο χώρο με χρήση διαφορετικών φερόντων.
- Η μείωση των απαιτήσεων στα χαρακτηριστικά των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.
- Η χρησιμοποίηση περιοχών του πεδίου των συχνοτήτων με καλύτερες συνθήκες για τη διαδικασία της μετάδοσης.

Η διαμόρφωση υλοποιείται με διάφορους τρόπους και εφαρμόζεται τόσο στα αναλογικά σήματα όσο και στα ψηφιακά. Ανάλογα με το είδος του σήματος-φορέα που χρησιμοποιείται στη κάθε περίπτωση, διακρίνονται σε ημιτονοειδούς και σε παλμικού φέροντος.

Στη περίπτωση που το φέρον σήμα έχει ημιτονοειδή μορφή και το σήμα πληροφορίας είναι αναλογικού χαρακτήρα, υλοποιείται ένας εκ των παρακάτω τύπων διαμόρφωσης:

- *Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude Modulation, AM)* : το στιγμιαίο πλάτος του διαμορφωμένου σήματος καθορίζεται από τη στιγμιαία τιμή του σήματος πληροφορίας. Διακρίνεται περαιτέρω σε *Διπλής Πλευρικής Ζώνης (Double SideBand , AM-DSB)*, όταν το διαμορφωμένο σήμα εμφανίζει δύο ζώνες συχνοτήτων με το ίδιο εύρος και ίσο με αυτό του σήματος πληροφορίας και, σε *Απλής Πλευρικής Ζώνης (Single SideBand , AM-SSB)*, η οποία προκύπτει από τη προηγούμενη με χρήση κατάλληλων φίλτρων.

- *Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency Modulation, FM)*: η στιγμιαία συχνότητα του διαμορφωμένου σήματος καθορίζεται από τη στιγμιαία τιμή του σήματος πληροφορίας. Διακρίνεται σε *Στενής Ζώνης (Narrow Band, NB-FM)*, όταν η μέγιστη απόκλιση φάσης του σήματος πληροφορίας είναι μικρή και, σε *Ευρείας Ζώνης (Wide Band, WB-FM)* που διακρίνεται επιπλέον σε, *Έμμεση και Άμεση Διαμόρφωση*.

- *Διαμόρφωση Φάσης (Phase Modulation, PM)*: η στιγμιαία φάση του διαμορφωμένου σήματος καθορίζεται από τη στιγμιαία τιμή του σήματος πληροφορίας.

Εφόσον το σήμα πληροφορίας είναι ψηφιακής μορφής, δηλαδή συνιστά μία ακολουθία παλμών, τότε εφαρμόζεται ένας από τους παρακάτω τύπους:

- *Παλμική Διαμόρφωση Φάσης (Phase Shift Keying, PSK)* : η φάση του φέροντος σήματος εναλλάσσεται μεταξύ δύο τιμών που απέχουν κατά 180° σε αντιστοίχιση με το είδος του δυαδικού ψηφίου που μεταδίδεται. Μία παραλλαγή αυτής είναι η *Ορθογωνική Παλμική Διαμόρφωση Φάσης (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)* κατά την οποία δύο ακολουθίες ψηφίων κωδικοποιούνται κατά PSK σε δύο ορθογώνιες εκδοχές του φέροντος. Οι δύο ακολουθίες είναι δυνατόν να προέρχονται από δύο ανεξάρτητες πηγές πληροφορίας ή από την ίδια πηγή κατόπιν μετατροπής από σειριακή σε παράλληλη. Από αυτή τη μορφή διαμόρφωσης προκύπτει με τη σειρά της η *Αντισταθμισμένη Ορθογωνική Παλμική Διαμόρφωση Φάσης (Offset Quadrature Phase Shift Keying, OQPSK)* κατά την οποία τα σήματα βασικής ζώνης που δημιουργούν τα δύο ορθογώνια κανάλια έχουν σταθερή χρονική διαφορά μεταξύ τω ψηφίων τους. Το φάσμα των σημάτων κατά αυτή τη διαμόρφωση είναι ίδιο με αυτό των κατά QPSK διαμορφωμένων. Πέραν των προαναφερθέντων, υπάρχουν και άλλες παραλλαγές της PSK διαμόρφωσης.

- *Παλμική Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency Shift Keying, FSK)* : συνίσταται στην αντιστοίχιση των δυαδικών ψηφίων 0 και 1 με δύο συχνότητες που χαρακτηρίζουν το διαμορφωμένο σήμα.

- Παλμική *Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude Shift Keying, ASK)* : το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος καθορίζεται από τα πλάτη των παλμών του σήματος πληροφορίας. Το δυαδικό ψηφίο 1 μεταδίδεται από ένα σήμα συγκεκριμένου πλάτους ενώ το 0 μεταδίδεται μεταβάλλοντας το πλάτος και διατηρώντας σταθερή τη συχνότητα. Παραλλαγή αυτού του τύπου είναι η *On-Off Διαμόρφωση (On-Off Keying, OOK)* κατά την οποία ένα από τα πλάτη έχει μηδενική τιμή.

Εάν το φέρον σήμα έχει παλμική μορφή και το σήμα πληροφορίας είναι αναλογικού χαρακτήρα, εφαρμόζονται οι παρακάτω τύποι παλμικής διαμόρφωσης :

- *Διαμόρφωση Ύψους Παλμών (Pulse Amplitude Modulation, PAM)* : το πλάτος των παλμών μια παλμοσειράς που συνιστά το διαμορφωμένο σήμα διαμορφώνεται σύμφωνα με τις τιμές δειγμάτων του σήματος πληροφορίας που λαμβάνονται ανά συγκεκριμένα χρονικά δαιστήματα.

- *Διαμόρφωση Διάρκειας Παλμών (Pulse Width Modulation, PWM)* : η διάρκεια (το μήκος) του διαμορφωμένου σήματος καθορίζεται από τιμές δειγμάτων του σήματος πληροφορίας.

- *Διαμόρφωση Θέσης Παλμών (Pulse Position Modulation, PPM)* : χρησιμοποιούνται παλμοί σταθερής διάρκειας. Οι παλμοί μετατοπίζονται χρονικά σε σχέση με την ονομαστική τους θέση, ανάλογα με το δείγμα στο οποίο αντιστοιχούν.

Τέλος, στη περίπτωση που το φέρον σήμα έχει παλμική μορφή και το σήμα πληροφορίας είναι ψηφιακού χαρακτήρα, εφαρμόζεται η *Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Pulse Code Modulation, PCM)*. Κατά τη διαδικασία αυτής, τα προς μετάδοση δείγματα ενός σήματος πριν μεταδοθούν, υφίστανται κβάντιση και στη συνέχεια κωδικοποίηση. Με τη κβάντιση, οι ακριβείς τιμές των δειγμάτων ενός φασματικά περιορισμένου σήματος προσεγγίζονται από συγκεκριμένες τιμές πεπερασμένου πλήθους που ονομάζονται στάθμες κβάντισης. Η κωδικοποίηση στη συνέχεια αφορά τη παράσταση του κβαντισμένου δείγματος υπό μορφή δυαδικού αριθμού και, τη δημιουργία της “κωδικής λέξης” που θα μεταδοθεί.

4.3.3 Τηλεπικοινωνιακός διάυλος και επιδράσεις κατά τη μετάδοση.

Ένα σήμα όπως είναι ευνόητο, προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιου μέσου που θα του επιτρέψει να "φτάσει" στον προορισμό του. Η μετάδοση δύναται είτε κατά ενσύρματο είτε κατά ασύρματο τρόπο. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που συνδυάζονται και οι δύο τρόποι τμηματικά κατά τη μετάδοση. Κατά τον ασύρματο τρόπο ο διάυλος μπορεί να είναι κάποια γραμμή μεταφοράς (ομοαξονικό καλώδιο, συνεστραμμένο κτλ.), κυματοδηγός ή οπτική ίνα. Στην ασύρματη μετάδοση το ρόλο του διαύλου λαμβάνει ο ελεύθερος χώρος, μια θεωρητική έννοια στην ουσία, με ιδανικά χαρακτηριστικά, η οποία όμως διευκολύνει την μελέτη των αντίστοιχων φαινομένων .

Λόγω της ανάγκης για αξιοποίηση του διαύλου από πολλές και διαφορετικές εφαρμογές, αυτός "χωρίζεται" σε συγκεκριμένα τμήματα καθένα από τα οποία εξυπηρετεί και διαφορετική εφαρμογή. Πιο συγκεκριμένα, το φάσμα συχνοτήτων αντιστοιχίζεται στον διάυλο και αυτό διαιρείται σε επιμέρους ζώνες (μπάντες) εντός των οποίων πραγματοποιούνται οι μεταδόσεις που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε τηλεπικοινωνιακή εφαρμογή.

Ο καταμερισμός των συχνοτήτων έχει όπως παρακάτω:

- 0-3000 MHz : Ραδιοκύματα
- 3000 MHz-300 GHz: Μικροκύματα
- 300 GHz -400 THz: Υπέρυθρη Ακτινοβολία
- 400 THz -800 THz: Ορατή Ακτινοβολία
- 800 THz- $3 \cdot 10^{17}$ Hz: Υπεριώδης Ακτινοβολία
- $3 \cdot 10^{17}$ Hz- $5 \cdot 10^{19}$ Hz : Ακτίνες Χ
- $5 \cdot 10^{19}$ Hz - $3 \cdot 10^{22}$ Hz : Ακτίνες γ
- $3 \cdot 10^{22}$ Hz - : Κοσμικές ακτίνες

Δυστυχώς, τα σήματα κατά τη μετάδοσή τους δέχονται την επίδραση αρνητικών παραγόντων, ανάλογα με το είδος του εκάστοτε διαύλου, η δράση των οποίων προκαλεί αλλαγές σε αυτά. Κατά συνέπεια, ένα σήμα μετά τη "διέλευση" μέσα από αυτόν θα υποστεί μεταβολές ως προς τα αρχικά του χαρακτηριστικά. Έτσι προκύπτουν οι έννοιες του σήματος εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.

Οι παράγοντες που επιδρούν αρνητικά κατά τη μετάδοση είναι οι παρακάτω:

- **Θόρυβος:** πρόκειται για μια οντότητα ίδιας φυσιογνωμίας με μεταδιδόμενο σήμα, στοχαστικού χαρακτήρα η οποία δυσχεραίνει τη λειτουργία ενός συστήματος και περιορίζει την αξιοπιστία στη μετάδοση της πληροφορίας. Διακρίνεται σε *τεχνητό και φυσικό θόρυβο*. Η πρώτη μορφή προκύπτει από τη λειτουργία συσκευών και μηχανών όταν αυτή περιλαμβάνει ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά στοιχεία και είναι συνήθως κρουστικής φύσης και μικρής διάρκειας. Όσον αφορά το φυσικό θόρυβο, η ύπαρξή του είναι αποτέλεσμα φυσικών φαινομένων. Διακρίνεται με τη σειρά του στον *ουράνιο*, ο οποίος οφείλεται στην γαλαξιακή και την ηλιακή ακτινοβολία και στην ατμόσφαιρα και, στον *κυκλωματικό*, ο οποίος προκύπτει από την τυχαία κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα παθητικά στοιχεία (*θερμικός θόρυβος*) ή από την τυχαία διακύμανση της παραγωγής ελεύθερων φορέων στα ενεργητικά στοιχεία (*θόρυβος βολής*).
- **Εξασθένηση:** προκύπτει από τις απώλειες ισχύος κατά τη μετάδοση του σήματος μέσα από το δίαυλο. Αυτές διακρίνονται σε *απώλειες ελεύθερου χώρου* που εξαρτώνται από τη συχνότητα του φέροντος και την απόσταση πηγής- παραλήπτη, καθώς και σε *λοιπές απώλειες*. Οι τελευταίες συμπεριλαμβάνουν τις απώλειες ατμόσφαιρας και ιονόσφαιρας, τις απώλειες λόγω νεφώσεων και βροχής και τις απώλειες που οφείλονται σε αποπόλωση ή σε αποπροσανατολισμό των κεραιών. Και αυτές εξαρτώνται από την απόσταση πηγής- παραλήπτη.
- **Παραμόρφωση :** οφείλεται στην εξάρτηση της συμπεριφοράς ορισμένων διαύλων από τη συχνότητα. Αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορετική μεταχείριση των φασματικών συνιστωσών του μεταδιδόμενου σήματος. Σε ορισμένες των περιπτώσεων, η συμπεριφορά του διαύλου καθώς μεταβάλλεται η συχνότητα, περιγράφεται από μια συνάρτηση που δύναται να προσδιορισθεί και η οποία ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς.
- **Διαλείψεις :** πρόκειται για ένα φαινόμενο που αφορά τις κινητές επικοινωνίες και κατά το οποίο, εμφανίζονται διακυμάνσεις στο πλάτος , τη φάση και τη γωνία άφιξης του λαμβανόμενου σήματος λόγω της συμβολής ακτινοβολίας από διαφορετικές κατευθύνσεις. Σε μερικές των περιπτώσεων μάλιστα, και εφόσον η διαφορά φάσης πάρει κατάλληλη τιμή, τα σήματα αλληλοεξουδετερώνονται. Διακρίνονται σε *μικρής* και σε *μεγάλης κλίμακας*, αναλόγως με το μέγεθος της μεταβολής που προκαλούν όταν η πηγή μετατοπίζεται κατά απόσταση συγκρίσιμη με το μήκος κύματος.
- **Παρεμβολές :** αφορούν την μερική ή ολική συνύπαρξη ανεπιθύμητων σημάτων στο ίδιο εύρος συχνοτήτων με αυτό του επιθυμητού μεταδιδόμενου σήματος. Συνυπάρχουν με τον παράγοντα του θορύβου στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις και οδηγούν σε περαιτέρω μείωση της ποιότητας του σήματος που λαμβάνεται από το δέκτη. Οφείλονται στην ταυτόχρονη χρησιμοποίηση των ίδιων διαύλων συχνοτήτων από περισσότερους του ενός χρήστες, στη μη ιδανική συμπεριφορά των φίλτρων συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στις συσκευές εκπομπής και λήψης, στη μη γραμμική ενίσχυση πολλαπλών σημάτων και στην αποπόλωση που προκαλείται κατά την ασύρματη μετάδοση, ιδίως εξαιτίας της βροχής για συχνότητες άνω των 10 GHz.

4.3.4 Πομπός.

Ο πομπός αποτελεί τη “πηγή” του σήματος-φορέα που θα ταξιδέψει μέσα στο δίαυλο προκειμένου να μεταφέρει την πληροφορία-αρχικό σήμα στον επιθυμητό προορισμό. Πρόκειται για ένα σύστημα αποτελούμενο από επιμέρους στοιχεία –βαθμίδες, κάθε μία από τις οποίες επιτελεί μια συγκεκριμένη διαδικασία.

Οι κύριες βαθμίδες που συνθέτουν συνήθως έναν τυπικό τηλεπικοινωνιακό πομπό, είναι οι κάτωθι:

- *Βαθμίδα Εισόδου:* υποδέχεται το σήμα πληροφορίας που έχει ηλεκτρικό χαρακτήρα. Αποτελείται από τον *μετατροπέα αναλογικό / ψηφιακό* για την αντίστοιχη μετατροπή του σήματος εισόδου, τον *πολυπλέκτη* ο οποίος επιτρέπει τον μη καταστροφικό συνδυασμό πολλών σημάτων για την δημιουργία ενός ενιαίου προς μετάδοση σήματος και τέλος, τον *κωδικοποιητή* για τη δημιουργία του σήματος βασικής ζώνης (ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα).

- *Βαθμίδα επεξεργασίας ενδιάμεσης συχνότητας (Intermediate Frequency, IF) :* περιλαμβάνει τον *διαμορφωτή* που μετατρέπει το σήμα βασικής ζώνης σε ενδιάμεσης και τον *ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας* ο οποίος ενισχύει το προκύπτον IF σήμα. Η βαθμίδα αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία γιατί επιτρέπει την ενίσχυση σημάτων με απλό και οικονομικό τρόπο, καθώς και άλλες διεργασίες.

- *Βαθμίδα ραδιοσυχνοτήτων (Radiofrequency, RF) :* μετατρέπει το IF σήμα στην επιθυμητή προς μετάδοση μορφή. Αποτελείται από τον μετατροπέα συχνότητας που μετατοπίζει το φασματικό περιεχόμενο του IF σήματος στην (υψηλότερη) περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων , τον *ενισχυτή ισχύος* που αποδίδει στο RF σήμα την απαιτούμενη για εκπομπή ισχύ, το *RF φίλτρο* για την εξάλειψη του εκτός της επιθυμητής ζώνης φασματικού περιεχομένου και, τη *διάταξη σύζευξης* (η κεραία στη περίπτωση των ασύρματων ζεύξεων) του μεταδιδόμενου σήματος και του εκάστοτε δίαυλου.

4.3.5 Δέκτης.

Ο δέκτης, σε αντίθεση με τον πομπό, αποτελεί τον “προορισμό” του εκπεμπόμενου σήματος-φορέα πληροφορίας. Είναι το σύστημα-συσσκευή που δέχεται, μέσω της κεραίας, το μεταδιδόμενο διαμορφωμένο σήμα και στη συνέχεια το μετατρέπει και πάλι σε σήμα πληροφορίας μέσα από διεργασίες όπως η ενίσχυση και η αποδιαμόρφωση, μια διαδικασία η οποία είναι αντίστροφη της διαμόρφωσης .Οι δέκτες διακρίνονται σε *ομόδυνους*, όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι ίδια με αυτή του μεταδιδόμενου σήματος και σε *ετερόδυνους* όταν το λαμβανόμενο σήμα μετατοπίζεται περί μία ενδιάμεση συχνότητα.

Οι βαθμίδες ενός τυπικού τηλεπικοινωνιακού δέκτη είναι η παρακάτω:

- *Βαθμίδα Εισόδου* : υποδέχεται και “εγκλωβίζει” το μεταδιδόμενο σήμα και καθορίζει την επιλεκτικότητα του δέκτη. Περιλαμβάνει το *στοιχείο συλλογής (κεραία)* του ηλεκτρομαγνητικού σήματος, τον *ενισχυτή χαμηλού θορύβου* για την ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος, το *ενσύρματο μέσο (κυματοδηγός ή γραμμή μεταφοράς)* για τη διανομή του ενισχυμένου ληφθέντος σήματος προς το υπόλοιπο μέρος του δέκτη, τα *φίλτρα ραδιοσυχνοτήτων* για τη καταπίεση του θορύβου και των παρεμβολών και τέλος, τα *αντισταθμιστικά δίκτυα* για την αντιστάθμιση της δυσμενούς επίδρασης του διαύλου λόγω μεταβολής του με τη συχνότητα.

- *Βαθμίδα ενδιάμεσης συχνότητας (Intermediate Frequency, IF)* : σε αυτή πραγματοποιείται η μεγαλύτερη ενίσχυση του ληφθέντος σήματος. Αυτό υποβιβάζεται από τη περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων στην εκάστοτε ενδιάμεση συχνότητα του δέκτη η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της τηλεπικοινωνιακής εφαρμογής. Η ενδιάμεση συχνότητα είναι μικρότερη των ραδιοσυχνοτήτων του λαμβανόμενου σήματος και μεγαλύτερη αυτών της βασικής ζώνης της πληροφορίας. Ο υποβιβασμός υλοποιείται προκειμένου να ενισχυθεί περιορισμένο εύρος ζώνης γεγονός που οδηγεί σε απλούστερους ενισχυτές και κατ’ επέκταση, σε μείωση του κόστους και σε βελτίωση των συστημάτων διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης. Με τη μετάπτωση στην ενδιάμεση συχνότητα βελτιώνεται επίσης και η ευαισθησία του δέκτη.

- *Βαθμίδα επεξεργασίας* : στη περίπτωση ετερόδυνου δέκτη ακολουθεί τη βαθμίδα ενδιάμεσης ενώ στον ομόδυνο, βρίσκεται αμέσως μετά τη βαθμίδα εισόδου. Περιλαμβάνει τον *αποδιαμορφωτή*, τον *ενισχυτή βασικών συχνοτήτων*, τον *μετατροπέα ψηφιακό / αναλογικό (αναλόγως του μεταδιδόμενου σήματος)* ή και *αποπολυπλέκτη*.

Η αξιοπιστία ενός δέκτη, από την οποία καθορίζεται και η ποιότητα του καθορίζεται από τα εξής μεγέθη:

- *Ευασθησία* : αφορά την ελάχιστη λαμβανόμενη ισχύ από το δέκτη προκειμένου να λειτουργήσει αποδοτικά.

- *Επιλεκτικότητα*: σχετίζεται με τη ικανότητα διαχωρισμού και φιλτραρίσματος των επιθυμητών συχνοτήτων και αποκοπής των ανεπιθύμητων.

- *Πιστότητα* : αφορά την ορθή αναπαραγωγή, χωρίς παραμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος.

- *Συντελεστή θορύβου* : είναι ο λόγος του μεγέθους του παραγόμενου θορύβου σε σχέση με το μέγεθος του σήματος πληροφορίας. Η βαθμίδα εισόδου παίζει σημαντικό ρόλο στο μέγεθος αυτού.

- *Δυναμική Περιοχή* : αναφέρεται στην δυνατότητα διατήρησης γραμμικής συμπεριφοράς για ασταθή σήματα.
- *Περιορισμός παρασιτικών εκπομπών* : αφορά την μείωση πρόκλησης παρασίτων στη λειτουργία γειτονικών συσκευών.

4.4 Εξέλιξη και εφαρμογές των ασυρμάτων ζεύξεων.

Η πρώτη ίσως επίτευξη ασύρματης ζεύξης στην ιστορία της τεχνολογίας [78] θεωρείται αυτή που υλοποιήθηκε μέσω της λειτουργίας του φωτοφώνου του Alexander Graham Bell στα 1880 [79]. Μετά την ανάπτυξη του τηλεφώνου και της εξάπλωσης του, ο Bell παρατηρώντας τα τηλεφωνικά καλώδια που γέμιζαν ανεξέλεγκτα τους δρόμους της Αμερικής δημιουργώντας μια σχεδόν χασομική κατάσταση, συνέλαβε την ιδέα της ασύρματης μετάδοσης της φωνής με τη χρήση φωτός. Η πρωτοποριακή αυτή για την εποχή της, ιδέα, κατέστη εφικτή χάριν στην χρήση ειδικών κατόπτρων και ενός φωτοηλεκτρικού στοιχείου, του σεληνίου. Ωστόσο όμως, η εφαρμογή της δεν γνώρισε την αναμενόμενη από τον Bell, ανάπτυξη. Ακόμα και οι ακτίνες του φωτός έθεταν περιορισμούς στην μετάδοση με αυτό τον τρόπο, αφού η υλοποίηση της προϋπέθετε τη σταθερή παρουσία φωτός καθώς και την οπτική επαφή των επικοινωνούντων.

Οι περιορισμοί αυτοί επρόκειτο να ξεπεραστούν, χάριν στη θεμελίωση της θεωρίας του ηλεκτρομαγνητισμού από τον James Clerk Maxwell, μερικά χρόνια νωρίτερα. Το 1865 ο Maxwell διατύπωσε τις θεμελιώδεις εξισώσεις που διέπουν το αντίστοιχο φαινόμενο [80] οι οποίες οδήγησαν στην ανάδειξη του σημαντικότερου αποτελέσματός αυτού, της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Την ύπαρξη αυτής επαλήθευσε πειραματικά ο Heinrich Rudolf Hertz περί το 1888. Τα πειράματα περιλάμβαναν σπινθηριστή ο οποίος δια ηλεκτρικών εκκενώσεων προκαλούσε την εκπομπή ακτινοβολίας διαμέσου του αέρα το εργαστηρίου. Η εκπομπή γινόταν αντιληπτή από την ανάπτυξη σπινθήρων σε μια διάταξη που βρισκόταν σε κάποιο τυχαίο απομακρυσμένο σημείο της αίθουσας και η οποία διέθετε κεραία για τη "σύλληψη" της ακτινοβολίας. Κατόπιν αυτής της επαλήθευσης οι ασύρματες ζεύξεις έβρισκαν πλέον τον "δρόμο" τους.

Η πρώτη σύνδεση εξ αποστάσεως με εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για πρακτικούς σκοπούς, μπορεί να καταλογίζεται στον Guglielmo Marconi ο οποίος, επηρεασμένος από τα πειράματα του Hertz, προχώρησε στην ανάπτυξη και κατοχύρωση πατέντας του ασύρματου τηλεγράφου, στα 1896. Ο ίδιος επιτυγχάνει την πρώτη ασύρματη τηλεπικοινωνιακή ζεύξη μεταξύ Αγγλίας και Αμερικής (απόσταση 1700 μιλίων) το 1901[81], [82], [83], στέλνοντας το γράμμα "S" . Η συγκεκριμένη επίτευξη εκτός από το ότι κατέστησε δυνατή τη μετάδοση πληροφορίας χωρίς την απαίτηση της οπτικής επαφής των προς ζεύξη μερών, οδήγησε στη διαπίστωση της εκμετάλλευσης της ατμόσφαιρας για τις τηλεπικοινωνίες. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της υπερατλαντικής ζεύξης έγινε αντιληπτή η ύπαρξη της ιονόσφαιρας, η οποία ανακλούσε μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας προς τον επιθυμητό προορισμό.

Ο ασύρματος τηλεγράφος του Marconi αποτέλεσε αναμφισβήτητα μια πρωτοποριακή ιδέα για την εποχή της και έναν μεγάλο σταθμό στη ιστορία των τηλεπικοινωνιών από την πλευρά της επιστημονικής αντίληψης, ωστόσο όμως για τον κοινό του δεν ήταν τίποτα άλλο από την αποστολή " γραμμών και κουκίδων" ή ήχων της μορφής "μπιπ" σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Η δυνατότητα μετάδοσης της ανθρώπινης φωνής κατά ασύρματο τρόπο, που φαινομενικά θα είχε πρακτική αξία για το μέσο πολίτη

εκείνης της εποχής, κατέστη εφικτή για πρώτη φορά το 1900 από τον Roberto Landell de Moura[84] ή από τον Reginald Fessenden [85]. Ο δεύτερος πίστευε ότι η ασύρματη μετάδοση της φωνής θα ήταν εφικτή μέσω συνεχών κυμάτων (continuous waves , CW) και όχι με τη χρήση των αποσβενύμενων που χρησιμοποιούνταν για την ασύρματη τηλεγραφία και που υποστηρίζονταν από την επιστημονική κοινότητα, εκείνη τη εποχή[86]. Μέχρι το 1906 είχε καταφέρει να αναπτύξει ένα σύστημα το οποίο βασιζόταν σε έναν σύγχρονο εναλλάκτη υψηλής συχνότητας (100 kHz) και το οποίο άνοιγε το δρόμο στη μετάδοση ήχου σε μεγάλες αποστάσεις. Σημαντικό επίσης επίτευγμα της έρευνάς του ήταν και η ανάδειξη της διαμόρφωσης πλάτους (amplitude modulation, AM), μιας τεχνικής που έδινε πλέον την δυνατότητα “ενσωμάτωσης” των χαμηλών συχνοτήτων των ηχητικών σημάτων σε ένα φέρον κύμα υψηλότερης συχνότητας. Την AM διαμόρφωση ακολούθησε η διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation, FM) το 1933 από τον Edwin Armstrong[75] η οποία καθιστά το μεταδιδόμενο σήμα λιγότερο ευάλωτο σε παράσιτα. Πέραν αυτών των δύο τύπων διαμόρφωσης έχουν αναπτυχθεί και άλλες, αναφορά των οποίων θα γίνει σε επόμενη ενότητα.)

Επόμενη πρόκληση για τις ασύρματες ζεύξεις μετά τη μετάδοση φωνής ήταν, η μετάδοση εικόνας (σταθερής). Η πρώτη πειραματική εκπομπή εικόνας με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πραγματοποιήθηκε το 1910 από τη γερμανική εταιρεία, Telefunken [87]. Η δοκιμή βασίστηκε στη χρήση του Τηλεαυτόγραφου (Teleautograph), μίας συσκευής που επινοήθηκε από τον Arthur Korn το 1902. Η συσκευή αυτή μετέτρεπε την εικόνα σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο στη συνέχεια ήταν δυνατόν να μεταδοθεί μέσω των ενσύρματων τηλεπικοινωνιακών γραμμών. Χάριν στην τότε ανάπτυξη της ραδιοτεχνολογίας το ηλεκτρικό σήμα μπορούσε πλέον, με κατάλληλη διαμόρφωση , να μεταδοθεί ασύρματα σε μεγάλες αποστάσεις.

Την μετάδοση σταθερής εικόνας ακολούθησε η ασύρματη εκπομπή κινούμενης που προέκυπτε από τις πρώτες συσκευές τηλεοπτικής λήψης εκείνης της εποχής. Ο John Logie Baird, ο οποίος είχε αναπτύξει ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα λήψης και προβολής εικόνας σε κίνηση, πραγματοποίησε την πρώτη ασύρματη εκπομπή τηλεοπτικού σήματος ενός το 1926 [88]. Η συσκευή του λάμβανε την εικόνα ενός κινούμενου προσώπου και στη συνέχεια, με τη χρήση ενός σπειροειδώς διάτρητου περιστρεφόμενου δίσκου, μια πηγής φωτός και ενός φωτοευαίσθητου στοιχείου από σελήνιο, τη μετέτρεπε σε ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα αυτό στη συνέχεια μπορούσε να διαμορφώσει κατά πλάτος ένα φέρον κύμα (AM διαμόρφωση) και να “ταξιδέψει” ως ραδιοφωνικό μέχρι τη συσκευή του δέκτη που λειτουργούσε με ηλεκτρομηχανικό τρόπο, ανάλογο αυτού της συσκευής εκπομπής. Το 1928 η εταιρεία του Baird υλοποίησε την πρώτη υπερατλαντική τηλεοπτική μετάδοση στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών , “ενώνοντας” το Λονδίνο και τη Νέα Υόρκη.

Οι επιτυχίες που αναφέρθηκαν έδωσαν ακόμα πιο μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη των ασυρμάτων ζεύξεων αφού πέρα από το επιστημονικό ενδιαφέρον άρχιζαν να αποκτούν και εμπορική αξία. Το τηλέφωνο, το ραδιόφωνο και η τηλεόραση εισβάλουν όλο και περισσότερο στη καθημερινή ζωή. Το γεγονός αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από τους μεγαλοεπιχειρηματίες που αποβλέπουν στο κέρδος. Το κέρδος με τη σειρά του συνεπάγεται επενδύσεις στο χώρο της έρευνας και κατ’ επέκταση, εξέλιξη τόσο του θεωρητικού υπόβαθρου όσο και των συστημάτων που συνθέτουν τον κόσμο των ασυρμάτων ζεύξεων.

Οι δυνατότητες αυτών επεκτείνονται συνεχώς μέσα από την έννοια των δικτύων που κατακλύζουν τον κόσμο με αυξανόμενο ρυθμό καθώς και μέσα από την συνεχή βελτίωση των συστημάτων που οδηγεί με τη σειρά της, στη βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών (ταχύτητα, ποιότητα κτλ.). Η “ έξοδος ” του ανθρώπου στο διάστημα και η θέση των πρώτων γεωστατικών δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη γη καθιστά τις ασύρματες ζεύξεις κυρίαρχο στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Η κυριαρχία αυτή είναι αναμφισβήτητη, ειδικά στη σημερινή εποχή που η κινητή τηλεφωνία και το διαδίκτυο αποτελούν σήματα κατατεθέντα της καθημερινότητας του ανθρώπου.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι οι ασύρματες ζεύξεις δεν βρίσκουν εφαρμογή μόνο στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών. Δε πρέπει να παραλειφθούν οι εφαρμογές τους και σε άλλους τομείς όπως αυτοί της τηλεκατεύθυνσης και της μετάδοσης ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι “πρωτοστάτης” και των δύο περιπτώσεων θεωρείται ο Nikola Tesla. Το 1898 παρουσίασε σε δημόσια επίδειξη την εξ αποστάσεως πλοήγηση ενός πλοιαρίου-μακέτας με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας[89]. Πιο συγκεκριμένα, ο χειριστής χρησιμοποιούσε έναν πομπό ο οποίος μετέτρεπε την κίνηση κάποιων κατευθυντήριων διακοπών σε σήματα συγκεκριμένης συχνότητας τα οποία με τη σειρά τους λαμβάνονταν από ένα δέκτη επί του πλοιαρίου. Στη συνέχεια, ο δέκτης μετέτρεπε τα σήματα αυτά σε εντολές για τη λειτουργία κινητήρα και σερβομηχανισμών που έθεταν το πλοιαίο σε κατευθυνόμενη κίνηση. Έκτοτε, η ανάπτυξη του τηλεχειρισμού καθιστά σήμερα δυνατές, λειτουργίες τόσο απλές όπως το ξεκλείδωμα της κλειδαριάς του αυτοκινήτου, όσο και περισσότερο πολύπλοκες όπως ο χειρισμός ενός ΜΕΑ. Σχετικά με την ασύρματη μεταφορά ενέργειας, ο Tesla πραγματοποίησε πειράματα περί το 1899 στα οποία επιτύχανε την αφή λαμπτήρων σε απόσταση 25 μιλίων, χωρίς τη χρήση καλωδίων, βασιζόμενος στην αξιοποίηση ρευμάτων υψηλής συχνότητας και οραματιζόμενος την ελεύθερη διακίνηση ηλεκτρικής ενέργειας, προς όφελος της παγκόσμιας ευημερίας [90].

Γενικά, ένα σύστημα μετάδοσης ενέργειας περιλαμβάνει έναν “πομπό” ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και έναν ή περισσότερους “δέκτες” που τροφοδοτούν αντίστοιχα κάποιο φορτίο. Η ζεύξη μεταξύ αυτών επιτυγχάνεται είτε μέσω χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων κατά τρόπο που παραπέμπει στη λειτουργία των μετασχηματιστών, είτε με τρόπο παρόμοιο των τηλεπικοινωνιών . Με τις μεθόδους αυτές είναι δυνατόν να επιτευχθεί ηλεκτροδότηση φορτίων χωρίς την χρήση καλωδίων η οποία μπορεί να είναι μη βολική, επικίνδυνη ή ακόμα και αδύνατη. Διακρίνονται δύο κατηγορίες μετάδοσης [91],[92],[93] :

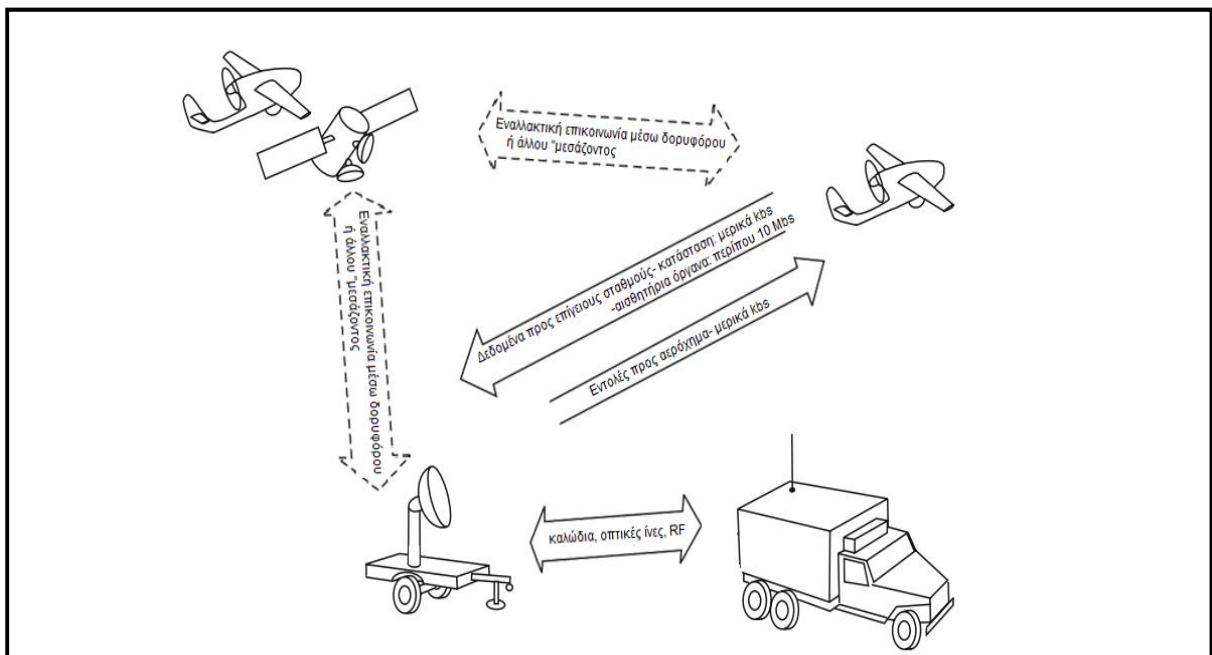
- χωρίς ακτινοβολία ή κοντινού πεδίου (non -radiative, near-field)
- με ακτινοβολία ή μακρινού πεδίου (radiative, far-field)

Στη πρώτη κατηγορία ανήκουν εφαρμογές όπως οι τεχνητοί καρδιακοί βηματοδότες, οι έξυπνες κάρτες (smartcards) καθώς επίσης και η ασύρματη φόρτιση οικιακών συσκευών και ηλεκτρικών οχημάτων. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται εφαρμογές όπως η τροφοδότηση δορυφόρων και ΜΕΑ.

4.5 Οι ασύρματες ζεύξεις στα ΣΜΕΑ.

Η έννοια των ΣΜΕΑ είναι άμεσα και αποκλειστικά εξαρτημένη από αυτή της ασύρματης ζεύξης. Ουσιαστικά, η πρώτη δεν θα είχε υλοποιηθεί ποτέ αν δεν είχε αναπτυχθεί η δεύτερη. Η δυνατότητα χειρισμού οχημάτων που κινούνται βασιζόμενα σε ηλεκτρομηχανικά συστήματα, εξ αποστάσεως, χωρίς καλώδια ή άλλα μέσα που θα περιορίζαν την ελευθερία της κίνησης τους, αποτέλεσε το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη των ΜΕΑ ως τηλεκατευθυνόμενα μέσα αεροπορικού χαρακτήρα. Επιπλέον, οι εφαρμογές που αυτά εξυπηρετούν κατά τις πτήσεις τους και γενικά, οι αποστολές που αναλαμβάνουν να εκτελέσουν, όπως αυτές περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, θα ήταν ανέφικτες χωρίς την επίτευξη ασύρματων ζεύξεων για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς.

Μια τυπική απεικόνιση των ζεύξεων που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία ενός απλοποιημένου ΣΜΕΑ φαίνεται στο Σχήμα 4.1 [1]. Μέσω αυτού καθίσταται ευκολότερα αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα επιμέρους στοιχεία ενός συνήθους ΣΜΕΑ.



Σχήμα 4.1

Η έννοια της ασύρματης ζεύξης βρίσκει εφαρμογή στις διάφορες επιμέρους λειτουργίες των ΣΜΕΑ. Αυτές δύναται να αποτελούν μέρος κάποιας από τις παρακάτω βασικές κατηγορίες λειτουργιών αυτών :

- *Χειρισμός και Πλοήγηση του αεροχήματος* : αφορά τον έλεγχο των υποσυστημάτων (μηχανικών, ηλεκτρικών, ηλεκτρονικών και ηλεκτρομηχανικών) που υλοποιούν την κίνηση του οχήματος και την διατήρηση αυτού επί της εκάστοτε επιθυμητής τροχιάς που οδηγεί στη υλοποίηση της αποστολής.

- *Χειρισμός του Επιχειρησιακού Φόρτου (payload) του MEA και ανταλλαγή δεδομένων και σημάτων ήχου, εικόνας και βίντεο (πολυμέσων, multimedia) μεταξύ MEA και επίγειων σταθμών* : αναφέρεται στα υποσυστήματα που σχετίζονται άμεσα με την εκτέλεση της αποστολής (συστήματα οπλικά και κατάδειξης στόχου, συσκευές λήψης εικόνας και βίντεο, ραντάρ, αισθητήρες καθώς και τυχόντα άλλα συστήματα). Τα δεδομένα δύναται να αφορούν την κατάσταση του αεροχήματος (ταχύτητα, ύψος, ενεργειακά αποθέματα, λειτουργική κατάσταση) ή στοιχεία στόχων και τοποθεσιών ενώ τα σήματα πολυμέσων σχετίζονται με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων υποσυστημάτων του MEA.

- *Συνεργασία με άλλα MEA* : αναφέρεται στην ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ MEA που συνεργάζονται και αλληλεπιδρούν στα πλαίσια ενός συνόλου- ομάδος με ιδιαίτερα δυναμικό χαρακτήρα.

Προκειμένου να υλοποιηθούν οι παραπάνω εφαρμογές, απαιτείται η εκμετάλλευση συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων από το υπάρχον χρησιμοποιούμενο φάσμα, όπως αυτό έχει καθοριστεί παγκοσμίως. Οι διάκριση και ο χαρακτηρισμός των συχνοτήτων έγινε κατά ένα τρόπο σε προηγούμενη ενότητα. Άλλοι τρόποι κατηγοριοποίησης καθώς και οι τυπικές χρήσεις αυτών σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών του ΟΗΕ (International Telecommunication Union , ITU of the United Nations Organization), το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE), την Ευρωπαϊκή Ένωση και το NATO, φαίνονται στους Πίνακες 4.1 -3 [4].

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΖΩΝΗΣ	ΑΡ/ΞΘ	ITU ΖΩΝΗ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ
Extremely Low	ELF	1	3-30Hz	100,000km-10,000km	ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ
Super Low	SLF	2	30-300Hz	10000 - 1000km	ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ
Ultra Low	ULF	3	300-3000Hz	1000 -100km	ΕΠΙΚ/ΝΙΕΣ ΟΡΥΧΕΙΩΝ
Very Low	VLF	4	3-30kHz	100-10km	ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΙ
Low	LF	5	30-300kHz	10km-1km	ΑΜ ΜΕΤΑΔΟΣΕΙΣ
Medium	MF	6	300-3000kHz	1km-100m	ΑΜ ΜΕΤΑΔΟΣΕΙΣ
High	HF	7	3-30MHz	100m -10m	ΡΑΔΙΟΕΡΑΣΙΤΕΧΝΕΣ
Very High	VHF	8	30-300MHz	10m-1m	TV ΜΕΤΑΔΟΣΕΙΣ
Ultra High	UHF	9	300-3000MHz	1m-100mm	TV,ΚΙΝΗΤΑ,ΕΠΙΚ/ΝΙΕΣ ΑΕΡΟΣ-ΑΕΡΟΣ
Super High	SHF	10	3-30GHz *	100-10mm	ΡΑΝΤΑΡ, LAN
Extremely High	EHF	11	30-300GHz *	10mm-1mm	ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ

Πίνακας 4.1

IEEE	
ΖΩΝΗ	ΕΥΡΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
HF	3 to 30MHz
VHF	30 to 3MHz
UHF	0.3 to 1.0GHz
L	1 to 2GHz
S	2 to 4GHz
C	4 to 8GHz
X	8 to 12GHz
K_u	12 to 18GHz
K	18 to 26GHz
K_A	26 to 40GHz
V	40 to 75GHz
W	75 to 111GHz

Πίνακας 4.2

EU, NATO, US ECM.	
ΖΩΝΗ	ΕΥΡΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
A	0 to 0.25GHz
B	0.25 to 0.5GHZ
C	0.5 to 1.0GHz
D	1 to 2GHz
E	2 to 3GHz
F	3 to 4GHz
G	4 to 6GHz
H	6 to 8GHz
I	8 to 10GHz
J	10 to 20GHz
K	20 to 40GHz
L	40 to 60GHz
M	60 to 100GHz

Πίνακας 4.3

Οι συχνότητες που βρίσκουν εφαρμογή στις οπτικής επαφής ζεύξεις δεδομένων (Line-Of-Sight , LOS Data Links) ποικίλουν. Για την πραγματοποίησή τους δύναται να χρησιμοποιηθούν από Πολύ Υψηλές Συχνότητες (Very High Frequencies, VHF, 35 MHz) έως και τη C ζώνη (C band, 6 GHz). Στα πλαίσια των ερευνών, έχει παρατηρηθεί ότι οι συχνότητες της C ζώνης είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες στην πλειοψηφία των ΣΜΕΑ. Για μεταδόσεις προς το έδαφος (down-links) αξιοποιούνται οι χαμηλές συχνότητες της συγκεκριμένης ζώνης, μεταξύ 3,7 και 4,2 GHz, ενώ για μεταδόσεις προς αέρα (up-links) χρησιμοποιούνται οι συχνότητες μεταξύ 5,9 και 6,8 GHz [94]. Η C ζώνη είναι στρατηγικής σημασίας για LOS ζεύξεις εντολών και ελέγχου (Command and Control, C2), λόγω του ότι οι χαμηλές σε GHz συχνότητες επηρεάζονται λιγότερο σε περιπτώσεις δυσμενών καιρικών συνθηκών.

Σε ορισμένες περιπτώσεις MEA μικρού μεγέθους αξιοποιούνται συχνότητες της UHF (Ultra High Frequencies) ζώνης για LOS C2 ζεύξεις δεδομένων. Είναι δυνατόν επίσης, να αξιοποιούνται συχνότητες παραπλήσιες ή και ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια του αερομοντελισμού (72 MHz). Εκτός αυτών, δύναται να χρησιμοποιηθούν και μικροκυματικές συχνότητες για τη επίτευξη Κοινών Ζεύξεων Δεδομένων (Common Data Link, CDL). Ο συγκεκριμένος τύπος ζεύξεων είναι ανθεκτικός σε κακόβουλες παρεμβολές και χρησιμοποιείται μόνο για στρατιωτικούς σκοπούς, κυρίως για εκτός οπτικής επαφής (Beyond- Line-of-Sight, BLOS) αποστολές αλλά και για LOS, όταν απαιτείται διαρκής ασφάλεια και αδιάλειπτη επικοινωνία σε αποστολές εντός εχθρικού εδάφους [94].

Για τις BLOS C2 ζεύξεις, οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες κυμαίνονται από τις UHF (300 MHz) μέχρι αυτές τις Ku ζώνης (15 GHz). Οι πλέον αξιοποιήσιμες είναι αυτές που βασίζονται στη χρήση δορυφόρου και στην εκμετάλλευση της Ku ζώνης (Ku Band SATCOM). Το εύρος συχνοτήτων σε αυτή τη περίπτωση κυμαίνεται από τα 11,7 έως τα 12,7 GHz για μεταδόσεις προς το έδαφος και από τα 14 έως τα 14,5 GHz για μεταδόσεις προς αέρα [94]. Η ζώνη Ku χρησιμοποιείται κυρίως από ΣΜΕΑ υψηλών δυνατοτήτων ορισμένα εκ των οποίων αξιοποιούν της δορυφορικές ζεύξεις της εταιρείας INMARSAT με εύρη 1626,5-1660,5 MHz για μεταδόσεις προς αέρα και, 1525,5-1559 MHz για μεταδόσεις προς έδαφος . Όσον αφορά τις CDL ζεύξεις, αυτές δύνανται να πραγματοποιούνται είτε με συχνότητες της I ζώνης είτε με συχνότητες μεταξύ των 14,5 και 15,38 GHz, προκειμένου να αυξηθεί το διαθέσιμο εύρος [94]. ΣΜΕΑ μεσαίων ή χαμηλότερων δυνατοτήτων αξιοποιούν συχνότητες της L ζώνης για να πραγματοποιήσουν ζεύξεις δεδομένων που βασίζονται στο δορυφορικό δίκτυο IRIDIUM. Σε αυτή τη περίπτωση οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες καλύπτουν ένα εύρος από 390 MHz έως 1,55 GHz.

Η ανάγκη μετάδοσης δεδομένων με υψηλούς ρυθμούς στις περισσότερες περιπτώσεις αποστολών, καθιστά τις υψηλότερες ραδιοσυχνότητες ως τις μόνες ικανές για το σκοπό αυτό. Αντίτιμο αυτού του γεγονότος είναι η απαίτηση για μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής, για τήρηση άμεσης και αδιάλειπτης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη καθώς και για υψηλότερη εκμετάλλευση του φάσματος.

Υπεύθυνο για το καθορισμό της χρήσης του ραδιοφάσματος καθώς και των δορυφορικών τροχιών παγκοσμίως, είναι το Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοεπικοινωνιών (World Radiocommunication Conference, WRC) το οποίο οργανώνεται από την ITU ανά 2-3 χρόνια. Σκοπός του συνεδρίου είναι η αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων καθώς και ο διακανονισμός για την πρόσβαση σε αυτό διεθνώς, λαμβάνοντας υπόψη τις αυξανόμενες ανάγκες των ασύρματων επικοινωνιών που προκύπτουν από τις τεχνολογικές, βιομηχανικές, οικονομικές και άλλες εξελίξεις.

Καθώς η απαιτήσεις πρόσβασης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα για εμπορικούς, επιστημονικούς και άλλους σκοπούς αυξάνονται, το συγκεκριμένο συνέδριο παρακολουθείτε από παρόχους τηλεπικοινωνιών, τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών μεταδόσεων καθώς και από τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιακών εξοπλισμών. Παρακολουθείτε επίσης και από στρατιωτικές υπηρεσίες καθώς οι αμυντικές δυνατότητες είναι ιδιαίτερα εξαρτημένες από την μέριμνα για επάρκεια διαθέσιμων συχνοτήτων. Στα κράτη μέλη του NATO δίνεται η δυνατότητα υιοθέτησης κοινών θέσεων σε αντικείμενα της ημερήσιας διάταξης που επηρεάζουν τον στρατό, προκειμένου να προστατευθούν τα συμφέροντα της συμμαχίας επί της χρήσης του φάσματος συχνοτήτων για στρατιωτικούς σκοπούς. Το NATO επίσης συνεισφέρει στη κατάρτιση της Πολιτικής για το Τηλεπικοινωνιακό Φάσμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης από την άποψη της διατήρησης μίας ισορροπίας μεταξύ των εμπορικών και των στρατιωτικών απαιτήσεων για εκμετάλλευση του φάσματος συχνοτήτων. Σχετικά με τους διαχειριστές συχνοτήτων των αρχηγείων του NATO, αυτοί συμμετέχουν ενεργά στις εργασίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Ραδιοεπικοινωνιών (European Radiocommunication Committee, ERC) του Ευρωπαϊκού

Συνεδρίου των Ταχυδρομικών και Τηλεπικοινωνιακών Διοικήσεων (European Conference of Postal and Telecommunications Administration, CEPT) που είναι υπεύθυνο για το περιφερειακό συντονισμό του φάσματος στην Ευρώπη. Με τη συμμετοχή τους δύνανται να παρέχουν συμβουλές για τα ενδιαφέροντα του NATO επί της χρήσης του φάσματος για στρατιωτικούς σκοπούς.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι παρόλο που η κατανομή του φάσματος για ανθρωποκεντρικούς και στρατιωτικούς σκοπούς πραγματοποιείται από τις κατάλληλες αρχές σε διαφορετικές χώρες και με γνώμονα πάντα τον συντονισμό παγκοσμίως, υπάρχουν περιπτώσεις που οι απαιτούμενες συχνότητες για τον ίδιο ειδικό σκοπό διαφέρουν μεταξύ διαφορετικών χωρών. Το γεγονός αυτό δημιουργεί προβλήματα στη προμήθεια MEA από διαφορετικές χώρες και ο συγκεκριμένος λόγος επιβάλλει στους κατασκευαστές την εξασφάλιση των προϊόντων τους με τη δυνατότητα τροποποίησης των συχνοτήτων λειτουργίας.

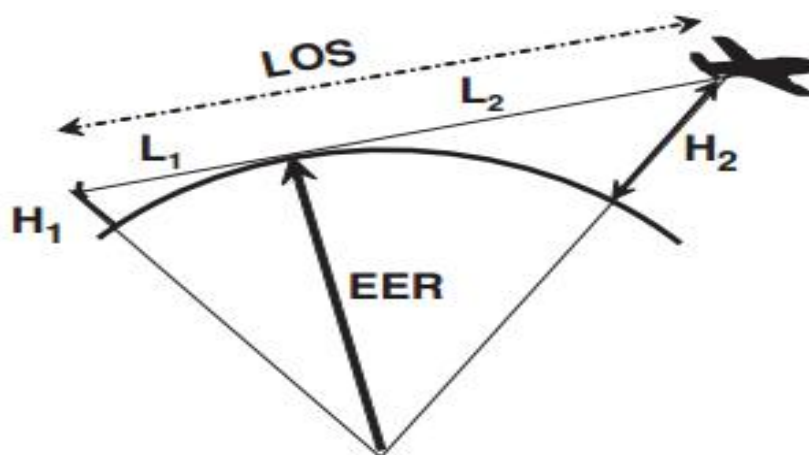
Όσον αφορά την επικοινωνία μεταξύ MEA και Επίγειου Σταθμού Ελέγχου, η αποτελεσματική απόσταση οπτικής επαφής υπολογίζεται με βάση την απλή γεωμετρία από τη παρακάτω σχέση :

$$\text{LOS Range} = \sqrt{(2 \times (\text{EER}) \times H_1) + H_1^2} + \sqrt{(2 \times (\text{EER}) \times H_2) + H_2^2} \quad \text{όπου,}$$

- H_1 και H_2 αποτελούν τα ύψη της κεραίας του Σταθμού και του MEA αντίστοιχα και,

- EER είναι η Αποτελεσματική Ακτίνα Γης.

Τα παραπάνω μεγέθη φαίνονται στο Σχήμα 4.2 :

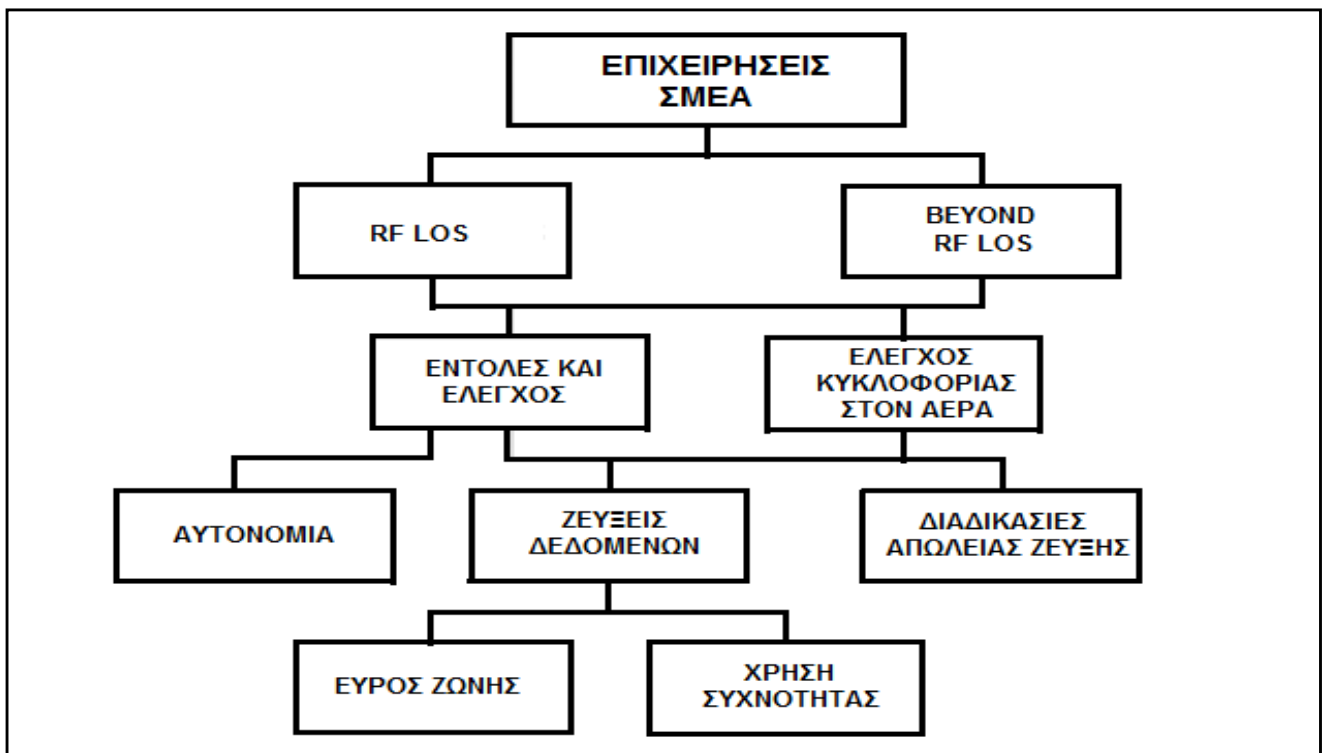


Σχήμα 4.2

Ενδεικτικά, για τη περίπτωση των μικροκυματικών ζεύξεων η EER συμπίπτει με τη πραγματική ακτίνα της Γης (6.400 Km περίπου) ενώ για τις ραδιοσυχνότητες η τιμή των 6.500 Km είναι μια ικανοποιητική προσέγγιση. Προκειμένου να επιτευχθεί μια απόσταση περίπου 600 Km, μέσω των υπολογισμών προκύπτει ότι το ΜΕΑ πρέπει να πετάει σε ύψος μεγαλύτερο των 20 Km. Για την επίτευξη ζεύξης σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις απαιτείται η ύπαρξη κάποιου ενδιάμεσου αναμεταδότη που δύναται να υλοποιηθεί από κάποιο γεωστατικό δορυφόρο ή από άλλο ΜΕΑ .

Προκειμένου να επιτευχθεί η οποιαδήποτε επιθυμητή ζεύξη και όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, προϋποτίθεται η ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ των προς ζεύξη μερών (within LOS) ή η ύπαρξη ενός " μεσάζοντα " ο οποίος θα αποτελέσει τον σύνδεσμο για τη μεταφορά πληροφορίας μεταξύ των μερών αυτών , όταν η μεταξύ τους απόσταση καθιστά την άμεση επικοινωνία αδύνατη (Beyond LOS). Στη περίπτωση των ΣΜΕΑ αυτός ο "μεσάζων " δύναται να είναι κάποιος γεωστατικός δορυφόρος ή κάποιο ΜΕΑ. Οι στρατιωτικές επιχειρήσεις της κατηγορίας BLOS διεξάγονται κυρίως μέσω δορυφόρου σε κρυπτογραφημένη ζώνη Ku στα 12 έως 18 GHz. Σημαντικό μειονέκτημα αυτής είναι η καθυστέρηση που προκύπτει από την μετάδοση εντολών προς το αεροσκάφος, μέχρι να ανταποκριθεί σε αυτές. Η καθυστέρηση προκύπτει λόγω της έμμεσης μετάδοσης των εντολών μέσω διαμεσολαβητών και της επεξεργασίας των σημάτων από αυτούς.

Με βάση αυτές τις δύο κατηγορίες ζεύξεων, η έρευνα σε θέματα εντολών, ελέγχου και επικοινωνιών (command, control, and communication , C3) για τα ΣΜΕΑ δύναται να μοντελοποιηθεί όπως στο Σχήμα 4.3 [4]:



Σχήμα 4.3

Σκοπός της συγκεκριμένης μοντελοποίησης είναι ο διαχωρισμός της παραπάνω έρευνας σε λογικές κατηγορίες. Για τις επιχειρήσεις των ΣΜΕΑ, το αερόχημα δύναται να βρίσκεται εντός ή εκτός LOS. Συνεπώς, οι τεχνολογίες και οι διαδικασίες χειρισμών που σχετίζονται με τις εντολές, τον έλεγχο και την επικοινωνία σε ένα ΣΜΕΑ χωρίζονται σε μία εξ αυτών των δύο κατηγοριών-περιπτώσεων.

Όπως γίνεται κατανοητό, η έρευνα επί θεμάτων επικοινωνίας μεταξύ ενός ΜΕΑ και επίγειων σταθμών, δορυφόρων ή άλλων ΜΕΑ καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική. Βασικό ρόλο σε αυτήν διαδραματίζει η ανάλυση της απόδοσης των επικοινωνιακών ζεύξεων που υλοποιούνται. Οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη βαρύτητα στον καθορισμό της απόδοσης είναι [95], [4]:

- ο ρυθμός δεδομένων (*data rate*) : αφορά την ποσότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων στον δίαυλο ανά δευτερόλεπτο και μετράται σε bytes ανά δευτερόλεπτο (Bytes per second, Bps).

- ο ρυθμός σφάλματος μεταδιδόμενου ψηφίου (*Bit Error Rate, BER*) : δεδομένου ότι οι ασύρματες ζεύξεις των ΜΕΑ είναι κυρίως ψηφιακού χαρακτήρα, ο BER αφορά το ποσοστό των δυαδικών ψηφίων που λαμβάνονται από το δέκτη με λανθασμένη τιμή. Κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει το μέγεθός του είναι ο θόρυβος. Άλλοι παράγοντες είναι οι αποσβέσεις, η ολίσθηση φάσης και η ολίσθηση συχνότητας.

- το εύρος ζώνης (*bandwidth*) : είναι η διαφορά της μεγαλύτερης από τη μικρότερη χρησιμοποιούμενη συχνότητα για την υλοποίηση των ζεύξεων.

- η περιοχή κάλυψης : αναφέρεται στη γεωγραφική περιοχή εντός της οποίας είναι εφικτή η ζεύξη πομπού-δέκτη και στη πιθανότητα του δέκτη να βρίσκεται σε κατάλληλη θέση ώστε το λαμβανόμενο σήμα να έχει επιθυμητή τιμή ισχύος.

Για την εκτίμηση των συγκεκριμένων παραμέτρων απαιτείται η λεπτομερής ανάλυση του τηλεπικοινωνιακού διαύλου και των εξασθενήσεων που επηρεάζουν το μεταδιδόμενο σήμα. Στη περίπτωση των ΜΕΑ οι κυριότεροι παράγοντες εξασθένησης είναι οι κάτωθι [95]:

- ο θόρυβος : προκύπτει όταν στο σήμα πληροφορίας υπερτίθενται άλλα τυχαία σήματα τηλεπικοινωνιακών σκοπών. Για την μελέτη της επίδρασής του στις διάφορες εφαρμογές που βασίζονται στον ασύρματο δίαυλο επικοινωνίας, δύναται να μοντελοποιείται ως Προσθετικός Λευκός Θόρυβος Γκαουσιανής Κατανομής (Additive White Gaussian Noise, AWGN), παρέχοντας την δυνατότητα απλοποίησης των υπολογισμών.

• η ολίσθηση φάσης της φέρουσας συχνότητας (λόγω φαινομένου Doppler): πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο οφείλεται στη σχετική κίνηση μεταξύ του εκάστοτε πομπού και δέκτη η οποία προκύπτει όταν το ΜΕΑ προσεγγίζει ή απομακρύνεται από κάποιον επίγειο ή μη, σταθμό. Η ολίσθηση φάσης του μεταδιδόμενου σήματος δίνεται από τη σχέση :

$$F_d = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos\theta \quad \text{όπου,}$$

v η ταχύτητα της προσέγγισης ή της απομάκρυνση, λ το μήκος του φέροντος κύματος και θ , η γωνία μετατόπισης.

• οι διαλείψεις : προκύπτουν εξαιτίας της μετάδοσης του σήματος κατά πολυ-διαδρομικό τρόπο. Το συγκεκριμένο φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι το περιβάλλον εντός του οποίου επιχειρεί ένα ΣΜΕΑ χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διαφόρων τεχνητών ή φυσικών εμποδίων όπως βουνά και κτίρια, σε τυχαίες θέσεις. Αυτά δύνανται να προκαλέσουν μεταβολές στα φυσικά χαρακτηριστικά του σήματος, επιβάλλοντας διαφορετικές εξασθενίσεις και αλλαγές στη φάση του φασματικού περιεχομένου αυτού. Κατά συνέπεια, τα τυχαία χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος καθιστούν αναγκαία τη μοντελοποίηση του διαύλου με τη βοήθεια στατιστικών προσεγγίσεων.

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που επιδρά κατά την μετάδοση σημάτων μεταξύ των αλληλεπιδρώντων στοιχείων ενός ΣΜΕΑ και που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό αυτών, είναι οι αποσβέσεις των μεταδιδόμενων σημάτων λόγω απορρόφηση μέρους της ενέργειας από διάφορα μόρια της ατμόσφαιρας καθώς και λόγω βροχοπτώσεων [95], [1] . Τα πλέον επιδραστικά μόρια είναι αυτά των υδρατμών και του οξυγόνου. Για συχνότητες έως και 15 GHz η απορρόφηση είναι πολύ μικρή (τυπικά λιγότερη από 3 dB για απόσταση μετάδοσης 100 χιλιομέτρων). Για μεγαλύτερες συχνότητες όμως, η ατμοσφαιρική απορρόφηση καθίσταται σημαντική. Ειδικά για συχνότητες μεταξύ 95 και 120 GHz η απορρόφηση αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα για το μέγεθος των ζεύξεων ανταλλαγής δεδομένων και επιβάλλει την ανάγκη χρησιμοποίησης συχνοτήτων έξω από το συγκεκριμένο εύρος.

Οι απώλειες λόγω βροχοπτώσεων αφορούν συχνότητες πάνω από περίπου 7-10GHz για τις οποίες δύνανται να καταστούν ιδιαίτερα σημαντικές. Κάτω των 7GHz, οι απώλειες λαμβάνουν τιμή κάτω του 1 dB για όλες τις εφαρμογές των ασυρμάτων ζεύξεων, ακόμα και σε περιπτώσεις σφοδρών βροχοπτώσεων. Γενικότερα, η τιμή τους εξαρτάται από την εκάστοτε συχνότητα αλλά και από τη γωνία ανύψωσης της δέσμης ακτινοβολίας, με τις υψηλότερες τιμές αυτής να έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερες απώλειες. Μια τυπική ζεύξη δεδομένων στα πλαίσια ενός ΣΜΕΑ χαρακτηρίζεται συνήθως από χαμηλή γωνία ανύψωσης όταν επιχειρεί σε μεγάλη απόσταση από τον Επίγειο Σταθμού Ελέγχου εξαιτίας του γεγονότος ότι απαιτείται η παραμονή του ΜΕΑ κάτω από τα σύννεφα της βροχής για ένα μεγάλο τμήμα της διαδρομής του.

Κάτω από συνθήκες ισχυρής βροχόπτωσης (της τάξης των 12.5 mm/ ώρα) οι απώλειες στα 15 GHz δύναται να ανέλθουν στα 100 dB για αποστάσεις περί των 50 km ενώ για τις ίδιες συνθήκες οι απώλειες στα 10 GHz λαμβάνουν τιμές άνω των 30 dB. Για την ίδια απόσταση και σε περιπτώσεις ασθενούς βροχόπτωσης (2.5 mm/ ώρα), οι απώλειες στα 15 GHz είναι τις τάξης των 6 dB.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η συγκεκριμένη κατηγορία απωλειών θεωρείται σημαντική για τις περιπτώσεις επιχειρήσεων των ΣΜΕΑ σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από μεγάλη πιθανότητα βροχοπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτές αποτελούν ιδιαίτερα επιδραστικό παράγοντα στην εκτέλεση αποστολών . Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να δίνεται και η ανάλογη βαρύτητα σε αυτές κατά την σχεδίαση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων των αντίστοιχων ΣΜΕΑ.

Γενικά, η επιτυχής λειτουργία των εν λόγω τηλεπικοινωνιακών συστημάτων εξαρτάται από την ολοκλήρωση των ποικίλων στοιχείων που τα συνθέτουν έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η παροχή επαρκούς ισχύος για την επίτευξη της εκάστοτε ραδιο-ζεύξης και στην επιθυμητή απόσταση που επιβάλουν οι εκάστοτε αποστολές. Για το λόγο αυτό, κατά τη σχεδίαση των συγκεκριμένων συστημάτων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράγοντες ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για την επίτευξη των επιδιωκόμενων στόχων [4]:

- *η ισχύς εξόδου του πομπού και η ευαισθησία του δέκτη* : απώλειες ισχύος δύναται να προκύπτουν κατά την ατελή θωράκιση των ομοαξονικών καλωδίων και την ατελή σύνδεση των γραμμών που μεταφέρουν την μεταδιδόμενη από και προς την κεραία ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

- *οι απώλειες διαδρομής* : αφορούν τις απώλειες ισχύος κατά τη διάδοση του σήματος μεταξύ πομπού και δέκτη. Κατά τον υπολογισμό τους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η απόσταση, οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες (καθώς υψηλότερη τιμή αυτών συνεπάγεται και μεγαλύτερες απώλειες) και τέλος, τα ύψη των κεραιών πομπού και δέκτη όταν αυτοί βρίσκονται κοντά στο έδαφος.

- *το κέρδος κεραίας* : οι κεραίες δύναται να σχεδιάζονται κατά τρόπο που να επιτρέπεται η εκπομπή ενέργειας με αποδοτικό κέρδος και ιδιαίτερα κατευθυντικό τρόπο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη απόσταση μετάδοσης για δεδομένη τιμή ισχύος.

Σημαντικό ρόλο στην επίτευξη ικανοποιητικών ζεύξεων κατά τις εφαρμογές των ΣΜΕΑ καταλαμβάνει η κεραία , τόσο ως δομικό στοιχείο του πομπού όσο και του δέκτη. Μία κεραία, εκτός των άλλων, θα πρέπει να διαθέτει την ικανότητα κίνησης για σάρωση

τόσο κατά διεύθυνση όσο και καθ' ύψος ώστε να διατηρείται η φυσιογνωμία της οπτικής επαφής των επικοινωνούντων μερών κατά άμεσο ή έμμεσο (με τη βοήθεια κάποιου “ μεσάζοντος ”) τρόπο. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι κεραιών που χρησιμοποιούνται στα ΣΜΕΑ είναι οι εξής [1],[4]:

- *κάθετη κεραία 1/4 του μήκους κύματος ($\lambda/4$)* : είναι κάθετα πολωμένη και προϋποθέτει ότι και η αντίστοιχη κεραία του έτερου μέλους της ζεύξης θα είναι πολωμένη κατά όμοιο τρόπο διαφορετικά θα προκύψει σημαντική απώλεια ισχύος του μεταδιδόμενου. Ο συγκεκριμένος τύπος είναι ομοιοκατευθυντικός, δηλαδή εκπέμπει ισοδύναμα προς όλες τις κατευθύνσεις και κατά συνέπεια η ακτινοβολούμενη ισχύς μειώνεται ραγδαία καθώς αυξάνεται η απόσταση. Η χρήση τους στα ΣΜΕΑ περιορίζεται σε επιχειρήσεις τοπικής εκτόξευσης και ανάκτησης κατά τις οποίες υπάρχει ελάχιστος κίνδυνος εχθρικών παρεμβολών.

- *κεραία Yagi-Uda* : αυτός ο τύπος λειτουργεί γενικώς σε ένα πεδίο συχνοτήτων από 500 MHz έως 2 GHz . Περιλαμβάνει ένα ενεργό δίπολο που υποστηρίζεται από έναν αριθμό παθητικών ανακλαστικών και κατευθυντικών στοιχείων τα οποία τροποποιούν το βασικό διάγραμμα ακτινοβολίας ώστε να λάβει κυρίως κατευθυντικό χαρακτήρα, ελαχιστοποιώντας τους πλευρικούς λοβούς . Οι λοβοί αυτοί αποτελούν την καταλληλότερη δίοδο για τη διείσδυση παρεμβολών στο εκάστοτε σύστημα επικοινωνίας και επομένως η ελαχιστοποίηση του μεγέθους τους είναι ιδιαίτερης σημασίας κατά την εκτέλεση αποστολών.

- *κεραία παραβολικού πιάτου* : περιλαμβάνει μια σημειακή πηγή η εκπεμπόμενη ισχύς της οποίας ανακλάται από μια παραβολική επιφάνεια (πιάτο). Για δεδομένη συχνότητα και μεταβάλλοντας τη διάμετρο της επιφάνειας, το μέγεθος της ακτινοβολούμενης δέσμης δύναται να λάβει ποικίλες τιμές. Αυτός ο τύπος είναι πρακτικός για χρήση στα ΣΜΕΑ μόνο για ζεύξεις μικροκυματικών συχνοτήτων. Στη περίπτωση χαμηλότερων συχνοτήτων η διάμετρος του πιάτου λαμβάνει απαγορευτικά μεγάλες τιμές.

- *κεραία τύπου φακού* : βασίζεται στις ίδιες αρχές λειτουργίας με αυτές των οπτικών φακών. Χρησιμοποιούνται στα ΣΜΕΑ για συχνότητες άνω το 10 Ghz

Οι κεραιές των ΜΕΑ αποτελούν σημαντικό ζήτημα στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται σχετικά υψηλές συχνότητες και που αυτές χαρακτηρίζονται από μεσαία τιμή κέρδους, προκειμένου να επιτευχθεί ακόμα πιο μεγάλη απόσταση μετάδοσης και υψηλότερο κέρδος Αντι- Παρεμβολών (Anti – Jam).

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι κεραίες με δυνατότητα κίνησης πρέπει να προεξέχουν από το από την άτρακτο του MEA. Το γεγονός αυτό τις καθιστά πιο ευάλωτες στον κίνδυνο καταστροφής τους από διάφορους παράγοντες. Τέλος, η χρήση δύο ή περισσότερων κεραιών, τοποθετημένων σε διάφορες θέσεις του MEA, εξασφαλίζει πλήρη κάλυψη καθ' όλες τις πιθανές κινήσεις του αεροχήματος και κατ' επέκταση, ικανοποιητική ποιότητα ζεύξεων.

Ωστόσο, η επιδίωξη αποτελεσματικών ζεύξεων στα ΣΜΕΑ τα καθιστά ευάλωτα και μειώνει την αποτελεσματικότητά τους στην εκτέλεση αποστολών κατά δύο τρόπους. Ο ένας αφορά την δυνατότητα εντοπισμού του μεταδιδόμενου σήματος μεταξύ των στοιχείων του ΣΜΕΑ από τα εχθρικά μέσα. Αυτό έχει ως συνέπεια αφενός την προειδοποίηση του εχθρού και την απώλεια του στοιχείου του αιφνιδιασμού και αφετέρου την ανάπτυξη εχθρικών αντιμέτρων και την έκθεση των μερών του ΣΜΕΑ στο κίνδυνο καταστροφής τους. Ο άλλος τρόπος αφορά τις σκόπιμες και κακοπροαίρετες ή τις τυχαίες παρεμβολές των μεταδιδόμενων σημάτων μεταξύ του MEA και του Επίγειου Σταθμού Ελέγχου ή άλλων επίγειων σταθμών ή μεταξύ αυτού και άλλων αεροχημάτων.

Μεγαλύτερο κίνδυνο διατρέχουν οι down-link μεταδόσεις καθώς και αυτές μεταξύ MEA και δορυφόρων ή άλλων αεροχημάτων. Οι up-link μεταδόσεις προς αέρα είναι λιγότερο ευάλωτες αλλά αυτό παύει να ισχύει στη περίπτωση περιπολίας της εκάστοτε περιοχής από εξεζητημένα αεροπορικά ανιχνευτικά συστήματα του εχθρού. Οι κίνδυνοι της πρώτης περίπτωσης δύναται να μειωθούν είτε με τη χρήση πολύ στενών δεσμών εκπομπής είτε με την εξασφάλιση αυτοματοποίησης ή αυτονομίας των MEA ώστε η ανάγκη για επικοινωνία να περιορίζονται στον ελάχιστο δυνατό βαθμό και κατ' επέκταση, να μειώνεται η πιθανότητα έκθεσης στα εχθρικά μέσα ανίχνευσης ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών.

Για τη δεύτερη περίπτωση, ο περιορισμός των κινδύνων επιδιώκεται με ένα από τα εξής μέτρα Αντι-Παρεμβολών (anti-jam measures, AJ) [1],[4]:

- *υψηλή ισχύς πομπού* : εφαρμόζεται κυρίως για τις down-link επικοινωνίες έτσι ώστε το επίδοξα αεροπορικά συστήματα παρεμβολών να απαιτούν μεγάλα ποσά ισχύος για να μπορέσουν να επηρεάσουν την επιδιωκόμενη ζεύξη, κάτι το οποίο είναι σπάνια εφικτό.

- *υψηλό κατευθυντικό κέρδος κεραίας και στενό εύρος δέσμης* : για τις LOS ζεύξεις υψηλών συχνοτήτων η διαθέσιμη ισχύς του πομπού δύναται να συγκεντρωθεί σε μια πολύ στενή δέσμη με τη χρήση κατάλληλης κεραίας η οποία θα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα καθοδήγησής της ώστε να διατηρείται προσανατολισμένη προς το δέκτη.

• *κέρδος επεξεργασίας (processing gain, PG)* : επιτυγχάνεται με την κωδικοποίηση του σήματος πληροφορίας κατά τρόπο ώστε να αυξάνεται το πριν-τη-μετάδοση εύρος. PG προκύπτει από το λόγο του εύρους σήματος που τελικά μεταδίδεται προς το εύρος του σήματος πληροφορίας και μετράται σε dB. Γενικά, οι μεγάλων αποστάσεων και χαμηλότερων συχνοτήτων ομοιο-κατευθυντικές ζεύξεις μη-LOS χαρακτήρα είναι πιο ευάλωτες στο κίνδυνο των παρεμβολών λόγω της αφθονίας των διαδρομών προσβολής από τον παρεμβολέα. Ο συγκεκριμένος τρόπος αντιμετώπισης είναι ο καταλληλότερος για τη συγκεκριμένη περίπτωση ζεύξεων και περιλαμβάνει την έννοια της αναπήδησης συχνότητας (frequency hopping) η οποία αφορά την τυχαία μεταβολή της χρησιμοποιούμενης συχνότητας ανά σύντομα χρονικά διαστήματα. Κατά συνέπεια το μεταδιδόμενο σήμα καθίσταται λιγότερο ευάλωτο σε παρεμβολές ή άλλες απειλές. Εναλλακτική μέθοδος της αναπήδησης συχνότητας είναι αυτή της “ αναπήδησης της ζώνης συχνοτήτων (band jumping) κατά την οποία μεταβάλλεται η χρησιμοποιούμενη ζώνη (π.χ. μετάπτωση από την UHF στην S ζώνη) για σύντομο χρονικό διάστημα ή όταν διαπιστώνεται απειλή παρεμβολής. Μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η απαίτηση ύπαρξης δύο παράλληλων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με ξεχωριστές κεραίες.

Οι δύο προαναφερθείσες τεχνικές είναι μέρη ενός ευρύτερου συνόλου τεχνικών που ονομάζεται διάχυση φάσματος (spread spectrum) του σήματος. Αναφέρεται στη διαδικασία με τις οποίες το φασματικό περιεχόμενο του μεταδιδόμενου σήματος “απλώνεται ” σε ένα εύρος συχνοτήτων το οποίο “ εμπλουτίζεται ” με σήματα θορυβώδους χαρακτήρα . Ο αντίστοιχος φίλιος δέκτης, σε αντίθεση με οποιονδήποτε άλλον εχθρικό, δύναται να γνωρίζει τους τρόπους κατανομής του θορύβου και κατ’ επέκταση, να εξαγάγει το αυθεντικό σήμα[1],[4]. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από τις δυνατότητες που εξασφαλίζονται με τη διάχυση του φάσματος μεταδιδόμενων σημάτων :

- Απόρριψη παρεμβολών (anti-jamming).
- Προστασία από υποκλοπές.
- Πολυπλεξία σημάτων με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiplexing).
- Επιλογή αποδέκτη.
- Ακρίβεια κατά τον υπολογισμό χρονικής καθυστέρησης.

Σημαντικό μειονέκτημα της διάχυσης του φάσματος είναι η πολυπλοκότητα των συστημάτων που συνεπάγεται αυτή η μέθοδος καθώς και το μεγάλο εύρος ζώνης που απαιτείται συναρτήσει των περιορισμών που επιβάλλονται στη χρήση του φάσματος.

Εκτός των κακόβουλων ή μη παρεμβολών, άλλες απειλές που πιθανόν να προκύψουν από την υλοποίηση ασύρματων ζεύξεων των ΣΜΕΑ στο θέατρο των επιχειρήσεων και έναντι των οποίων επιβάλλεται η εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής προστασίας, είναι οι παρακάτω [1]:

- Ο εντοπισμός (λόγω της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας) και κατ' επέκταση, η κατάδειξη και η προσβολή της θέσης των τμημάτων που συνθέτουν το ΣΜΕΑ από το εχθρικό πυροβολικό ή από εξειδικευμένους πυραύλους που στοχεύουν κατά πομπών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Anti-Radiation Missiles, ARMs).

- Η υποκλοπή και εκμετάλλευση των μεταδιδόμενων πληροφοριών.

- Η παραπλάνηση .

Γενικότερα, και σε συνάρτηση με τις απειλές ενός ΣΜΕΑ, οι ασύρματες ζεύξεις για την ανταλλαγή δεδομένων στα πλαίσια των λειτουργιών του, θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από τις εξής ιδιότητες:

- *ευρεία δυνατότητα πρόσβασης στη κατανομή / διάθεση των συχνοτήτων* : αφορά την ελευθερία χρήσης του φάσματος συχνοτήτων για λειτουργία σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος τόσο σε ειρηνικές περιόδους όσο και σε πολεμικές.

- *αντίσταση σε ακούσιες παρεμβολές* : τα τηλεπικοινωνιακά υποσυστήματα ΣΜΕΑ πρέπει να επιχειρούν με επιτυχία επιδεικνύοντας την απαραίτητη ανθεκτικότητα σε τυχαίες ηλεκτρομαγνητικές προσβολές από γειτονικές συσκευές που βασίζονται σε ραδιοσυχνότητες .

- *μειωμένη πιθανότητα υποκλοπής* : το ΣΜΕΑ πρέπει να ασφαρίζεται από υποκλοπές όταν επιχειρεί σε περιοχές και τοποθεσίες που είναι διαθέσιμες σε εχθρικές δυνάμεις.

- *ασφάλεια* : πρέπει να εξασφαλίζεται η ακατάληπτη διατήρηση της σε περίπτωση υποκλοπής, υιοθετώντας αποτελεσματικές κωδικοποιήσεις των μεταδιδόμενων σημάτων.

- *αντίσταση σε εξαπάτηση* : αφορά την δυνατότητα καταστολής της εχθρικής προσπάθειας για αποστολή εντολών προς το MEA ή ψευδών πληροφοριών στους σε επίγειους σταθμούς.

- *προστασία από πυραύλους που στοχεύουν κατά πομπών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Anti-ARM)* : αφορά τη δυσκολία προσβολής από τα συγκεκριμένα οπτικά συστήματα αλλά και τη ελαχιστοποίηση της καταστροφής σε περίπτωση εμπλοκής με αυτά.

- *προστασία από εχθρικές παρεμβολές (Anti-Jam)* : αφορά την εξασφάλιση της επιτυχούς λειτουργίας παρά τις κακόβουλες εχθρικές επιθέσεις παρεμβολής των από και προς γη ζεύξεων.

Εφόσον η υλοποίηση των ασύρματων ζεύξεων αποτελεί στοιχείο ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία των ΣΜΕΑ, οποιαδήποτε σύντομη ή μακρόχρονη διακοπή αυτών κατά τη διάρκεια μιας αποστολής θα ήταν ολέθρια για τη εκπλήρωσή της. Οι λόγοι που δύνανται να την προκαλέσουν είναι οι κάτωθι [4]:

- αποτυχία ολόκληρου του τηλεπικοινωνιακού συστήματος ή μέρος αυτού εξαιτίας έλλειψης σταθερότητας.

- απώλεια οπτικής επαφής (Line- Of-Sight , LOS) εξαιτίας των γεωγραφικών χαρακτηριστικών που παγιδεύουν το σήμα.

- μη ικανοποιητική τιμή λαμβανόμενης ισχύος εξαιτίας μεγάλης απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη.

- σκόπιμη ή τυχαία παρεμβολή των σημάτων.

Στις υποενότητες που θα ακολουθήσουν, περιγράφεται η εφαρμογή της έννοιας των ζεύξεων στις επιμέρους βασικές λειτουργίες των ΣΜΕΑ

4.5.1 Ασύρματες ζεύξεις για χειρισμό και πλοήγηση των MEA.

Όπως έχει αναφερθεί, βασικό δομικό στοιχείο ενός MEA είναι το αερόχημα, δηλαδή η πτητική μηχανή που μεταφέρει όλα τα υπόλοιπα πολύπλοκα υποσυστήματα που μαζί με αυτό, συνθέτουν την ευρύτερη έννοια ενός MEA. Η συγκεκριμένη “μηχανή” περιλαμβάνει τα δικά της συνθετικά στοιχεία (μηχανικής, ηλεκτρικής, ηλεκτρονικής και ηλεκτρομηχανικής φύσης) όπως ο κινητήρας/ες (περιστροφικής ή προωθητικής λειτουργίας), οι πτέρυγες (κινητές ή σταθερές), σερβομηχανισμοί και άλλα, τα οποία παρέχουν σε αυτήν την δυνατότητα ανύψωσης, αιώρησης ή πτήσης σε συγκεκριμένες πορείες και προσγείωσης.

Προκειμένου να καταστεί εφικτός ο εξ αποστάσεως χειρισμός του αεροχήματος απαιτείται προφανώς ο αντίστοιχος έλεγχος των δομικών μερών του. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται χάρη στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών συστημάτων με “τηλεπικοινωνιακό” χαρακτήρα καθώς και σε διάφορα υπολογιστικά και λογισμικά συστήματα, συνήθως βασιζόμενα στις C ή C++ γλώσσες [96]. Ο εξοπλισμός που απαρτίζεται από όλα αυτά συνιστά στην ουσία, τον πιλότο του MEA. “Εγκέφαλος” αυτού του πιλότου στις περισσότερες των περιπτώσεων, είναι ο Επίγειος Σταθμός Ελέγχου ο οποίος και εκπέμπει ασύρματα τις εκάστοτε εντολές πλοήγησης.

Σημαντικός παράγοντας στον έλεγχο πτήσης του MEA είναι η συνεχής γνώση της θέσης του μέσα στο εναέριο χώρο του θεάτρου επιχειρήσεων. Βασικό στοιχείο για τον υπολογισμό αυτής είναι το παγκόσμιο σύστημα καθορισμού θέσης (Global Positioning System, GPS) με το οποίο δύναται να υπολογιστούν οι συντεταγμένες και η ταχύτητά του σε σχέση με τη γη, μέσω δορυφορικών ζεύξεων. Η ιδέα ενεργείας αυτής της μεθόδου, η οποία αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Αμύνης των ΗΠΑ (United States’ Department of Defence) [4], βασίζεται στην ανάπτυξη και χρήση της δορυφορικής τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των ταυτόχρονων μετρήσεων από τρεις δορυφόρους των οποίων η θέση είναι γνωστή εκ των προτέρων, καθίσταται εφικτός ο καθορισμός της θέσης ενός GPS δέκτη που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης. Αν συμπεριληφθούν και οι μετρήσεις ενός τέταρτου δορυφόρου, δύναται να υπολογιστεί και το ύψος του δέκτη. Η ακρίβεια του υπολογισμού θέσης μέσω του συστήματος GPS για στρατιωτικές εφαρμογές κυμαίνεται από 5 έως 15 m ενώ για λοιπές εφαρμογές μη στρατιωτικού χαρακτήρα, αυτή υπολογίζεται περίπου στα 100 m.

Για την αύξηση της ακρίβειας δύναται να χρησιμοποιηθεί το Διαφορικό GPS σύστημα (Differential Global Positioning System, DGPS). Σε αυτή την περίπτωση προϋποτίθεται η ύπαρξη περισσότερων συμπληρωματικών επίγειων σταθμών αναφοράς σε γνωστές θέσεις οι οποίοι εκπέμπουν την διαφορά μεταξύ των θέσεων που καταδεικνύονται από τους δορυφόρους και της δικής τους θέσης. Η ακρίβεια του DGPS συστήματος μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ του GPS δέκτη του MEA και του Επίγειου Σταθμού Ελέγχου του ή των σταθμών αναφοράς. Υπολογισμοί έχουν δείξει ότι η μείωση ανέρχεται σε 0,2 m ανά 100 km.

Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται από το συγκεκριμένο σύστημα ανήκουν στην L ζώνη, περίπου μεταξύ των 1,1 και 1,6 **GHz** [4]. Τα GPS σήματα για στρατιωτικούς σκοπούς διαμορφώνονται κατά τρόπο που να εξασφαλίζει και το στοιχείο της κρυπτογράφησης. Τα σήματα αυτά μεταδίδονται από τους δορυφόρους κατά ευθύ τρόπο διάχυσης φάσματος (spread-spectrum) ο οποίος τα καθιστά ανθεκτικά σε τυχαίες ή κακοπροαίρετες παρεμβολές καθώς και σε επιθέσεις “πλαστογράφησης” ψευδών θέσεων (GPS spoofing attacks) [1]. Δυστυχώς όμως η πιθανότητα προσβολής των δορυφόρων από εχθρικά μέσα καθιστά το συγκεκριμένο σύστημα ως μη 100% ασφαλές σύστημα για την πλοήγηση του αεροχήματος.

Εκτός της χρήσης του προηγούμενου συστήματος για την πλοήγηση των MEA, άλλα συστήματα που δύνανται να χρησιμοποιηθούν είναι τα λεγόμενα αδρανειακά (Inertial Navigation Systems, INS) [4]. Σε αντίθεση με τα GPS, τα συγκεκριμένα δεν απαιτούν εξωτερικά σήματα ως εισόδους. Πρόκειται για εξεζητημένα συστήματα “στίγματος από αναμέτρηση” (Dead Reckoning) που περιλαμβάνουν αισθητήρια όργανα κίνησης όπως επιταχυνσιόμετρα και γυροσκοπικά υπό-συστήματα καθώς και ειδικούς ψηφιακούς μικροελεγκτές επεξεργασία σήματος που καλούνται αυτόματοι πιλότοι ή υπολογιστές με συντελεστές PC/104 ή MicroPC χαρακτήρα[4], [96]. Τα στοιχεία αυτά εκμεταλλεύονται τα δεδομένα που προκύπτουν από το ίδιο το MEA προκειμένου να υπολογίσουν την θέση και τον προσανατολισμό του αεροχήματος στο χώρο, με βάση κάποιο αρχικό σύνολο συντεταγμένων και τις στιγμιαίες μετρήσεις ταχύτητας, επιτάχυνσης και κατεύθυνσης.

Για τις περιπτώσεις επιχειρήσεων με εύρος 80 έως 100 km μια άλλη μέθοδος πλοήγησης είναι αυτή που βασίζεται στην ανίχνευση του MEA με τη χρήση ραδιοσυχνοτήτων (Radio Tracking) [4]. Αυτή προϋποθέτει την εγκατάσταση ενός αναμεταδότη στο αερόχημα, προκειμένου να επιτυγχάνεται η λήψη, η ενίσχυση και η επανεκπομπή των σήματος ανίχνευσης που μεταδίδεται από τον εκάστοτε σταθμό ελέγχου. Για τον ίδιο σκοπό δύνανται να υλοποιείται η εκπομπή κατάλληλου σήματος παλμικής μορφής από το MEA προς τον αντίστοιχο επίγειο σταθμό. Προϋποτίθεται όμως ότι ο εκάστοτε ανιχνευτικός σταθμός θα διαθέτει δύο αντισταθμιστικές κατευθυντικές κεραίες, παράλληλα τοποθετημένες οι οποίες θα λαμβάνουν τα αναμεταδιδόμενα σήματα του MEA. Αυτά στη συνέχεια υπόκεινται σε επεξεργασία από ανάλογο σύστημα το οποίο διαπιστώνει αν βρίσκονται ή όχι σε φάση. Στη περίπτωση διαφοράς φάσης μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων, δίνεται εντολή για κίνηση των κεραιών προκειμένου να καταστούν συμφασικά. Με αυτό τον τρόπο οι κεραίες επιτρέπουν στον σταθμό να “ κλειδώσει ” στο αερόχημα κατά αζιμουθιακό τρόπο και να μεταδώσει προς αυτό τη συγκεκριμένη πληροφορία για τη θέση του. Επίσης, κατά τη διάρκεια των ζεύξεων ανταλλάσσονται χρονικά σήματα μεταξύ σταθμού και MEA από τα οποία προκύπτει, με τη χρήση κατάλληλου υπολογιστή, η μεταξύ τους απόστασή.

Σε περίπτωση διακοπής της ζεύξης, τόσο ο Σταθμός ελέγχου όσο και το ΜΕΑ θα πρέπει αν έχουν την δυνατότητα επανεύρεσης του σήματος προκειμένου αυτή να αποκαθίσταται. Ορισμένα ΜΕΑ δύνανται να επιστρέφουν στη “ γειτονιά ” του σταθμού με τη βοήθεια απλοποιημένων αδρανειακών συστημάτων.

Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται ειδικά σε περιπτώσεις αφ’ υψηλού παρατήρησης του πεδίου της μάχης καθώς και για εδαφικές επιθέσεις. Κατά τη διάρκεια αυτών η οπτική επαφή μεταξύ σταθμού και αεροχήματος δύναται και πρέπει να διατηρείται κατά αδιάλειπτο τρόπο.

Χάριν των παραπάνω τεχνικών, η κίνηση ενός ΜΕΑ που δεν χαρακτηρίζεται από την έννοια της αυτονομίας προς οποιοδήποτε σημείο εντός του διαθέσιμου εύρους , δύναται υλοποιηθεί με έναν εκ των παρακάτω τρόπων ή με συνδυασμό αυτών [4] :

- Με άμεσο έλεγχο μέσω του χειριστηρίου του Σταθμού Ελέγχου προκειμένου να αποστέλλονται απευθείας εντολές για την ταχύτητα πτήσης, το ύψος και την κατεύθυνση του αεροχήματος, με ταυτόχρονη παρακολούθηση της πορείας του μέσω τον οπτικό-ηλεκτρικών συστημάτων αυτού σε συνδυασμό με τη χρήση γεωγραφικού χάρτη.
- Με αποστολή εντολών-δεδομένων για πτήση με προκαθορισμένο προσανατολισμό, ταχύτητα και ύψος, μέχρι να αποσταλούν νέες εντολές.
- Με αποστολή των συντεταγμένων των σημείων από τα οποία πρέπει να διέλθει το ΜΕΑ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο τελευταίες διαδικασίες επιτρέπουν την διακοπή της ραδιοζεύξης για κάποιο χρονικό διάστημα, γεγονός που μειώνει αρκετά τον κίνδυνο έκθεσης του ΜΕΑ στα εχθρικά μέσα ανίχνευσης.

Όσον αφορά τον τρόπο επικοινωνίας των στοιχείων ενός ΣΜΕΑ, αυτός δύναται να είναι αναλογικού ή ψηφιακού χαρακτήρα. Σήμερα υπάρχουν περιπτώσεις αναλογικών επικοινωνιών, βασιζόμενες σε συχνότητες 35 ή 40 Mhz οι οποίες όμως μειώνονται όλο και περισσότερο. Από την άποψη δε, των ad hoc δικτύων που ενδεχομένως να αναπτυχθούν μεταξύ περισσότερων του ενός ΜΕΑ, καθώς το αναλογικό σήμα επαναμεταδίδεται, η διατήρηση της φυσιογνωμίας του σήματος πληροφορίας καθίσταται δύσκολη. Αυτό οφείλεται στο θόρυβο που εισάγει ο κάθε κόμβος του εκάστοτε δικτύου [96]. Κατά συνέπεια, οι αναλογικές επικοινωνίες καθίστανται μη ικανοποιητικές για έλεγχο στις περιπτώσεις ΣΜΕΑ με περισσότερα του ενός αεροχήματα.

Οι ψηφιακές επικοινωνίες από την άλλη μεριά, επιτρέπουν με κατάλληλες τεχνικές, την επαναφορά μέρους της αλλοιωμένης πληροφορίας ή τουλάχιστον, την μείωση της επίδρασης του θορύβου κατά την επανα-μετάδοση του σήματος. Επιπλέον, τα δεδομένα ψηφιακής μορφής δύναται να καταστούν ανθεκτικά σε κινδύνους ανεπιθύμητων παρεμβολών με τη χρήση κωδικών κρυπτογράφησης και αυθεντικότητας. Επίσης, τα ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα για ανάλυση σήματος έχουν χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με τα αναλογικά. Λόγω των παραπάνω, τα σύγχρονα ΣΜΕΑ βασίζονται κυρίως σε ψηφιακά σήματα και διαμορφώσεις[1]. Χρησιμοποιούν ψηφιακούς υπολογιστές για το χειρισμό των ΜΕΑ αλλά και για την επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από τα διάφορα συστήματα τους, προκειμένου να μεταδοθούν κατά τις ζεύξεις μεταξύ αυτών και των Επίγειων Σταθμών Ελέγχου ή άλλων ΜΕΑ.

Σχετικά με τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες του χειρισμού ενός ΜΕΑ, αυτές καθορίζονται από διάφορους παράγοντες όπως, ο τύπος του, το πεδίο των εφαρμογών του και άλλοι. Για παράδειγμα, για τον έλεγχο των ΜΕΑ πολιτικού τύπου χρησιμοποιείται παγκοσμίως η τιμή των 72 MHz. Με κατάλληλους ασύρματους ελεγκτές βασιζόμενους σε αυτή τη συχνότητα επιτυγχάνεται ο εξ αποστάσεως έλεγχος της κίνησης του αεροχήματος μέσα στο χώρο. Μέσω αυτών, ο χειριστής μεταβιβάζει τις απαραίτητες εντολές κίνησης.

Οι εντολές προκύπτουν από ακολουθίες ηλεκτρικών παλμών που παράγονται στο χειριστήριο του εκάστοτε Σταθμού Ελέγχου. Οι ακολουθίες στη συνέχεια, αφού υποστούν το απαραίτητο είδος διαμόρφωσης (όπως αυτές που περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα), στην συνέχεια μεταδίδονται προς το αεροχέμα με τη χρήση ενός κατάλληλου φέροντος κύματος των 72 MHz. Στη περίπτωση όμως που πλησίον μιας συγκεκριμένης ζεύξης πραγματοποιείται και άλλη στην ίδια συχνότητα, οι παρεμβολές μεταξύ αυτών θα είναι αναπόφευκτες και κατά συνέπεια, ο ορθός χειρισμός του ΜΕΑ θα είναι αδύνατος.

Προκειμένου να αποφευχθούν αυτές οι παρεμβολές, η ζώνη των 72 MHz διαιρείται σε 60 κανάλια με εύρος των 10 kHz. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ένα περιθώριο ασφαλείας των 20 kHz μεταξύ δύο οποιονδήποτε παρακείμενων καναλιών η οποία λαμβάνεται υπόψη για τα μη-ιδανικά κυκλώματα επεξεργασίας σήματος όπως τα φίλτρα. Κάθε ασύρματος ελεγκτής έχει ανάγκη από τη χρήση διάφορων καναλιών, κάθε ένα από τα οποία θα αφορά μια συγκεκριμένη λειτουργία. Για παράδειγμα, έστω ότι η λειτουργία του κινητήρα ελέγχεται στο κανάλι των 72.01 MHz και η λειτουργία ανύψωσης/κατάδυσης του αεροχήματος στο κανάλι των 72.02 MHz. Σε αυτή τη περίπτωση, ο ελεγκτής απαιτεί ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ 72.01 MHz 72.11 MHz. Εάν ένα ακόμα ΜΕΑ επιχειρεί στην ίδια " γειτονιά " , οι συχνότητες λειτουργίας του θα πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ 72.21 MHz 72.31 MHz, ανάλογα με τον αριθμό των ελεγκτών. Γενικά, ένας ελεγκτής ραδιοσυχνοτήτων δύναται να υποστηρίξει 8-10 κανάλια. Υποθέτοντας ότι ένα ΜΕΑ εκμεταλλεύεται όλα τα υποστηριζόμενα κανάλια, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η λειτουργία περισσότερων των 7-10 ΜΕΑ στην ίδια γειτονιά [96].

Από τη στιγμή που το σήμα ελέγχου λαμβάνεται από το δέκτη, υπόκειται σε κατάλληλη διαδικασία αποδιαμόρφωσης προκειμένου να εξαχθεί το σήμα πληροφορίας το οποίο στη συνέχεια λαμβάνεται από τον αρμόδιο μηχανικό ελεγκτή (κινητήρας, σερβομηχανισμοί κτλ.)

Το πλεονέκτημα των ζεύξεων 72 MHz είναι η αμεσότητα απόκρισης του ΜΕΑ στις εντολές κίνησης αυτού. Αυτές οι ζεύξεις χαρακτηρίζονται ως διαφανείς. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα ασφάλειας, αποσφαλμάτωση, ή δρομολόγηση. Η απουσία αυτών συνεπάγεται και την απαλοιφή επιπρόσθετων καθυστερήσεων και κατά επέκταση, την αμεσότητα απόκρισης του αεροχήματος. Από το πλεονέκτημα αυτό όμως προκύπτει και ένα μειονέκτημα των συγκεκριμένων ζεύξεων το οποίο αφορά την αδυναμία κωδικοποίησης των εκπεμπόμενων δεδομένων έναντι παρεμβολών. Επίσης, λόγω του μικρού εύρους της ζεύξης, είναι αδύνατη η μετάδοση πολλαπλών εντολών σε μία μόνο εκπομπή ή η μετάδοση δεδομένων από πολυμέσα.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η σχεδίαση του τρόπου επικοινωνίας για τον χειρισμό και την πλοήγηση του ΜΕΑ αποτελεί μια ιδιαίτερα δύσκολη υπόθεση. Η δυσκολία αυξάνεται ακόμα περισσότερο για τις εφαρμογές των ΜΕΑ σε στρατιωτικούς σκοπούς. Σε αυτές τις περιπτώσεις το επιχειρησιακό περιβάλλον χαρακτηρίζεται συνήθως από μεγάλο αριθμό περιορισμό στο τρόπο και τις διαδρομές πτήσης του ΜΕΑ, ειδικά όταν αυτή πραγματοποιείται πλησίον ή και εντός του χώρου των εχθρικών δυνάμεων.

4.5.2 Ασύρματες ζεύξεις για ανταλλαγή δεδομένων στα ΣΜΕΑ.

Στη προηγούμενη υποενότητα έγινε αναφορά στα ΜΕΑ κυρίως ως αερόχημα με έμφαση στην έννοια της εξ αποστάσεως ελεγχόμενης πτήσης αυτού. Εκτός όμως, του αεροχήματος, και όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, ένα ΜΕΑ περιλαμβάνει και τον Επιχειρησιακό Φόρτο (Payload) δηλαδή, το " ωφέλιμο φορτίο " που μεταφέρεται επ' αυτού προκειμένου να εκτελέσει τις αποστολές για τις οποίες έχει σχεδιαστεί. Ανάλογα με το μέγεθος του ΜΕΑ και τη φυσιογνωμία της εκάστοτε αποστολής , ο φόρτος δύναται να αποτελείται από συστήματα όπως τα παρακάτω:

- Κάμερες για λήψη φωτογραφιών ή βίντεο και συσκευές αποθήκευσης
- Όργανα νυχτερινής παρατήρησης
- Ραντάρ για ανίχνευση στόχων
- Συσκευές laser κατάδειξης στόχου
- Όργανα δειγματοληψίας και ανάλυσης ατμοσφαιρικού αέρα
- Οπλικά συστήματα

Γενικά, ο όρος "Επιχειρησιακός Φόρτος" αναφέρεται στον εξοπλισμό για τον οποίο το βασικό τμήμα ενός ΜΕΑ αποτελεί το "μέσο μεταφοράς" κατά την εκτέλεση των αποστολών χωρίς η απουσία αυτού του εξοπλισμού να καθίσει αδύνατη τη πτήση του ΜΕΑ [1],[4]. Περιλαμβάνει αισθητήρες, πομπούς, διαμορφωτές-αποδιαμορφωτές σήματος (modem), μέσα αποθήκευσης, καθώς και άλλα συστήματα τα οποία απαιτούνται προκειμένου να εκπληρωθούν αποστολές όπως:

- Αναγνώριση και επιτήρηση
- Διεξαγωγή ηλεκτρονικού πολέμου
- Μεταφορά και χρήση οπλικών συστημάτων
- Υλοποίηση ασύρματων τηλεπικοινωνιακών ad hoc δικτύων

Οι αισθητήρες για την πρώτη περίπτωση αποστολών είναι τα πιο συνηθισμένα στοιχεία ενός τυπικού επιχειρησιακού φόρτου. Διακρίνονται σε παθητικούς και ενεργητικούς. Οι παθητικοί δεν ακτινοβολούν κάποιο είδος ενέργειας. Οι ενεργητικοί αισθητήρες από την άλλη, λειτουργούν εκπέμποντας ενέργεια προς κάποιες κατευθύνσεις και ανιχνεύοντας την ανακλώμενη από διάφορους στόχους προς αυτούς.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αισθητήρων για αναγνώριση και παρατήρηση είναι διάφορα οπτικό-ηλεκτρικά συστήματα όπως οι μηχανές ημερήσιας και νυχτερινής λήψης φωτογραφιών και βίντεο καθώς και οι συσκευές απεικόνισης που λειτουργούν με υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα ραντάρ είναι επίσης άλλη μια κατηγορία αυτών.

Ο έλεγχος των διαφόρων αισθητήρων είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού στη πλειοψηφία των περιπτώσεων θα απαιτείται η διατήρηση της οπτικής επαφής μεταξύ αυτών και του εκάστοτε στόχου. Ο συγκεκριμένος έλεγχος προϋποθέτει την δυνατότητα κίνησης των αισθητήρων σε δύο άξονες, καθ' ύψος και κατά διεύθυνση, και κατ' επέκταση, την ύπαρξη κατάλληλων τηλεκατευθυνόμενων ή μη, ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων που θα υλοποιούν την κίνηση. Τα συστήματα αυτά θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από το στοιχείο της γυροσκοπικής σταθεροποίησης και θα πρέπει να υποβοηθούνται από άλλα πρότυπα αναγνωριστικά συστήματα που θα εξασφαλίζουν το "κλείδωμα" επί του στόχου. Ενδεχομένως επίσης, να συνεργάζονται και με κάποιο διαφορικό σύστημα GPS προκειμένου να εκτελούνται οι αναγκαίοι υπολογισμοί λαμβάνοντας υπόψη τις συντεταγμένες του στόχου και του αεροχήματος ανά πάσα στιγμή[4].

Τα παραπάνω συστήματα παράγουν ως έξοδο ψηφιακά δεδομένα εικόνας, βίντεο, τηλεμετρίας ή άλλου τύπου τα οποία πρέπει να μεταδίδονται ασύρματα προς κάποιον επίγειο σταθμό ή προς άλλα ΜΕΑ. Κατά συνέπεια, οι έξοδοι από τους διάφορους αισθητήρες προϋποθέτουν και την ανάλογη επεξεργασία και την μετατροπή αυτών σε ηλεκτρομαγνητικά σήματα προκειμένου να μεταδοθούν προς επίγειους ή άλλους σταθμούς με τον πλέον αποδοτικό τρόπο και εξασφαλίζοντας την στιβαρότητα και την ασφάλεια τους έναντι εχθρικών απειλών. Οι διαδικασίες που θα εξασφαλίσουν τα παραπάνω (δειγματοληψία, διαμόρφωση-αποδιαμόρφωση, κωδικοποίηση κτλ.) θα είναι προφανώς ψηφιακού χαρακτήρα γεγονός που καθιστά ευκολότερη την υλοποίησή τους λόγω της ιδιαίτερης ανάπτυξης της ψηφιακής τεχνολογίας από άποψη μεγέθους, ταχύτητας και κόστους.

Οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες και οι ρυθμοί που προκύπτουν από τις παραπάνω διαδικασίες υπόκεινται σε περιορισμούς οι οποίοι έχουν σημαντική επίδραση στα ΜΕΑ ως γενικευμένα συστήματα. Διαφορετικού τύπου αισθητήρες θα απαιτούν και διαφορετικά εύρη συχνοτήτων αλλά και διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. [4]. Κάποιοι αισθητήρες δύνανται να παράγουν δεδομένα με μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν που μια ασύρματη ζεύξη μετάδοσης δεδομένων είναι εφικτό να ικανοποιήσει. Παράδειγμα αποτελούν τα παραγόμενα video υψηλής ανάλυσης από κοινές ή Προβλεπτικές Υπέρυθρης Ακτινοβολίας (Forward – Looking Infrared, FLIR) κάμερες με ρυθμό λήψης 30 καρέ ανά δευτερόλεπτο (frame per second, fps). Τα συστήματα αυτά είναι ικανά να παράγουν περίπου 75 εκατομμύρια δυαδικά ψηφία ανά δευτερόλεπτο (million bits per second, Mbps) από ακατέργαστα δεδομένα. Άλλο παράδειγμα είναι αυτό των αισθητήρων για υψηλής ανάλυσης απεικόνιση πιθανών στόχων από πολύ μεγάλο ύψος (HALE UAS).

Σε αυτή τη περίπτωση οι ρυθμοί λαμβάνουν τιμές έως και 500 Mbps και το απαιτούμενο εύρος αυξάνεται υπερβολικά εξαιτίας της εφαρμογής της τεχνικής διάχυσης του φάσματος ως μέτρο προστασίας από εχθρικές παρεμβολές [1],[4].

Γενικά, οι πλέον “απαιτητικές” μεταδιδόμενες πληροφορίες κατά τις ασύρματες ζεύξεις των ΣΜΕΑ, από την άποψη του υψηλού ρυθμού μετάδοσης, είναι τα δεδομένα video που παράγονται από αισθητήρες απεικόνισης όπως οι κοινές και οι FLIR κάμερες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από αλληλουχίες εικόνων-καρέ τα οποία εναλλάσσονται με έναν τυπικό ρυθμό των 30 fps. Κάθε ένα από αυτά τα καρέ αποτελείται με τη σειρά του από έναν πολύ μεγάλο αριθμό εικονοστοιχείων (picture element, pixel) έκαστο εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από μία αριθμητική τιμή. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την φωτεινότητα του εικονοστοιχείου στη κλίμακα του γκρι (gray scale). Ένα τυπικό ακατέργαστο βίντεο, αφού υποστεί ψηφιοποίηση, απαιτεί 6 έως 8 bits για την αναπαράσταση της προαναφερθείσας τιμής. Αν η εφαρμοζόμενη ανάλυση είναι 640 pixels (οριζοντίως) x 480 pixels (καθέτως), προκύπτει ότι απαιτούνται 307.200 pixels ανά καρέ. Κατ’ επέκταση, ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης ανέρχεται στα 75 Mbps, όπως αναφέρθηκε άλλωστε και πιο πάνω. Επιπλέον, αν τα δεδομένα είναι έγχρωμα, ο αριθμός των αναγκαίων bits για τη περιγραφή του χρώματος του κάθε pixel αυξάνεται. Κατά συνέπεια, σε περιπτώσεις αυστηρά περιορισμένων ρυθμών, απαιτείται η εξαίρεση του χρώματος κατά την επεξεργασία των καρέ.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δύναται να ικανοποιηθούν μόνο με τις υψηλότερες ραδιοσυχνότητες. Οι ζεύξεις που υλοποιούνται με τις συγκεκριμένες συχνότητες προϋποθέτουν τη διατήρηση ακριβούς και αδιάκοπης οπτικής επαφής μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης καθώς επίσης και μεγαλύτερα ποσά ισχύος εκπομπής[4]. Για το λόγο αυτό προκύπτει η ανάγκη για συμβιβασμό όταν πρόκειται να επιλεχθεί η κατάλληλη συχνότητα (οι χαμηλές συχνότητες εξασφαλίζουν καλύτερη και πιο αξιόπιστη μετάδοση αλλά χαμηλότερους ρυθμούς σε αντίθεση με τις υψηλές οι οποίες, όπως ειπώθηκε, απαιτούν αυστηρή τήρηση LOS και μεγαλύτερα ποσά ισχύος εκπομπής). Η ζώνη των UHF συχνοτήτων μεταξύ 1 έως 3 GHz αποτελεί στις περισσότερες των περιπτώσεων τη καλύτερη συμβιβαστική λύση. Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση αυτής της περιοχής συχνοτήτων όμως και από εφαρμογές όπως οι τηλεοπτικές μεταδόσεις έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση από τις υπηρεσίες κατανομής συχνοτήτων για χρήση της SHF ζώνης των μικροκυμάτων, από 5 GHz και άνω.

Όσον αφορά τα ΣΜΕΑ πολιτικού χαρακτήρα και όπως έχουν δείξει έρευνες [96], ο συνδυασμός συχνοτήτων 900 MHz και 2.4 GHz για την μετάδοση δεδομένων δύναται να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι συχνότητες των 900 MHz, εκτός της χρήσης τους για μετάδοση δεδομένων βίντεο χαμηλού ρυθμού είναι ικανοποιητικές επίσης και για την εκπομπή δεδομένων τηλεμετρίας από τους αντίστοιχους αισθητήρες ενός ΜΕΑ. Η αποδοτική εκμετάλλευση αυτών των συχνοτήτων εξαρτάται άμεσα από τον επιθυμητό ρυθμό και από το είδος της διαμόρφωσης που επιλέγεται για κάθε εφαρμογή [96].

Δυστυχώς όμως, καμία από τις ζεύξεις που υλοποιούνται κατά την λειτουργία των ΣΜΕΑ δεν διαθέτει την απαραίτητη χωρητικότητα για να υποστηρίξει ιδιαίτερα υψηλούς ρυθμό πρωτογενών ακατέργαστων δεδομένων χωρίς την ανάλογη επεξεργασία τους[1],[4]. Η περιοριστική επίδραση του συγκεκριμένου γεγονότος δύναται να γίνει αντιληπτή αν ληφθεί υπόψη η ανάγκη για εξασφάλιση υψηλών ρυθμών μετάδοσης, η οποία προκύπτει εξίσου από:

- τη χρήση αισθητήρων βιντεοσκόπησης για την πλοήγηση του ΜΕΑ,
- τον χαρακτήρα αναγνώρισεων και παρακολούθησης που έχουν οι επιχειρήσεις που διεξάγονται από την πλειοψηφία των ΣΜΕΑ.

Προβλήματα όμως προκύπτουν ακόμα και στις περιπτώσεις των ΜΕΑ που επιχειρούν σε μικρότερες ακτίνες δράσεις και δεν απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αυτά οφείλονται στις παρεμβολές που λαμβάνουν χώρα όταν στο ίδιο θέατρο επιχειρήσεων ενεργούν πολλά ΣΜΕΑ και οι οποίες αποτελούν περιοριστικό παράγοντα αυτών [4].

Υπάρχει γενικά μια ανησυχία σχετικά με τη μεγάλη κατανάλωση του τηλεπικοινωνιακού φάσματος προς όφελος των εφαρμογών ΣΜΕΑ. Το πρόβλημα που προκύπτει από αυτή οξύνεται ακόμα περισσότερο καθώς αυξάνεται η χρήση των ΜΕΑ πολιτικού τύπου. Η ανάγκη για επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος όπως γίνεται κατανοητό, καθίσταται επιτακτική. Στα πλαίσια αυτής όμως θα πρέπει να εξασφαλίζεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό και η ικανοποίηση των απαιτήσεων των ΣΜΕΑ για αποτελεσματικές ζεύξεις δεδομένων με τους επιθυμητούς υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ώστε να ανταποκρίνονται στο δύσκολο και απαιτητικό χαρακτήρα των πολεμικών επιχειρήσεων.

Για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλήματα έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μείωσης των μεταδιδόμενων ρυθμών δεδομένων χωρίς να προκαλείται απώλεια πληροφορίας ή αν προκύπτει τέτοια, να μην επιδρά αρνητικά στην αποδοτική εκτέλεση της αντίστοιχης αποστολής. Αυτές οι μέθοδοι οφείλουν την ύπαρξη τους στη εξέλιξη των ηλεκτρονικών τεχνολογιών και δύνανται να είναι διαφανείς ή σχεδόν διαφανείς στον εκάστοτε χειριστή. Ωστόσο, αν απαιτείται και η εξασφάλιση δυνατότητας αντι-παρεμβολών ή τουλάχιστον ανθεκτικότητας σε εχθρικές παρεμβολές, η μείωση του μεταδιδόμενου ρυθμού πιθανόν να φτάσει σε τέτοιο σημείο που να επιδρά στη εκτέλεση της αποστολής. Εάν η σχεδίαση του συνολικού συστήματος υλοποιείται γύρω από έναν απεριόριστο ρυθμό δεδομένων, η επίδραση της μείωσης αυτού είναι πολύ πιθανό ότι θα υποβαθμίσει την εκτέλεση της αποστολής. Από την άλλη, εάν ο σχεδιασμός του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών χειρισμού και της σχεδίασης της αποστολής, υλοποιείται έχοντας υπόψη έναν περιορισμένο μεταδιδόμενο ρυθμό τότε, είναι σχεδόν σίγουρο ότι η αποστολή θα εκτελεστεί χωρίς καμία υποβάθμιση [1].

Μείωση του ρυθμού δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με διαδικασίες συμπίεσης αυτών (data compression). Αυτές έχουν ως αντικείμενο την μετατροπή των δεδομένων σε πιο αποτελεσματική μορφή κατά τέτοιο τρόπο ώστε :

- ολόκληρη ή σχεδόν όλη η πληροφορία που περιέχεται σε αυτά να διατηρείται ακέραιη,
- να εξασφαλίζεται η δυνατότητα η επανακατασκευή των αυθεντικών δεδομένων μετά την λήψη των τροποποιημένων από τον επιθυμητό σταθμό.

Ιδανικά, καμία πληροφορία δεν χάνεται, είτε είναι χρήσιμη είτε όχι. Στη πράξη όμως προκύπτουν απώλειες πληροφορίας εξαιτίας ατελειών κατά τις διαδικασίες της συμπίεσης και της επανακατασκευής των δεδομένων.

Η τεχνική της συμπίεση περιλαμβάνει αλγόριθμους εξάλειψης των πλεοναζόντων στοιχείων τα οποία επαναεισάγονται στον αντίστοιχο σταθμό λήψης, εφόσον είναι απαραίτητα για την κατάληψη τους από τον χειριστή. Ένα πολύ απλό παράδειγμα συμπίεσης δεδομένων μπορεί να εξαχθεί από την λειτουργία ενός αισθητήρα θερμοκρασίας αέρα ο οποίος παράγει μία τιμή ανά δευτερόλεπτο. Αν δεν προκύψει καμία αλλαγή στη θερμοκρασία από τη πιο πρόσφατη μέτρηση, η συμπίεση δεδομένων συνίσταται στη μη αποστολή της νέας (πλεονάζουσας) τιμής, ενώ η επανακατασκευή των δεδομένων υλοποιείται με τη διατήρηση και επίδειξη της παλιάς τιμής έως ότου μια μέτρηση διαφορετικής τιμής να ληφθεί από τον αισθητήρα και να μεταδοθεί. Με αυτόν τον τρόπο, ο αριθμός των bits που μεταδίδονται σε μια χρονική περίοδο, μειώνεται κατά ένα μεγάλο συντελεστή χωρίς απώλεια πληροφορίας [1].

Ένας άλλος τρόπος μείωσης του μεταδιδόμενου ρυθμού δεδομένων είναι η περικοπή δεδομένων (data truncation). Η μείωση σε αυτή τη περίπτωση πραγματοποιείται με περικοπή συγκεκριμένων δεδομένων προκειμένου να μεταδοθούν μόνο τα εναπομείναντα . Με τον συγκεκριμένο τρόπο η απώλεια πληροφορίας είναι αναπόφευκτη. Ωστόσο όμως, αν η περικοπή υλοποιηθεί με “έξυπνο” και αποτελεσματικό τρόπο, η πληροφορία που θα χαθεί δεν θα είναι απαραίτητη για την εκπλήρωση της αποστολής . Έτσι, η περικοπή δεδομένων δύναται να ασκεί ελάχιστη ή μηδενική επίδραση στην εκτέλεση μίας αποστολής από κάποιο ΣΜΕΑ. Ένα τυπικό παράδειγμα περικοπής μπορεί να δοθεί με βάση τα δεδομένα video. Τα συγκεκριμένα παράγονται συνήθως από τους αντίστοιχους αισθητήρες με ρυθμό 30 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Ο συγκεκριμένος ρυθμός επιβάλλεται για λόγους κυρίως “ καλαισθησίας ” όπως για παράδειγμα η αποφυγή τρέμουλου (flicker) οθόνης, παρά για ουσιαστικούς λόγους. Κατά συνέπεια, η αφαίρεση μερικών καρέ για τη μείωση του ρυθμού κατά ένα συντελεστή του δύο, παρότι συνιστά απώλεια πληροφορίας, δεν επηρεάζει την απόδοση κατά την εκτέλεση της αποστολής.

Μια πιο αυστηρή μορφή περικοπής είναι αυτή που υλοποιείται με την αφαίρεση των ορίων καθενός από τα καρέ των δεδομένων video, μειώνοντας έτσι το οπτικό πεδίο του αισθητήρα κατά τον συντελεστή του δύο σε κάθε διεύθυνση. Αυτό συνεπάγεται μείωση του μεταδιδόμενου ρυθμού δεδομένων κατά ένα συντελεστή τέσσερα αλλά δυστυχώς προκαλεί μείωση και της περιοχής επί του εδάφους που δύναται να παρατηρηθεί. Σε αυτή τη περίπτωση η εφαρμογή της τεχνικής της περικοπής προκαλεί απώλεια χρήσιμης πληροφορίας [1].

Όπως γίνεται αντιληπτό, η επιλογή μεταξύ των τεχνικών της συμπίεσης και της περικοπής δεδομένων ή του συνδυασμού αυτών, πρέπει να γίνεται ως μέρος μιας συνολικής προσπάθειας που θα λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και τον τρόπο χρήσης των δεδομένων για την εκτέλεση της αποστολής καθώς επίσης, και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε ασύρματης ζεύξης. Οι προϋποθέσεις των τεχνικών αυτών καθοδηγούνται από τους περιορισμούς του εύρους συχνοτήτων της ζεύξης δεδομένων, η οποία με τη σειρά της, καθορίζεται από τις ανάγκες αντί-παρεμβολής.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι ο μεταδιδόμενος ρυθμός δεδομένων σε μια ασύρματη ζεύξη δεν λαμβάνει τιμές κατά ανεξάρτητο τρόπο, ειδικά σε περιπτώσεις που η ζεύξη θα πρέπει να χαρακτηρίζεται σε σημαντικό βαθμό από το στοιχείο της αντί-παρεμβολής. Στη πραγματικότητα, ρυθμοί άνω των 1 Mbps είναι πολύ πιθανό να μην είναι εφικτοί σε μία " μεγάλης ακτίνας , μέτριου κόστους, ανθεκτικής σε παρεμβολές " ζεύξη, σε σχέση με τον τρόπο με τον οποίο αυτή μεταφράζεται σε αριθμητικά δεδομένα. Ανεξάρτητα από το αν υψηλότεροι ρυθμοί είναι τεχνικά εφικτοί ή όχι , το στοιχείο του ρυθμού δεδομένων αποτελεί την μόνη βασική παράμετρο στο σχεδιαστικό δίλλημα η οποία πιθανόν να ποικίλει σε μια απόπειρα για διατήρηση χαμηλού ή μέτριου κόστους, από τη στιγμή που το πεδίο εξαρτάται από τις βασικές θεωρήσεις της αποστολής και το περιβάλλον με τις εκάστοτε παρεμβολές, ελέγχεται από κάποιον.

Ένα άλλος σημαντικός αισθητήρας που κατά μεγάλη πιθανότητα δύναται να διαθέτει ο επιχειρησιακός φόρτος ενός MEA και που πρέπει να αναφερθεί, είναι το σύστημα του Ραδιοεντοπιστή (Radio Detection And Ranging, RADAR). Η σημασία του συγκεκριμένου συστήματος έγκειται στο γεγονός ότι καθίσταται δυνατή η εκτέλεση αναγνωριστικών αποστολών υπό οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες. Αυτό είναι εφικτό λόγω των συχνοτήτων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται κατά τη λειτουργία του (τυπικά 9 έως 35 GHz για τις εφαρμογές των MEA). Οι χαμηλότερες εξ αυτών συχνότητες απορροφώνται κατά πολύ λιγότερο από τις αντίστοιχες του οπτικού φάσματος που χρησιμοποιούνται από τους αισθητήρες λήψης εικόνας και video, γεγονός το οποίο επιτρέπει στα συστήματα RADAR να " βλέπουν " μέσα από τα σύννεφα και την ομίχλη. Επιπλέον, δεν απαιτείται άμεση εκπομπή ακτινοβολίας από το στόχο αλλά εκμεταλλεύεται την δική του εκπεμπόμενη ενέργεια η οποία ανακλάται από τον εκάστοτε φωτιζόμενο στόχο. Ανάλογα με τη μορφή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, οι ραδιοεντοπιστές διακρίνονται σε παλμικά (pulsed) και σε συνεχούς κύματος (continuous wave, cw).

Οι εν λόγω αισθητήρες, εκτός του εντοπισμού στόχων, δύνανται να υπολογίζουν και την απόσταση αυτών βάσει της διάρκειας πτήσης της εκπεμπόμενης προς αυτούς ακτινοβολίας. Επιπλέον, ο ενεργητικός χαρακτήρας αυτών τους αποδίδει το σημαντικό πλεονέκτημα της αξιοποίησης του φαινομένου Doppler έναντι άλλων αισθητήρων απεικόνισης. Χάριν αυτού δύνανται να διακρίνουν ένα κινούμενο στόχο σε σχέση με το στατικό υπόβαθρό του και να υπολογίσουν την ταχύτητά του βάσει της ολίσθησης φάσης (λόγω σχετικής κίνησης μεταξύ RADAR και στόχου) της ανακλώμενης από αυτόν, ακτινοβολίας.

Τα συστήματα RADAR χρησιμοποιούν δέσμες ακτινοβολίας που ενδέχεται να είναι μεγαλύτερες ως προς τις διαστάσεις των στόχων, ειδικά στις περιπτώσεις που αυτοί είναι κινούμενοι. Ωστόσο, η χρήση δεσμών μεγάλου εύρους αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την απόδοση των εν λόγω συστημάτων. Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται στενότερες δέσμες και ειδικά στις περιπτώσεις ανίχνευσης οχημάτων ή άλλων μικρών στόχων επί του εδάφους.

Το ελάχιστο γωνιακό εύρος της δέσμης ενός ραδιοεντοπιστή καθορίζονται από τις ίδιες διαθλαστικές επιδράσεις που διέπουν και την ανάλυση των οπτικών αισθητήρων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το εύρος τη δέσμης είναι ανάλογο του λόγου του χρησιμοποιούμενου μήκους κύματος προς την διάμετρο της κεραίας του συστήματος και εφόσον οι κεραίες των MEA χαρακτηρίζονται από περιορισμένο μέγεθος, θα πρέπει και το αντίστοιχο μήκος κύματος να λαμβάνει μικρές τιμές. Όπως προκύπτει λοιπόν, η ανάγκη για στενή δέσμη όταν χρησιμοποιούνται κεραίες μικρού μεγέθους ευνοεί ένα μικρό μήκος κύματος. Ωστόσο όμως η σημαντική αύξηση της απόσβεσης λόγω υδρατμών για συχνότητες άνω των 12 GHz καθιστά τα μικρά μήκη κύματος αποδεκτά για χρήση τους σε ραδιοεντοπιστές μικρής εμβέλειας .

Όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων, υπάρχουν περιπτώσεις που οι ραδιοεντοπιστές δύνανται να παράγουν ακατέργαστα δεδομένα με τόσο υψηλό ρυθμό ώστε να καθίσταται αδύνατη η απευθείας μετάδοσή τους προς το έδαφος, εφόσον αυτό απαιτηθεί. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με κατάλληλη ψηφιακή επεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων επί του MEA και πριν μεταδοθούν από αυτό προς κάποιον σταθμό ή με την μαζική ψηφιακή αποθήκευσή τους για τη μετάδοσή τους με μικρότερο ρυθμό[1].

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ραδιοεντοπιστών. Αυτοί διακρίνονται από την συχνότητα, την κυματομορφή και τις προσεγγίσεις επεξεργασίας. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από την εκάστοτε αποστολή. Στο γενικότερο πλαίσιο των εφαρμογών των MEA προκύπτουν επιπρόσθετοι περιορισμοί οι οποίοι σχετίζονται με το μέγεθος και το βάρος τους, με τα χαρακτηριστικά της κεραίας και με το κόστος [1].

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, ένας από τους κρίσιμους παράγοντες για τον προσδιορισμό της απόδοσης των MEA είναι η εξασφάλιση υψηλών μεταδιδόμενων ρυθμών δεδομένων μέσω αξιόπιστων και ασφαλών ασύρματων ζεύξεων επικοινωνίας. Τέτοιοι ρυθμοί δύναται να επιτευχθούν με αξιοποίηση των συνδέσεων με οπτικό χαρακτήρα οι οποίες βασίζονται στις οπτικές συχνότητες [97]. Οι τιμές που λαμβάνουν οι ρυθμοί αυτών των ζεύξεων είναι της τάξης των Gbps, γεγονός που καθιστά εφικτή την ικανοποίηση και των πιο υψηλών απαιτήσεων.

Τα αντίστοιχα χρησιμοποιούμενα συστήματα καλούνται Οπτικά Συστήματα Ελεύθερου Χώρου (Free Space Optics systems, FSO) Ένα τέτοιο σύστημα επικοινωνιών αποτελείται από ένα οπτικό πομπό, ένα διαμορφωτή και ένα τηλεσκόπιο. Ο δέκτης αποτελείται από ένα ανιχνευτή, ένα αποκωδικοποιητή και ένα τηλεσκόπιο για να ανακτήσει το οπτικό σήμα. Ουσιαστικά, διαμορφωμένες οπτικές δέσμες εκπέμπονται μέσω ενός ατμοσφαιρικού καναλιού, προκειμένου να επιτευχθεί ασύρματη μετάδοση δεδομένων βραχείας, μέσης και μακράς εμβέλειας.

Για την ώρα ερευνάται η χρήση FSO για τις επικοινωνίες εδάφους-εδάφους (επίγειες συνδέσεις μικρής και μεγάλης εμβέλειας), για δορυφορική σύνδεση uplink / downlink, μεταξύ δορυφόρων, για διαστημικές αποστολές, κλπ. Εκτός από το να προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, παρέχουν και άλλα πλεονεκτήματα που περιλαμβάνουν τα θέματα ασφάλειας, μικρότερο μέγεθος και απαιτήσεις βάρους και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Από την άλλη πλευρά για να λειτουργήσει ένα σύστημα FSO πρέπει να εξασφαλίζεται διαρκής και ένα ανεμπόδιστη οπτική επαφή . Μια αδυναμία λοιπόν του συγκεκριμένου συστήματος είναι η ευαισθησία της FSO σύνδεσης στις καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η ομίχλη μπορεί να προκαλέσει σοβαρή εξασθένηση του σήματος. Ακόμη και με μέτριας έντασης ομίχλη είναι δυνατόν να υπάρξει εξασθένηση του σήματος κατά 130 dB / km. Τα παραπάνω ζητήματα θα πρέπει κατά συνέπεια να λαμβάνονται υπόψη κατά τη χρήση των FSO συστημάτων στις ποικίλες εφαρμογές των ΣΜΕΑ.

4.5.3 Ασύρματες ζεύξεις για συνεργασία μεταξύ των MEA.

Τα σύγχρονα MEA, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, εκτός της λήψης και της εκπομπής δεδομένων από και προς τον Επίγειο Σταθμό Ελέγχου, δύνανται να υλοποιούν ζεύξεις και με άλλα MEA για την μεταξύ τους ανταλλαγή δεδομένων στα πλαίσια ενός κινητού *ad hoc* δικτύου με δυναμικό χαρακτήρα. Η εξασφάλιση και η διατήρηση επικοινωνιών μεταξύ αυτών είναι ιδιαίτερης σημασίας για τις στρατιωτικές εφαρμογές καθώς δύνανται να αποτελέσουν καταλυτικό παράγοντα κατά την εκτέλεση μιας αποστολής.

Το σημαντικότερο όφελος που προκύπτει από τη συνεργασία μεταξύ MEA έγκειται στην εξασφάλιση της δυνατότητας επέκτασης ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου προκειμένου να υλοποιούνται έμμεσα, μέσω LOS ασύρματων ζεύξεων, αντίστοιχες BLOS ζεύξεις. Με αυτό τον τρόπο ένα MEA μεγάλης κλίμακας δύνανται να αυξήσει ακόμα περισσότερο την ακτίνα δράσης ανταλλάσσοντας δεδομένα ελέγχου, τηλεμετρίας και πολυμέσων με τον αντίστοιχο Επίγειο Σταθμό μέσω ενδιάμεσων MEA-σταθμών αναμετάδοσης. Έτσι επίσης, εξασφαλίζεται η ανεξαρτητοποίηση από την ανάγκη μεσολάβησης δορυφορικών συστημάτων. Η χρήση αυτών συνεπάγεται αφενός την εξάρτηση από την θέση των δορυφόρων και αφετέρου, την κατά έμμεσο τρόπο, εξάρτηση από τον ελέγχοντα το σύστημα αυτό. Απαιτείται επίσης η διάθεση της απαραίτητης άδειας για εκμετάλλευση αυτών των ζεύξεων, με το ανάλογο οικονομικό κόστος.

Άλλο ένα όφελος που προκύπτει από την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ περισσότερων του ενός MEA είναι η δυνατότητα εύκολης και άμεσης ανάπτυξης δικτύων για την ικανοποίηση τηλεπικοινωνιακών αναγκών σε καταστάσεις που υπόκεινται σε γεωγραφικούς ή άλλους περιορισμούς.

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό, η δικτύωση των MEA κατά ασύρματο τρόπο μπορεί να επιδράσει θετικά και στα MEA καθαυτά, ως στοιχεία-μονάδες ενός ευρύτερου συνόλου. Λόγω μείωσης των αποστάσεων καθώς αυξάνεται ο αριθμός τους, καθίστανται εφικτές, μεταδόσεις με μικρότερες απαιτήσεις σε ισχύ, ανθεκτικές σε εξασθένηση και σε παρεμβολές. Με την δρομολόγηση πακέτων μέσω πολλαπλών αλμάτων μειώνονται επίσης οι απαιτήσεις για αποθήκευση. Από την άλλη όμως, προκύπτει η ανάγκη πολύπλοκων υπολογιστικών συστημάτων. Επίσης, όσο αυξάνεται ο αριθμός των MEA σε ένα *ad hoc* δίκτυο (όπως στη περίπτωση στρατιωτικών εφαρμογών) τόσο περιορίζεται και το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων [98]. Τα δίκτυα αυτά συναντώνται στη βιβλιογραφία ως *ad hoc* πολλαπλών αλμάτων (*multi-hop*) ή ως *ασύρματα δίκτυα αισθητήρων*. Η εκάστοτε εφικτή απόσταση αυτών εξαρτάται από τα αντίστοιχα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εφαρμόζονται, τον τρόπο διαχείρισης της ισχύος και τον τύπο της κεραίας του κάθε ασύρματου κόμβου-MEA.

Η απόδοση των εφαρμοζόμενων πρωτοκόλλων σε ένα τέτοιο δίκτυο εξαρτάται από:

- τον αριθμό των ΜΕΑ που το συνθέτουν,
- την τοπολογία αυτού,
- το γεγονός ότι η εκπεμπόμενη ισχύς είναι ρυθμιζόμενη ή όχι
- την ταχύτητα του κάθε ΜΕΑ,
- το περιβάλλον στο οποίο υλοποιείται το δίκτυο.

Παράγοντες που αυξάνουν την πολυπλοκότητα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι η ποιότητα της μεταβλητής ασύρματης ζεύξης, οι απώλειες διάδοσης, οι διαλείψεις, η παρεμβολή πολλών χρηστών, η καταναλισκόμενη ισχύς και οι τοπολογικές μεταβολές

Η μετάδοση των δεδομένων προς κάποιον προορισμό μέσω δικτύων πολλαπλών ΜΕΑ μπορεί να επιτευχθεί μέσω ζεύξεων στις συχνότητες 900 MHz και 2,4 GHz [96]. Οι υψηλές τιμές αυτών σε συνδυασμό με τις ανάγκες για εξασφάλιση δυνατότητας Αντί-Παρεμβολών πιθανόν να οδηγήσει σε προβλήματα περιορισμού του διαθέσιμου εύρους συχνοτήτων. Όπως έχει αναφερθεί, τα προβλήματα οξύνονται ακόμα περισσότερο στη περίπτωση που απαιτείται η μετάδοση υψηλών ρυθμών δεδομένων οπότε, η ανάγκη εφαρμογής τεχνικών συμπίεσης και περικοπής δεδομένων γίνεται επιτακτική.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Paul Gerin Fahlstrom, Thomas James Gleason. (2012. *Introduction to UAV Systems*. s.l. : John Wiley & Sons, Ltd, (2012.**
2. **KAMRANI, FARZAD. 2007. *Using On-line Simulation in UAV Path Planning*. Stockholm, Sweden : s.n., 2007.**
3. **Angelov, Plamen. *Sense and Avoid in UAS_Research and Applications*. 2012 : John Wiley & Sons, Ltd.**
4. **Austin, Reg. 2010. *Unmanned Air Systems_ UAV Design, Development and Deployment*. s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2010.**
5. **Chatterjee, Abhishek. *Stealth Technology Aircrafts*. s.l. : MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT/UIET, C.S.J.M UNIVERSITY.**
6. **I.Skolnik, Merril. 1981. *Introduction to Radar Systems (2nd Edition)*. s.l. : McGraw Hill Book Company, 1981.**
7. **Jay, F. 1984. *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms (3rd Edition)*. New York : IEEE Press, 1984.**
8. **Eugene Knott, John F. Schaeffer, Michael.T Tuley. 2004. *Radar Cross Sections (2nd revised edition)*. s.l. : SciTech Publishing Inc, 2004.**
9. **David Barton, Sergey Leonov. 1998. *Radar Technology Encyclopedia*. s.l. : Artech House, 1998.**
10. **Luders, Brandon. 2008. *Robust Trajectory Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain Environments*. s.l. : MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, September 2008.**
11. **Kuwata, Yoshiaki. 2003. *Real-time Trajectory Design for Unmanned Aerial Vehicles using Receding Horizon Control*. s.l. : MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2003.**
12. **Wei Ren, Ella Atkins. 2005. *Non linear Trajectory Tracking for Fixed Wing UAVs via backstepping and Parameter Adaptation*. San Francisco, California : AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2005.**
13. **Ost, Gustan. 2012. *Search path generation with UAV applications using approximate convex decomposition*. Linkoping, Sweden : Department of Electrical Engineering/ Linkoping universitet, 2012.**

14. **Anup Dargar, Ahmed Kamel, Gordon Christensen and Kendall E. Nygard. 2002.** An Agent Based Framework for UAV Collaboration. s.l. : Proceedings of the ISCA 11th International Conference on Intelligent Systems, pp. 54-59, 2002.
15. **Frantz, Natalie R. 2005.** SWARM INTELLIGENCE FOR AUTONOMOUS UAV CONTROL. Monterey, California : NAVAL POST GRADUATE SCHOOL, june 2005.
16. **Seunghoon Kang, Hyunjin Choi and Youdan Kim. 2013.** Formation Flight and Collision Avoidance for Multiple UAVs using Concept of Elastic Weighting Factor. Seoul, Korea : School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 2013.
17. **Brian D.O. Anderson, Baris Fidan, Changbin Yu, Dirk van der Walle.** UAV Formation Control: Theory and Application. <http://www.nicta.com.au/>. [Online]
18. **Ahmed, E. Onwuka A. Folaponmile and M. 2011.** *MANET: A RELIABLE NETWORK IN DISASTER AREAS*. s.l. : Jorind, 2011.
19. **Nieminen, Klauss. 2003.** *Introduction to Ad Hoc Networking*. Helsinki : Networking Laboratory Helsinki University of technology , 2003.
20. **Frodigh, Johansson and Larsson. 2000.** *Wireless ad hoc networking – The art of networking without a network*. Sweden : Ericsson , 2000.
21. **Royer, Perkins. 2002.** *Transmission Range Effects on AODV Multicast Communications, To appear in ACM Mobile Networks and Applications special issue in Multipoint Communication in Wireless Mobile Networks*. 2002.
22. **Δημήτριος Κ. Κουτσουβέλας Ηλίας Δ. Κωστούδης. 2008.** *Ασφάλεια σε δίκτυα ad hoc και δίκτυα αισθητήρων* . Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2008.
23. **Daniel Lihui Gu, Guangyu Pei, Henry Ly, Mario Gerla, Beichuan Zhang Xiaoyan Hong.** *UAV Aided Intelligent Routing for Ad-Hoc Wireless Network in Single-area Theater*. Los Angeles : Computer Science Department University of California.
24. **RAMIN, HEKMAT. 2006.** *Ad-Hoc Networks: Fundamental Properties And Network Topologies*. s.l. : Springer, 2006.
25. **Perkins. 2001.** *Ad Hoc Networking*. s.l. : Addison Wesley, 2001.
26. **K. Erik, S. Nadjm-Tehrani. 2006** . *Mobility models for UAV group reconnaissance applications*. Bucharest, Romania : Proceedings of the 2nd International Conference on Wireless and Mobile Communications, 2006 .

27. <http://www.cs.rutgers.edu/~rmartin/teaching/fall04/cs552/papers/>. [Online]
28. **Abolhasan, M., Wysocki, T. & Dutkiewicz, E. 2004.** *A review of routing protocols for mobile ad hoc networks.* *Ad Hoc Networks.* s.l. : University of Wollongong, 2004.
29. **Macker, Corson J. 1999.** *Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations.* s.l. : IETF, 1999.
30. **Campbell A., Conti M., Giordano S. 2003.** *Special issue on mobile ad hoc network.* s.l. : ACM/Kluwer, 2003.
31. **Chang J, Tassiulas L. 2000.** *Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks.* s.l. : IEEE INFOCOM., 2000.
32. **Ouns Bouachir, Fabien Garcia , Nicolas Larrieu, Thierry Gayraud ,. 2013.** *Ad hoc Network QoS Architecture For Cooperative Unmanned Aerial Vehicles (UAVs).* Valencia : Wireless Days Conference, 2013.
33. **Sun, Jun-Zhao. 2001.** *Mobile Ad Hoc Networking: An Essential Technology for Pervasive Computing.* Finland : University of Oulu., 2001.
34. **K.Ramesh Reddy, S.Venkata Raju, N.Venkatadri. 2012.** *Reactive, Proactive MANET Routing Protocol Comparison.* s.l. : International Journals of Engineering & Sciences (IJENS) , 2012.
35. **T. Clausen, P. Jacquet. 2003.** *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR).* s.l. : Internet Engineering Task Force (IETF), 2003.
36. **R. Ogier, F. Templin, M. Lewis. 2004.** . *Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF).* s.l. : Internet Engineering Task Force (IETF) , 2004. .
37. **C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das. 2003.** . *Ad hoc On-Demand DistanceVector (AODV) Routing.* s.l. : Internet Engineering Task Force (IETF), 2003.
38. **D. Johnson, Y. Hu, D. Maltz. February 2007.** . *The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4.* s.l. : Internet Engineering Task Force (IETF), February 2007.
39. **J.-M. Choi, Y.-B. Ko.** *A Performance Evaluation for Ad Hoc Routing Protocols in Realistic Military Scenarios.* s.l. : 9th International Conference on Cellular and Intelligent Communications.
40. **J. Hsu, S. Bhatia, K. Tang, R. Bagrodia, M.J. Acriche. 2004.** *Performance of Mobile Ad Hoc Networking Routing Protocols in Large Scale Scenarios.* s.l. : Military Communications Conference(MILCOM)/ IEEE, 2004.

41. **B. Karp, H.T. Kung. 2000.** *GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks.* . s.l. : Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)/ ACM, 2000.
42. **S.M. Das, H. Pucha, Y.C. Hu. 2005.** *Performance Comparison of Scalable Location Services for Geographic Ad Hoc Routing.* s.l. : 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). , 2005.
43. **Wei Wang, Xiaohong Guan , Beizhan Wang , Yaping Wang. 2010 .** *A novel mobility model based on semi-random circular movement in mobile ad hoc networks.* s.l. : Elsevier, 2010 .
44. **R. Ghanta, S. Suresh. 2004.** *Influence of mobility models on the performance of routing protocols in ad-hoc wireless networks.* s.l. : 59th Vehicular Technology Conference/ IEEE , 2004.
45. **G. Marfia, G. Pau, E. De Sena, E. Giordano, M. Gerla. 2007.** *Evaluating Vehicle Network Strategies for Downtown Portland: Opportunistic Infrastructure and the Importance of Realistic Mobility Models.* s.l. : 1st international MobiSys workshop on Mobile opportunistic networking (MobiOpp)/ACM., 2007.
46. **Behl, Madhur. 2008.** *Mobility Modeling of Swarm Robots ,.* s.l. : Department of Electronics and Electrical Communications Engineering/ Punjab Engineering College, 2008.
47. **T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, . 2002..** “A survey of mobility models for ad hoc network research,.” *A survey of mobility models for ad hoc network research,.* s.l. : in Wireless Communications mobile Computing (WCMC): Special Issue On Mobile Ad hoc Networking, Research, Trends and Applications, 2002., pp. pp. 483–502,.
48. **Helmy, F. Bai and A. 2006..** “A Survey of Mobility Models in Wireless Ad-Hoc Networks,.” Southern California : Kluwer Academic, 2006.
49. **Dimitrios Katsaros, Alexandros Nanopoulos, Yannis Manolopoulos. 2005.** *Wireless Information Highways.* USA, : Idea Group Inc, 2005.
50. **Kuiper, Erik. 2008.** *Mobility and Routing in a Delay-tolerant Network of Unmanned Aerial Vehicles.* Linköping, Sweden : Department of Computer and Information Science Linköping universitet, 2008.

51. **Biomo, Jean-Daniel Medjo Me. 2014** . *Unmanned Aeronautical Ad-hoc Networks: Enhancing the Reactive-Greedy-Reactive Protocol and Introducing a New Mobility Model*. Ottawa, Ontario : Carleton Institute for Electrical and Computer Engineering /Department of Systems and Computer Engineering/ Carleton University Ottawa, 2014 .
52. **Stepanov, Ilya. 2002**. *Integrating Realistic Mobility Models In Mobile Ad Hoc Network Simulation*. Stuttgart : Institut für Parallele und Verteilte Systeme (IPVS)/ University Stuttgart, 2002.
53. **Christina, Athanasiadou. 2009**. *Mobile Ad Hoc Networks (MANETs)* . Thessalonikh : University of Macedonia, 2009.
54. **J. A. Sauter, R. Matthews, H. V. D. Parunak, S. A. Brueckner. 2005**. *.Performance of Digital Pheromones for Swarming Vehicle Control*. Utrecht, The Netherlands : 4th international joint conference onAutonomous agents and multiagent systems (AAMAS)/ACM, 2005.
55. **H. V. D. Parunak, S. A. Brueckner, J. J. Odell. 2003**. *Swarming Coordination of Multiple UAV's for Collaborative Sensing*. San Diego , California : 2nd AIAA Unmanned Unlimited Systems Technologies and Operations Aerospace land and Sea Conference and Workshop & Exhibit., 2003.
56. **Ouns Bouachir, Alineo Abrassart, Fabien Garcia, Nicolas Larrieu. 2014**. *A Mobility Model For UAV Ad hoc Network*. Orlando, United States. : International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014.
57. **Luders, Brandon**. Robust Trajectory Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain Environments. s.l., Georgia, USA : Georgia Institute of Technology, 2006.
58. **José J. Ruz, Orlando Arévalo, Gonzalo Pajares ,Jesús M. de la Cruz**. UAV Trajectory Planning for Static and Dynamic Environments. s.l., Madrid, Spain : Complutense University of Madrid.
59. **Kuwata, Yoshiaki**. Real - time Trajectory Design for Unmanned Aerial Vehicles using Receding Horizon Control. Tokyo : University of Tokyo, 2001.
60. **G . G uglieri, F.B . Quagliotti G** . OPTIMAL TRAJECTORY TRACKING FOR AN AUTONOMOUS UAV. Torino, Italy : Speciale Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Aeronautica e Spaziale.
61. **Latombe, J. C**. Robot Motion Planning. s.l. : Kluwer Academic, 1 9 9 1.
62. **P. R . Chandler, M. Pachter**. Research Issues in Autonomous Control of Tactical UAVs. s.l., Washington, USA : Proceedings of the American Control Conference, 1 9 9 8.

63. **Manfred Morari, Alberto Bemporad** . Robust Model Predictive Control: A survey. Zurich, Switzerland : Automatic Control Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology.
64. **Αικατερίνη, Διαμαντή**. Στοχαστικός προβλεπτικός έλεγχος γραμμικών συστημάτων με περιορισμούς στις μεταβλητές εισόδου. Αθήνα, Ελλάδα : ΕΜΠ, 2011.
65. **Richards, A. G** . Trajectory Optimization using Mixed- Integer Linear Programming. Massachusetts, USA : Massachusetts Institute of Technology, June 2002.
66. **Richards A., Schouwenaars T., How J., Feron E.** Spacecraft Trajectory Planning With Collision and Plume Avoidance Using Mixed- Integer Linear Programming. s.l. : Journal of Guidance , Control and Dynamics, 2002.
67. **A. Richards, J. P. How.** Aircraft Trajectory Planning With Collision Avoidance Using Mixed Integer Linear Programming. s.l. : Proceedings of the American Control Conference, 2002 .
68. **Moitra, A., Mattheyses, R.M., Hoebel, L.J., Szczerba, R.J., Yamrom, B.** Multivehicle reconnaissance route and sensor planning. s.l. : IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003.
69. **Zheng, C., Li, L., Xu, F., Sun, F., Ding, M.** Evolutionary Route Planner for Unmanned Air Vehicles . s.l. : IEEE Transactions on Robotics, 2005.
70. **J. Bellingham, Y. Kuwata, and J. P. How.** Stable receding horizon trajectory control for complex environments. Austin, TX, USA : Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference,, 2003.
71. **Y. Kuwata, J. P. How.** Stable trajectory design for highly constrained environments using receding horizon control. Boston, USA : Proceedings of the IEEE American Control Conference, 2004.
72. **Antonio Barrientos, Pedro Gutiérrez, Julián Colorado.** Advanced UAV Trajectory Generation: Planning and Guidance . s.l., Spain : Universidad Politécnica de Madrid – (Robotics and Cybernetics Group) .
73. **PRUESS, STEVEN.** SPLINES AND THEIR APPLICATIONS. Colorado , USA : Department of Mathematical and Computer Sciences Colorado School of Mines Golden.
74. **Σαγκριώτης Μανώλης**. Εισαγωγή στα συστήματα τηλεπικοινωνιών. Αθήνα. Ελλάδα. ΕΚΠΑ.
75. **Καμαλάκης Θωμάς**. Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες. Αθήνα. Ελλάδα. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών.

76. **Κώστος Α. Βασίλειος.** Εισαγωγή στα συστήματα επικοινωνιών. Λαμία. Ελλάδα.2013.
77. **Black R.M .** The History of Electric Wires and Cables. London. UK. Peter Peregrinus LTD. 1983.
78. **Vern A. Dubendorf .** Wireless Data Technologies. John Wiley & Sons, Ltd. 2003
79. **Carson Mary Kay.** Alexander Graham Bell: giving voice to the world. New York.USA. Sterling Publishing Co. Inc. 2007
80. **Παναγιώτη Ασημακόπουλου.** Ηλεκτρομαγνητική θεωρία και πρακτική. Ιωάννινα.Ελλάδα. 1993.
81. **Τσιμπούκης Δ. Θεόδωρος.** Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, Βασική Θεωρία και Εφαρμογές, Τόμος Ι. Ηράκλειο Κρήτης. Ελλάδα.Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.2011.
82. **Nkiruka Ego Momah.** History of Wirelles Technology.
83. <http://www.heritage.nf.ca/articles/society/marconi-guglielmo.php>
84. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radio
85. http://www.ieee.ca/millennium/radio/radio_differences.html
86. **T.K. Sarkar Robert Mailloux , Arthur A. Oliner , M. Salazar- Palma, Dipac L. Sengupta.** HISTORY OF WIRELESS.John Willey and Sons . 2006
87. **ANTON A. HUURDEMAN, JOHN.** THE WORLDWIDE HISTORY OF TELECOMUNNICATION.WILEY AND SONS .2003
88. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_television
89. **Aleksandar Marinic. Djuradj Budimir.** Tesla's Multi-frequency Wireless Radio Controlled Vessel. IEEE
90. **The Life and Times of Nikola Tesla**
91. **Stanimir S. Valtchev^{1,2}, Elena N. Baikova¹, Luis R. Jorge.** ELECTROMAGNETIC FIELD AS THE WIRELESS TRANSPORTER OF ENERGY. Portugal. 2012
92. **Kurs Andre.** Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. AAAS.2007
93. **Baarman David. Schwannecke Joshua.** Understanding Wireless Power. Fulton Innovation.Usa. 2009

94. **Valavanis.K.P. Oh. P . PiegI. L.A.** Unmanned Aircraft Systems. International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles. Springer.2008
95. **Tiago C. S. Xavier, Elvio J. Leonardo, João A. Martini, Itana M. S. Gimenes and Luciana A. F. Martimiano.** Simulation of wireless channel for UAV communication.
96. **Mammadov Elchin.** Long-range Communication Framework for Autonomus UAVs. Ottawa. Canada. University of Ottawa. 2013
97. **Χατζηευφραιμίδης Αντώνιος. Σπαθόπουλος Βασίλης. Λελίγκου Αικ. – Ελένη. Αμοιράλης Ελ. Τσίλη Μαρίνα.** Έκθεση ανάλυσης παραμέτρων σχεδίασης ενός FSO. Χαλκίδα. Ελλάδα. 2013.
98. **Gu Daniel Lihui . Pei Guangyu . Ly Henry.Gerla Mario. Zhang Beichuan. Hong Xiaoyan.** UAV Aided Intelligent Routing for Ad-Hoc Wireless Network in Single-area Theater. Los Angeles. Usa. University of California.