

Επικοινωνία και Δικτύωση Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UNMANNED AIR VEHICLES)

Η Διπλωματική Εργασία
παρουσιάστηκε ενώπιον
του Διδακτικού Προσωπικού του
Πανεπιστημίου Αιγαίου

Σε Μερική Εκπλήρωση
των Απαιτήσεων για τον Μεταπτυχιακό Τίτλο
Τεχνολογίες Δικτύων Επικοινωνιών και Υπολογιστών

του
Αναστασιάδη Άρη
ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2016

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ
ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗ ΑΡΗ:

Βουγιούκας Δημοσθένης, Επιβλέπων, 17/03/2016
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

Σκιάνης Χαράλαμπος, Μέλος
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

Καλλίγερος Εμμανουήλ, Μέλος
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, αρχικά πραγματοποιείται μία ανασκόπηση των τρόπων χρησιμοποίησης των ΜΕΑ μέχρι σήμερα καθώς και των αποστολών τους μελλοντικά. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μία εκτενής ανασκόπηση της αρχιτεκτονικής, των λειτουργιών και των ειδών των χρησιμοποιούμενων ΜΕΑ καθώς και του ωφέλιμου φορτίου το οποίο φέρουν. Επίσης, υλοποιείται μία εκτενής ανασκόπηση των μεθόδων επικοινωνίας και δικτύωσης μεταξύ των ΜΕΑ από τον τομέα του χρησιμοποιούμενου φάσματος και των κεραιών μέχρι τους τρόπους επίτευξης ζεύξης και δικτύωσης μεταξύ των ΜΕΑ και των σταθμών βάσης καθώς και μεταξύ των ιδίων των ΜΕΑ μεταξύ τους στα πλαίσια δημιουργίας ιπτάμενων ad-hoc δικτύων. Τέλος, υλοποιείται μία εκτενής ανασκόπηση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την πρόσβαση στο κανάλι και δρομολόγηση των δεδομένων κατά τη δικτύωση των ΜΕΑ.

© 2016

του

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗ ΑΡΗ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ABSTRACT

In the context of this thesis there is initially, a review of the ways of UAV usage up to date as well as of their missions in the future. Following, a detailed description of the architecture, the functions and the kinds of the UAV used, is presented, while their payload is also mentioned. In addition there is a lengthy account ranging from the communication and networking methods used among UAV's in the field of the used spectrum and antennas, to the methods of connection attainment and networking among the UAV's and the base stations, as well as the UAV's themselves within the scope of creating flying ad-hoc networks. Finally, a detailed review of MAC and routing protocols, used to access the channel and arrange the route from the source to the destination, during the UAV's networking, is presented.

© 2016

ANASTASIADIS ARIS

Department of Information and Communication Systems Engineering

UNIVERSITY OF THE AEGEAN

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ – ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ

Ευχαριστώ το Θεό για την υπομονή και την καρτερικότητα που μας δίνει μέσα στο δύσκολο ταξίδι της ζωής. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου κύριο Βουγιούκα Δημοσθένη για την ανάθεση και επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς και όλους τους διδάσκοντες του τμήματος για τις παρεχόμενες γνώσεις καθώς και την υπομονή που επέδειξαν στο έργο τους. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, καθώς και την οικογένεια Διαμαντή, για την αμέριστη συμπαράσταση και υπομονή τους κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ.....	21
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ.....	21
1.2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ	28
1.3 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΧΡΟΝΙΑ.....	30
1.4 ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ	36
2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ	37
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΡΙΩΝ ΜΕΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	37
2.1.1 ΣΤΑΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL STATION-CS).....	38
2.1.2 ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΩΦΕΛΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (PAYLOAD SYSTEMS)...	38
2.1.3 ΤΟ ΑΕΡΟΟΧΗΜΑ.....	40
2.1.4 ΟΙ ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΧΡΗΣΤΗ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	42
2.1.5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	43
2.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΑ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΗΣ ΤΑΚΤΙΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	44
2.2.1 ΜΕΑ ΜΑΚΡΑΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΗΝΕΚΟΥΣ (LONG ENDURANCE-LONG RANGE).....	44
2.2.2 ΜΕΑ ΜΕΣΑΙΟΥ ΒΕΛΗΝΕΚΟΥΣ Η ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΦΥΣΕΩΣ (MEDIUM RANGE OR TACTICAL UAV-TUAV).....	48
2.2.3 ΜΕΑ ΜΙΚΡΟΥ ΒΕΛΗΝΕΚΟΥΣ (CLOSE RANGE UAV).....	50
2.2.4 MINI-ΜΕΑ (MINI UAV-MUAV).....	53
2.2.5 MICRO ΜΕΑ (MICRO UAV-MAV).....	53
2.2.6 NANO-ΜΕΑ (NANO AIR VEHICLES-NAV).....	54
2.2.7 ΜΕΑ ΜΑΧΗΣ (UNMANNED COMBAT AIR VEHICLE-UCAV).....	55
3. ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ.....	56
3.1 ΦΑΣΜΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	58
3.1.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΑΠΟ ΜΕΑ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟΥ ΡΑΔΙΟΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	60
3.1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΑΛΕΙΨΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ ΣΤΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟ ΦΑΣΜΑ ΤΩΝ ΜΕΑ.....	67

3.2 ΚΕΡΑΙΕΣ	72
3.2.1 ΕΙΔΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	73
3.3 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ	81
3.3.1 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ LTE (3GPP RELEASE 8).....	81
3.3.2 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ Α/Φ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	86
4. ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ. ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΚΑΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ	89
4.1 ΔΙΚΤΥΑ FANET.....	89
4.1.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ FANET.....	89
4.1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ FANET.....	90
4.1.3 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ FANET.....	92
4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 802.11 ΣΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ OSI.....	93
4.2.1 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 802.11.....	95
4.2.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ CSMA/CA ΣΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 802.11.....	96
4.2.3 CSMA/CA ΜΕ ΦΥΣΙΚΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	98
4.2.4 ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	101
4.3 MAC ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ FANET.....	103
4.4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ FANET.....	111
4.4.1 ΕΙΔΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	111
4.4.2 ΕΙΔΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (FLAT ROUTING).....	112
4.4.3 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΙΕΡΑΡΧΙΚΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (HIERARHICAL)..	116
4.4.4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΘΕΣΕΩΣ (GPS ASSISTED).....	119
4.4.5 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ (AERONAUTICAL ENVIRONMENT).....	122
4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ OSI (CROSS LAYER ARCHITECTURE)....	126
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	127

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Α/Α	ΟΝΟΜΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
1.	1. 1: Επενδύσεις του ΥΠΑΜ των ΗΠΑ σε UAS	22
2.	1. 2: Είδη ζεύξεων μεταξύ ΜΕΑ και σταθμού ελέγχου	24
3.	1. 3: Γραφική αναπαράσταση P2P σε σχέση με τα Wireless Networks	25
4.	1. 4: Σχηματισμός Σμήνους μεταξύ UAVs.	26
5.	1. 5 :α. Αναπαράσταση ενός επιχειρησιακού-δυναμικά μεταβαλλόμενου δικτύου. β. Απεικόνιση της τρισδιάστατης κίνησης των Α/Φ .	27
6.	1. 6: Το πρώτο αεριοπρωθούμενο περιστέρι.	28
7.	1. 7: Σύγκριση μεγέθους μεταξύ ενός μαχητικού Α/Φ και ενός UCAV.	30
8.	1.8 :Μεταφερόμενος Οπλισμός από ένα UCAV.	31
9.	1.9: Δίκτυο-κεντρική αρχιτεκτονική	32
10.	1.10: Αποστολή Αναγνώρισης ΜΕΑ	34
11.	1.11: Κατάδειξη στόχου από ΜΕΑ	34
12.	1.12: Εξέλιξη των ΜΕΑ στο Μέλλον	36
13.	2. 1: Λειτουργικά Υποσυστήματα ενός UAS	37
14.	2. 2: α.) Επικοινωνιακές απαιτήσεις λειτουργίας αισθητήρων β.) Κλιμάκωση των συστημάτων αισθητήρων κατά κατηγορία ΜΕΑ γ.) Αποτύπωση των κύριων υποσυστημάτων αισθητήρων κατά ΜΕΑ	39
15.	2. 3: Κύρια μέρη ενός αεροοχήματος	41
16.	2. 4: Δίκτυο- κεντρικές επιχειρήσεις	42
17.	2. 5: Κατηγορίες συστημάτων ΜΕΑ	43
18.	2. 6: Κλιμάκωση κατά βάθος των συστημάτων ΜΕΑ	43
19.	2. 7: RQ-4 Global Hawk	44
20.	2. 8: Αισθητήρες και υποσύστημα επικοινωνιών του ΜΕΑ	45

	RQ-4 Global Hawk	
21.	2. 9: Αισθητήρες και υποσύστημα επικοινωνιών του MQ-9 Predator	46
22.	2. 10: MQ-5B Hunter	48
23.	2. 11: MQ-8C Fire Scout	49
24.	2. 12: RQ-2 Pioneer	50
25.	2. 13: MEA Sprite	51
26.	2. 14: RQ-11 Raven	52
27.	2. 15: MEA Indago	53
28.	2. 16: MEA Hummingbird	53
29.	2. 17: UCLASS X-47B	54
30.	3. 1: Ιεραρχική διαδοχή λειτουργιών ελέγχου σε ένα MEA	55
31.	3.2: α.) Τρόποι Επικοινωνίας μεταξύ MEA και σταθμού βάσης. β.) Σχηματισμός δικτύωσης μεταξύ MEA	56
32.	3.3: Η κατανομή του διαθέσιμου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος	57
33.	3. 4: Επέκταση του LOS ανάλογα με το ύψος	58
34.	3. 5: Τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές στην κατανομή του χρησιμοποιούμενου ραδιοφάσματος	58
35.	3. 6: Κατανομή του ραδιοφάσματος αναλόγως του οργανισμού	59
36.	3. 7: Τομείς κύριων λοβών εκπομπής συστήματος ILS	60
37.	3. 8: ILS Localizer	60
38.	3. 9: Ground Based Augmentation System	61
39.	3. 10: Σταθμός εκπομπής VOR/VORTAC	61
40.	3. 11: Secondary Surveillance Radar	62
41.	3. 12: Traffic Alert and Collision Avoidance System	63
42.	3. 13: Σύστημα Traffic Information Service Broadcast	64
43.	3. 14: Σύστημα GPS	65
44.	3. 15: Αεροναυτικές Ζώνες που είναι δυνατή η χρήση τους από UAS	65
45.	3. 16: Απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης αναλόγως της	68

	λειτουργίας	
46.	3. 17: Διαμόρφωση OFDM με 1 και 5 υπό-κανάλια	69
47.	3. 18: Σχηματική αναπαράσταση CDMA	70
48.	3. 19: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου εξάπλωσης φάσματος	70
49.	3. 20: Κύριος και δευτερεύοντες λοβοί εκπομπής	71
50.	3. 21: Εύρος Δέσμης και Απολαβή Κεραίας	72
51.	3. 22: Πολυκατευθυντική Κεραία λ/4	73
52.	3. 23: Διάγραμμα εκπομπής αναλόγως της διάταξης	73
53.	3. 24: Τυπική διάταξη και διάγραμμα εκπομπής κατευθυντικής κεραίας Yagi Uda	74
54.	3. 25: Κεραία παραβολικού κατόπτρου	75
55.	3. 26: Διάμετρος του ανακλαστήρα ανάλογα με την συχνότητα	75
56.	3. 27: Κύρια μέρη παραβολικού κατόπτρου	76
57.	3. 28: Διάγραμμα εκπομπής πρισματικής κεραίας	76
58.	3. 29: Διάγραμμα εκπομπής πρισματικής κεραίας με πηγή εισόδου χοανοκεραία	77
59.	3. 30: Πρισματική κεραία με πηγή εισόδου ράδιο-μικρολωρίδες	77
60.	3. 31: Κεραία Switched beam MEA Predator	78
61.	3. 32: α.) Διάταξη συμπαρατεταγμένων στοιχείων β.) Εκπομπή με διαφορά φάσης	79
62.	3. 33:α.) Κεραία Adaptive Array για εκπομπή σε ένα επίπεδο β.) Κεραία Adaptive Array για εκπομπή σε δύο επίπεδα	79
63.	3. 34: Αρχιτεκτονική του πρότυπου LTE	81
64.	3. 35: Διαστρωμάτωση πρωτοκόλλου LTE	82
65.	3. 36: Λειτουργίες του πρωτόκολλου LTE	83
66.	3. 37: Αναπαράσταση του μηχανισμού ARQ-HARQ	83
67.	3. 38: Διαδικασία κατάληψης του μέσου	84
68.	3. 39: Επικοινωνία των MEA με τη χρήση επίγειου δικτύου	84
69.	3. 40: Διαχωρισμός των εναερίων ζωνών αναλόγως της	86

	ποιότητας του σήματος	
70.	3. 41: Επικοινωνία ΜΕΑ με τη χρήση επίγειου UMTS-3G δικτύου μέσω αναμεταδοτών	87
71.	4. 1: Διαφορές στα χαρακτηριστικά μεταξύ των ad-hoc δικτύων	89
72.	4. 2: Επέκταση της ακτίνας κάλυψης με τη συνεργασία πολλαπλών ΜΕΑ	90
73.	4. 3: Δικτύωση μεταξύ ΜΕΑ	91
74.	4. 4: α.) Το μοντέλο OSI, β.) Το μοντέλο TCP/IP	93
75.	4. 5: Αντιστοιχία διαστρωμάτωσης μεταξύ μοντέλων OSI και TCP/IP	94
76.	4. 6: Μηχανισμός CSMA/CA με τη χρήση CTS/RTS και ACK	96
77.	4. 7: Μηχανισμός CSMA/CA	96
78.	4. 8: Σχέσεις μεταξύ των διαστημάτων IFS	96
79.	4. 9: CSMA/CA με Φυσική Ανίχνευση Φέροντος	97
80.	4. 10: Διάγραμμα Αύξησης του CW	100
81.	4. 11: CW αναλόγως του συστήματος μετάδοσης	100
82.	4. 12: Διαδικασία χειραψίας "handshake"	101
83.	4. 13: Το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού	102
84.	4. 14: Το πρωτόκολλο SWAMP α.) Πρόσβαση με την OC, β.) Πρόσβαση με την EC	104
85.	4. 15: Μηχανισμός MMAC	105
86.	4. 16: Μηχανισμός φυσικής και εικονικής ανίχνευσης φέροντος	106
87.	4. 17: Μηχανισμός κυκλικής αποστολής RTS	106
88.	4. 18: Polling Based MAC	107
89.	4. 19: Toned Based MAC	107
90.	4. 20: Το πρωτόκολλο RACSS	108
91.	4. 21: Target Information Table	109
92.	4. 22: Μηχανισμός DCF στο πρωτόκολλο AMAC_UAV	109
93.	4. 23: Πρωτόκολλα δρομολόγησης για ad-hoc δίκτυα	111
94.	4. 24: Διαδικασία ανταλλαγής πακέτων HELLO	112

95.	4. 25: Διαδικασία εκλογής MPR	112
96.	4. 26: Το πρωτόκολλο OLSR	113
97.	4. 27: Σύγκριση πρωτοκόλλων επίπεδης δρομολόγησης	115
98.	4. 28: Αλγόριθμος δρομολόγησης CGSR	116
99.	4. 29: Zone routing Protocol	117
100.	4. 30: Σύγκριση πρωτοκόλλων ιεραρχικής δρομολόγησης	117
101.	4. 31: Πρωτόκολλο GEOCAST	118
102.	4. 32: Πρωτόκολλο Location Aided Routing	119
103.	4. 33: Σύγκριση πρωτοκόλλων GPS assisted	120
104.	4. 34: Πρωτόκολλο Anticipatory Routing	122
105.	4. 35: Πρωτόκολλο Spray Routing	123
106.	4. 36: Πρωτόκολλο DOLSR	123
107.	4. 37: Πίνακας επιλογής MPR κατά το OLSR και κατά το DOLSR	124
108.	4. 38: Διαδικασία επιλογής MPR's κατά το DOLSR	124
109.	4. 39: Cross Layer Architecture	125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

Α/Α	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
1.	Α/Φ	Αεροσκάφος
2.	ΜΕΑ	Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος
3.	ΡΒΧΠ	Ραδιολογικές Βιολογικές Χημικές Πυρηνικές
4.	ΠΕΝ	Περιοχή Ενδιαφέροντος
5.	ΠΕΠ	Περιοχή Επιχειρήσεων
6.	Α2Α	Air to Air
7.	Α2/ΑΔ	Anti access-Area Denial
8.	Α2Γ	Air to Ground
9.	ΑΑΙ	Aircraft Armament Inc
10.	ΑCΣ	Aircraft Control Station
11.	ΑFΣ	Aeronautical Fixed Service
12.	ΑΜ(Ρ) Σ	Aeronautical Mobile (R) Service
13.	ΑΜS(Ρ) Σ	Aeronautical Mobile Satellite (R) Service
14.	ΑΜUAV	Adaptive Mac Protocol for UAV
15.	ΑΟΔV	Ad-Hoc On Demand Broadcast Route Discovery
16.	ΑΡNS	Aeronautical Radio Navigation Service
17.	ΑΡPAM	Ad-Hoc Routing Protocols for Aeronautical Mobile Ad-hoc Networks
18.	ΑΡQ	Automatic Repeat re-Quest
19.	ΑΤC	Air Traffic Controller
20.	ΑΤCΡBS	Air Traffic Control Radar Beacon System
21.	ΑΤS	Air Traffic Service
22.	ΒΕB	Binary Exponential Back Off
23.	ΒΕR	Bit Error Rate
24.	ΒLOS	Beyond Line of Sight
25.	ΒΤS	Base Transceiver Station
26.	C2	Command and Control
27.	C3	Command Control Communication

28.	CAS	Close Air Support
29.	CBRN	Chemical Biological-Radiological-Nuclear
30.	CC	Control Channel
31.	CDMA	Code Division Multiple Access
32.	CGSR	Cluster-head Gateway Switch Routing
33.	COBRA	Coastal Battlefield Reconnaissance and Analysis
34.	COMMINT	Communication Intelligence
35.	COTS	Commercial Off The Shelf- Gov- Cots
36.	CR-UAV	Close Range UAV
37.	CS	Control Station
38.	CSI	Channel State Information
39.	CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
40.	CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
41.	CTR	Close Target Recognition
42.	CTS	Clear to Send
43.	CW	Contention Window
44.	DAG	Directed Acyclic Graph
45.	DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
46.	DASH	Drone Anti-Submarine Helicopter
47.	DC	Data Channel
48.	DCF	Distributed Coordination Function
49.	DFT	Discrete Fourier Transmission
50.	DIFS	Distributed coordination function Inter Frame Space
51.	D/GMTI	Dismount-Ground Moving Target Indicator
52.	DMAC	Directional Medium Access Control
53.	DME	Distance Measuring Equipment
54.	DNAV	Directional Network Allocation Vector
55.	DoA	Direction of Arrival
56.	DOLSR	Directional Optimized Link State Routing Protocol
57.	DREAM	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility

58.	DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
59.	DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
60.	DSR	Dynamic Source Routing
61.	DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
62.	DS/FH SS	Direct Sequence Frequency Hopping Spread Spectrum
63.	EASA	European Aviation Safety Agency
64.	EC	Extended transmission range Communication mode
65.	EIFS	Extended Inter Frame Space
66.	ELINT	Electromagnetic Intelligence
67.	EMC	Electromagnetic Compatibility
68.	EPC	Evolved Packet Core
69.	EPS	Evolved packet system
70.	EO	Electro Optic
71.	E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
72.	EUROCAE	European Organisation for Civil Aviation Equipment
73.	ES	Extended Squitter
74.	FAA	Federal Aviation Administration
75.	FANET	Flying Ad-hoc Network
76.	FDD	Frequency Division Duplex
77.	FDM	Frequency Division Multiplexing
78.	FH-CDMA	Frequency Hopping Code Division Multiple Access
79.	FHSS	Frequency Hoping Spread Spectrum
80.	FMV	Full Motion Video
81.	FSLs	Fuzzy Sighted Link State
82.	FSR	Fisheye State Routing
83.	FSS	Fixed Satellite Service
84.	GBAS	Ground- Based Augmentation System
85.	GBU	Guided Bomb Unit
86.	GCS	Ground Control Station
87.	GEOCAST	Geographic Addressing and Routing
88.	GNSS	Global Navigation Satellite System

89.	GPS	Global Position System
90.	GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
91.	HALE	High Altitude Long Endurance
92.	HARQ	Hybrid Automatic Repeat re-Quest
93.	HTOL	Horizontal Take Off/ Landing
94.	HSR	Hierarchical State Routing
95.	HSI	Hyper Spectral Imaging
96.	IAI	Israel Aircraft Industries
97.	ICAO	International Civil Aviation Organization
98.	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
99.	IFF	Identification Friend or Foe
100.	ILS	Instrument Landing System
101.	IMU	inertial measurement unit
102.	INS	Inertial Navigation System
103.	IR	Infrared
104.	ISR	Intelligence Surveillance Reconnaissance
105.	ITU	International Telecommunications Union
106.	ITU/WRC	World Radio- Communication Conference
107.	JDAM	Joint Direct Attack Munition
108.	JTIDS- MIDS	Joint Tactical- Multifunctional Information Distribution System
109.	LANMAR	Landmark Ad-hoc Routing Protocol
110.	LAR	Location Aided Routing
111.	LI	Location Information
112.	LNB	Low Noise Block
113.	LOS	Line Of Sight
114.	LPI	Probability Interception and Detect
115.	LR/LD	Long Range Laser Designator/Range Finder
116.	LSU	Link State Update
117.	LTE	Long Term Evolution
118.	LU	Location Update
119.	MAGINT	Magnetic Intelligence

120.	MALE	Medium Altitude Long Endurance
121.	MANET	Mobile ad-hoc Networks
122.	MAV	Micro UAV
123.	MC-CDMA	Multi –Carrier Code Division Multiple Access
124.	MEO	Medium Earth Orbit
125.	MIMO	Multiple In Multiple Out
126.	Mini-UAV	Miniature UAV
127.	MMAC	Multihop MAC
128.	MPRs	MultiPoint Relays
129.	MR-UAV	Medium Range UAV
130.	MSI/HSI	Multispectral/ Hyperspectral Imagery
131.	MTS	Multi-Spectral Targeting System
132.	MUDOR	Multipath Doppler Routing Algorithm
133.	MWAS	Maritime Wide Area Search
134.	NAV	Nano MEA
135.	NAV	Network Allocation Vector
136.	NHDI	Next Hop Direction Information
137.	NIIRS	National Image Interpretability Rating Scales
138.	NOTAM	Notice to Airmen
139.	OC	Omnidirectional transmission range Communication Mode
140.	OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
141.	OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
142.	OSI	Open System Interconnection
143.	PDCP	Packet Data Convergence Protocol
144.	P-GW	Packet Data Gateway
145.	PIFS	Point coordination function Inter Frame Space
146.	PNT	Position Navigation Timing
147.	PSK	Phase Shift Keying
148.	QAM	Quadrature Amplitude Modulation
149.	QoS	Quality of Service
150.	RA	Random Access

151.	RACSS	Receiver Initiated Access Control with Sender Scheduling
152.	RF	Radio Frequency
153.	RLC	Radio Link Control
154.	RNSS	Radio Navigation Satellite Service
155.	ROMA	Receiver Oriented Multiple Access
156.	RPA	Remotely Piloted Aircraft
157.	RUAV	Relay UAV
158.	RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
159.	RTS	Request to Send
160.	SAR	Synthetic Aperture Radar
161.	SATCOM	Satellite Communications
162.	SC- FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
163.	SCS	Ship control Station
164.	SEAD	Suppression of Enemy Air Defence
165.	S-GW	Serving Gateway
166.	SIFS	Short Inter Frame Space
167.	SIGINT	Signal Intelligence
168.	Sprite	Surveillance Patrol Reconnaissance Intelligence Target Designation Electronic Warfare
169.	SR-UAV	Short Range UAV
170.	STRATO-UAV	Stratospheric UAV
171.	STUAS	Small Tactical Unmanned Aircraft Systems
172.	SSMA	Spread Spectrum Multiple Access
173.	SSR	Secondary Surveillance Radar
174.	SWAMP	Smart Antennas Based Wider-range Access MAC Protocol
175.	TACAN/VORTAC	Tactical Air Navigation Systems/ VHF Omnidirectional Range Tactical
176.	TBRPF	Topology Broadcast Based on Reverse Path Forwarding
177.	TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System
178.	TCDL	Tactical Common Data Link

179.	TDD	Time Division Duplex
180.	TH-CDMA	Time Hopping Code Division Multiple Access
181.	TIT	Target Information Table
182.	TORA	Temporarily Ordered Routing Algorithm
183.	TRAN	Terrestrial Radio Access Network
184.	TUAV	Tactical UAV
185.	UAS	Unmanned Air Systems
186.	UAV	Unmanned Air Vehicle
187.	UAT	Universal Access Transceiver
188.	UCARS	UAV Common Automated Recovery System
189.	UCAV	Unmanned Combat Aircraft Systems
190.	UCLASS	Unmanned Carrier Launched Airborne Surveillance and Strike
191.	UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
192.	UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
193.	USAF	United States Air Force in Afghanistan
194.	VLOS	Visual Line of Sight
195.	VOR	VHF Omnidirectional Range
196.	VTOL	Vertical Take Off/Landing Systems
197.	WAS	Wide Area Scanning
198.	ZRP	Zone Routing Protocol

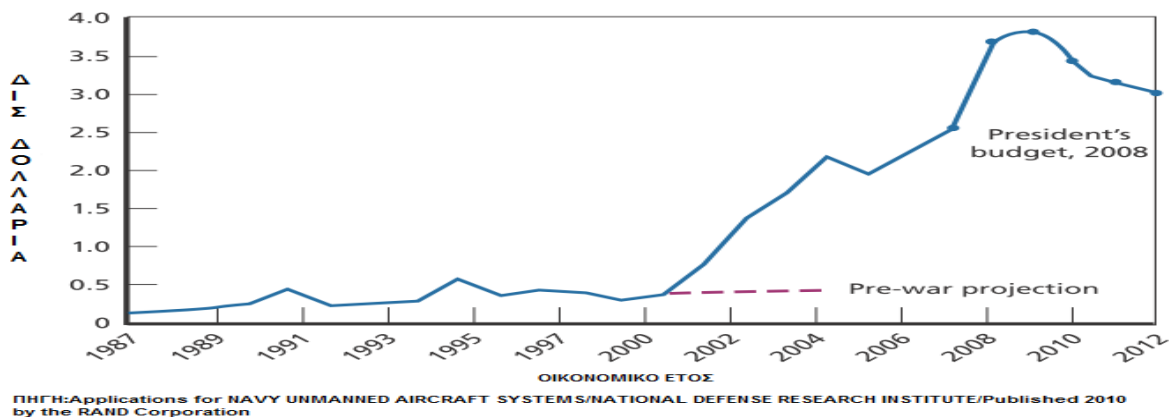
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ

- Η σύγχρονες αντιλήψεις στην παγκόσμια πολεμική και πολιτική βιομηχανία σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα της ρομποτικής και χρήσεως των ρομπότ γενικότερα έχει οδηγήσει στην ευρεία εγκαθίδρυση των μη επανδρωμένων συστημάτων σε όλες τις εκφάνσεις της παραγωγής αλλά και των εφαρμογών αυτής σε περιπτώσεις που διακυμαίνονται από την καθημερινή μας ζωή και την «χάραξη μίας πορείας στο σκάφος ενός φίλου» μέχρι την εκμείωση πληροφοριών οι οποίες προέρχονται από ανάλυση του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος Magnetic Intelligence (MAGINT), για την διαπίστωση δοκιμής Ραδιοβιοχημικών Όπλων[1]. Ο όρος συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών(Unmanned Air Vehicles-UAV's- Unmanned Air Systems-UAS's) ή Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (ΜΕΑ) ο οποίος υιοθετήθηκε αρχικά από το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών το 2005 για την περιγραφή του εξοπλιστικού τους προγράμματος, περιλαμβάνει οχήματα τα οποία μπορούν τα πετάνε ή να ίπτανται στην ατμόσφαιρα ενάντια στην δύναμη της βαρύτητας εξαιτίας της αρχής του Αρχιμήδη και εξαιτίας της άντωσης που προκαλεί ένα φτερό, τα οποία όμως δεν κατευθύνονται από πιλότο (Remotely Piloted Aircraft RPAs)-ICAO (International Civil Aviation Organization) - Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας Εγκύκλιος 328-AN/190)[2] αλλά κατευθύνονται από ένα σταθμό εδάφους (Ground Control Station-GCS) μέσω τηλεχειρισμού ή υπολογιστών (Command and Control Link) οι οποίοι βρίσκονται μέσα στο αεροσκάφος. Εκτός από τους όρους UAV και UAS έχει επικρατήσει και ο όρος «Drones» ή «Aero drones» όταν αναφερόμαστε σε ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος (Α/Φ). Τα συστήματα UAV αρχικά δημιουργήθηκαν για την εξυπηρέτηση στρατιωτικών αντικειμενικών σκοπών αλλά γρήγορα η αξία της χρήσης τους μετουσιώθηκε και σε μη στρατιωτικές εφαρμογές όπως η φρούρηση και η επίβλεψη των αγωγών μεταφοράς ενέργειας, η καταστολή πυρκαγιών, η αστυνόμευση των πόλεων, ο ψεκασμός των καλλιεργειών, η βιντεοσκόπηση για ιδιωτικούς σκοπούς καθώς και πολλές άλλες επιστημονικές και μη εφαρμογές. Η φιλοσοφία χρησιμοποίησης των UAV's είναι βασισμένη στην εξοικονόμηση ανθρώπινων πόρων από αποστολές οι οποίες θα ενέθεται πολύ μεγάλο ρίσκο κινδύνου για το προσωπικό που θα συμμετείχε σε αυτές λόγω θνησιμότητας, μόλυνσης από Χημικές- Βιολογικές- Ραδιολογικές και Πυρηνικές-PBXΠ (CBRN-Chemical-Biological-Radiological-Nuclear)[3] ουσίες καθώς και η εξασφάλιση προσωπικού από πολλαπλές εργασίες ρουτίνας οι οποίες μπορούν να επιτευχθούν από αυτά όπως οι αποστολές αναζήτησης πληροφοριών- επιτήρησης και αναγνώρισης-ISR (Intelligence- Surveillance- Reconnaissance) . Επίσης η χρησιμοποίηση UAV τα οποία θα υπερίπτανται πάνω από περιοχές οι οποίες ευρίσκονται υπό την κυριαρχία ενός κράτους και στις οποίες θα είναι δυνατή η υπέρ-πτήση πολιτικών επανδρωμένων Α/Φ θα πρέπει να έρχεται σε

αρμονία με τις διατάξεις ασφαλείας του κράτους στο οποίο υπάγεται η περιοχή για την εξασφάλιση πρωτίστως της ασφάλειας των επανδρωμένων αεροσκαφών- (1944 Σύμβαση του Σικάγου, άρθρο 8)- (Κανονισμός ΕΕ Αριθ. 216/2008) [4]-[5]-[6]. Η παραγωγή και η χρήση των UAVs έχει πολύ παλαιότερες ρίζες στον 19^ο αιώνα (Βλέπε ιστορική αναδρομή) η οποία όμως έχει «εκτιναχθεί» από το 2001 από τις Ηνωμένες Πολιτείες οι οποίες έχουν προσπορίσει υπέρ του Υπουργείου Εθνικής Αμύνης DoD (Department of Defence) μεγάλο αριθμό προγραμμάτων UAS- UCAV (Unmanned Aircraft Systems- Unmanned Combat Aircraft Systems) τα οποία περιελάμβαναν συστήματα HALE (High Altitude Long Endurance), είτε μεσαίου ή χαμηλού ύψους και διαρκείας MALE, τα οποία μπορεί να είναι είτε HTOL (Horizontal Take Off/ Landing Systems), είτε VTOL (Vertical Take Off/Landing Systems), είτε STUAS (Small Tactical Unmanned Aircraft Systems) είτε Χαμηλού εύρους MEA (Close Air UAV) (**Σχήμα1. 1**). Η «ακόρεστη», όπως χαρακτηρίστηκε από τον Αρχηγό του Γενικού Επιτελείου Ενόπλων Δυνάμεων των ΗΠΑ το 2005[7],ανάγκη για την παραγωγή συστημάτων UAS ικανοποιούσε πλειάδα εφαρμογών οι οποίες όμως για να είναι βιώσιμες στο θέατρο των επιχειρήσεων έναντι των εχθρικών αντενεργειών παρεμβολής, ανίχνευσης και στοχοποίησης των UAVs προϋπέθεταν την υιοθέτηση μεθόδων Χαμηλής Πιθανότητας Εντοπισμού και Ανίχνευσης (Low Probability Interception and Detect- LPI) μετρίζοντας είτε τον ρυθμό αποστολής δεδομένων, είτε θέτοντας αναμεταδότες σε πολύ μεγάλο ύψος λειτουργίας >55.000 ποδών, εκπέμποντας μεγάλης διάρκειας βεληνεκούς επανδρωμένα και μη Α/Φ (relays) εκτός του LOS (Line Of Sight) των οπλικών συστημάτων ανίχνευσης και των παρεμβολέων (jammers) των UAVs, είτε μέσω επεξεργασίας των δεδομένων με διάφορες μεθόδους και την αποστολή των επεξεργασμένων προϊόντων απευθείας, συμπιεσμένων, στους αναμεταδότες ή στους σταθμούς χειρισμού εδάφους.

Επενδύσεις του ΥΠΑΜ των ΗΠΑ σε UAS



Σχήμα 1. 2: Επενδύσεις του ΥΠΑΜ των ΗΠΑ σε UAS

Οι κυριότερες εφαρμογές των MEA οι οποίες και αναλύονται στο κυρίως μέρος της μελέτης είναι:

Στο στρατιωτικό τομέα εφαρμογής:

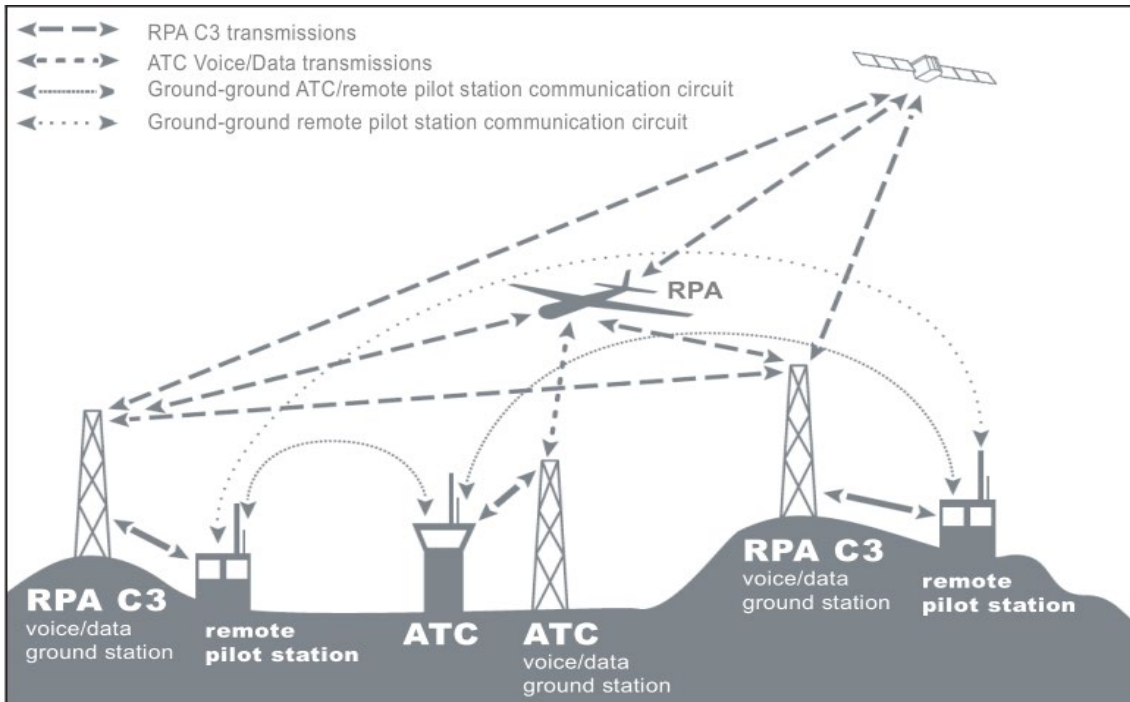
- Προσβολή στα μετόπισθεν- Penetrating Strike.

- Συλλογή Πληροφοριών-Επιτήρηση- Αναγνώριση στα μετόπισθεν- Penetrating ISR (Intelligence Surveillance- Reconnaissance) .
- Συλλογή Πληροφοριών από την εκμετάλλευση των τηλεπικοινωνιακών εκπομπών και δραστηριοτήτων του αντιπάλου- Communication Intelligence (Commint).
- Συλλογή Πληροφοριών από την εκμετάλλευση των εκπομπών των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. ELINT (Electromagnetic Intelligence).
- Ηλεκτρονικός Πόλεμος από αέρα.
- Αποστολές Καταστολής της Εχθρικής Αεράμυνας-SEAD (Suppression of Enemy Air Defence).
- Αποστολές Εγγύς Αεροπορικής Υποστήριξης-CAS (Close Air Support).
- Αποστολές ανίχνευσης Χημικών Ραδιοβιολογικών και Πυρηνικών ΡBΧΠ ουσιών (CBRN- Chemical Biological Radiological Nuclear).

Στον πολιτικό τομέα εφαρμογής:

- Λήψη Βίντεο και Αεροφωτογραφιών.
- Ράντισμα και παρακολούθηση καλλιερχειών.
- Έρευνα και Διάσωση μέσω επιτήρησης των ακτών και θαλασσών.
- Παρακολούθηση της ρύπανσης της γης.
- Έλεγχος των τελωνειακών ζωνών.
- Παρακολούθηση και έλεγχος των γραμμών μεταφοράς ενέργειας.
- Ανίχνευση και παρακολούθηση πυρκαγιών.
- Επιτήρηση των αγωγών μεταφοράς ενέργειας.
- Λήψη στοιχείων για χαρτογράφηση.
- Έλεγχος της κίνησης και επιτήρηση του οδικού δικτύου.
- Λήψη ατμοσφαιρικών δεδομένων για μετεωρολογικές υπηρεσίες .

Οι επικοινωνιακές απαιτήσεις για τα MEA καθορίζονται λαμβάνοντας υπόψη πολλούς παράγοντες ανάμεσα στους οποίους είναι η αλληλεπιδράσεις της διεπαφής του χρήστη με τα μέσα, οι λειτουργίες που υποστηρίζονται καθώς και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο υλοποιείται η ζεύξη του MEA με τον GCS. Οι συνήθεις διαδικασίες οι οποίες υλοποιούνται κατά την επικοινωνία μεταξύ των τμημάτων σταθμού ελέγχου κυκλοφορίας εδάφους (ATC-Air traffic Control ή GCS Ground Control Station) και του MEA (RPAS-Remote Piloted Air System ή UAV) ενός UAS (Unmanned Air System) απαιτούν συνήθως την σύζευξη μεταξύ τμημάτων εδάφους και αέρα, εδάφους- εδάφους και αέρα-αέρα (**Σχήμα 1.2**).



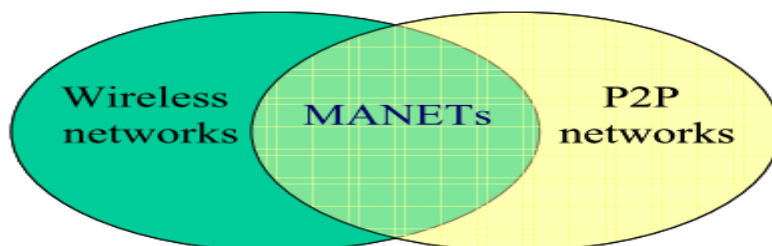
Σχήμα 1. 2: Είδη ζεύξεων μεταξύ ΜΕΑ και σταθμού ελέγχου.

Οι τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν ήδη καθιερωμένα πρότυπα καθώς και νέες καινοτόμες διαδικασίες για την υλοποίηση των οποίων χρειάζεται η έγκρισή και η εγκαθίδρυσή τους από τις αρμόδιες αρχές (πχ. ICAO), καθορίζουν τρόπους λειτουργικής επικοινωνίας (operational communication), συνδέσεις C2 (command and control), υποδομή, φάσμα προστατευόμενων συχνοτήτων και ασφάλειας επικοινωνιών[2].

Το χρησιμοποιούμενο ραδιοφάσμα για την επιτυχή διεύθυνση και τον έλεγχο C2 (Command and Control) των ΜΕΑ καθώς και για την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων από παρεμβολές αποτελείται από ξεχωριστές ζώνες καθιερωμένες από την ITU (International Telecommunications Union) οι οποίες δε, αναλόγως της απόστασης και του χρόνου απόκρισης των ΜΕΑ προβλέπουν την χρησιμοποίηση VHF και UHF συχνοτήτων για κοντινές και εντός του VLOS (Visual Line of Sight) αποστάσεις, ενώ μακρινότερες συνηθέστερη λύση αποτελούν οι δορυφορικές επικοινωνίες-SATCOM (Satellite Communications) και οι συχνότητες HF. Οι απαιτήσεις για την επιτυχή πλοήγηση ενός ΜΕΑ προϋποθέτουν την ύπαρξη είτε αναλογικής είτε ψηφιακής σύνδεσης του σταθμού ελέγχου εδάφους με τον συντονιστή εναέριας κυκλοφορίας-ATC (Air Traffic Control) για την παροχή και ενημέρωση πληροφοριών που αφορούν τον αέρα όπως έκδοση NOTAM (Notice To Airmen)[11]. Οι επικοινωνίες μεταξύ των ΜΕΑ θα πρέπει να επιτυγχάνουν τα ίδια επίπεδα διαθεσιμότητας (availability), αξιοπιστίας (reliability), συνέχειας(continuity) και ακεραιότητας(integrity) τα οποία εφαρμόζονται και στα επανδρωμένα Α/Φ, καθώς οι διατάξεις για την ασφάλεια κατά την αεροπλοΐα θα πρέπει να τηρούνται όπως και κατά την πτήση των επανδρωμένων Α/Φ[2].

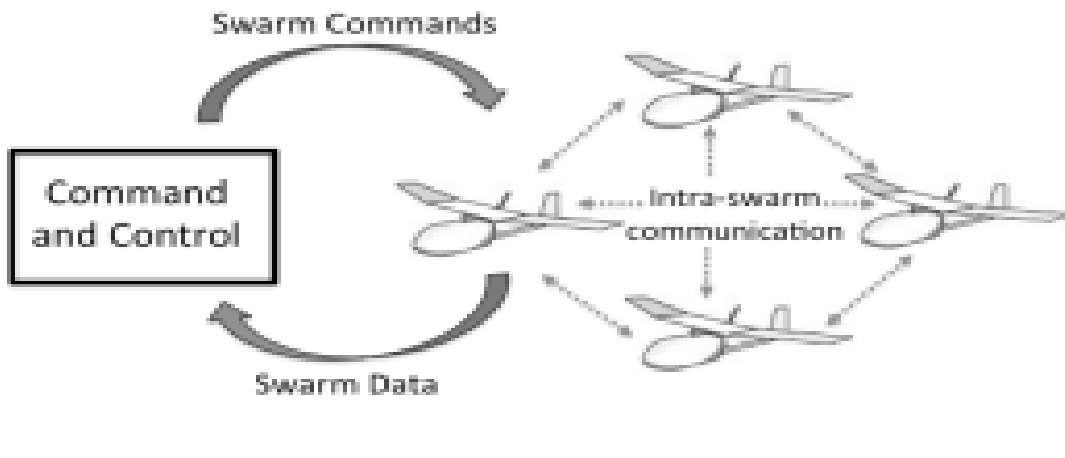
Για την επιβίωση τους κατά την εκπλήρωση της αποστολής τους τα ΜΕΑ εξαρτώνται άμεσα και σε απόλυτο βαθμό από τα συστήματα Εντοπισμού Θέσης-Πλοήγησης και Συγχρονισμού (Position Navigation Timing-PNT) όπως το GPS (Global Position System) καθώς και από τις ραδιοφασματικές δυνατότητες επίτευξης ζεύξης για την αποστολή δεδομένων με τους σταθμούς ελέγχου και για τον συντονισμό με άλλα

ΜΕΑ. Η φιλοσοφία στην οποία στηρίζονται τα ΜΕΑ για την επικοινωνία και την δικτύωσή τους βασίζεται στην δημιουργία ασύρματων κινητών ad-hoc δικτύων (MANET) τα οποία αποτελούνται από κινητούς ασύρματους κόμβους οι οποίοι σχηματίζουν προσωρινά ένα δυναμικό δίκτυο στο οποίο εξαιτίας της στέρσης δομής μπορεί να παίρνουν τον ρόλο είτε του κόμβου (node) είτε του δρομολογητή (switcher). Οι αρχιτεκτονικές των δικτύων τις οποίες σχηματίζουν μεταξύ τους τα ΜΕΑ μπορεί να είναι α.) μέσω απευθείας σύνδεσης, β.) με τη χρήση δορυφορικών αναμεταδοτών, γ.) με κυψελωτά συστήματα και δ.) με δίκτυα ad-hoc. Οι τεχνικές μετάδοσης των MANET επιτυγχάνονται είτε μέσω απευθείας μετάδοσης, multi-hop αναμετάδοσης από ενδιάμεσους κόμβους και είτε μέσω μετάδοσης μέσω ενός κόμβου που κινείται φυσικά μεταξύ των πηγών και προορισμών[15]. Οι τοπολογίες οι οποίες υλοποιούνται, επιτυγχάνονται με την χρήση δικτύων επικάλυψης Peer to Peer(ομότιμα) πάνω σε κατανεμημένα mobile Ad Hoc δίκτυα, είτε με αδόμητη και ολοκληρωμένη σχεδίαση (αδόμητο P2P ενσωματώνεται με τις λειτουργίες ενός MANET) [10], είτε μέσω ευέλικτων (agile) μεθόδων οι οποίες ενοποιούν παλιές λειτουργίες με τα τις νέες τεχνολογίες που έχουν βελτιστοποιήσει την απόδοση τους μέσω τις εκμετάλλευσης των χαρακτηριστικών των ομότιμων (peer to peer) κατανεμημένων δικτύων αυξάνοντας παράλληλα την διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφόρων επιπέδων ελέγχου[13] (Σχήμα 1. 3) .



Σχήμα 1. 3: Γραφική αναπαράσταση P2P σε σχέση με τα Wireless Networks.

Αρχικά η φιλοσοφία της χρήσης των ΜΕΑ προϋπέθετε την ύπαρξη ισάριθμων σταθμών ελέγχου εδάφους(GCS), γεγονός το οποίο αποτελεί μειονέκτημα καθώς θα πρέπει να εκπαιδευτεί και να χρησιμοποιηθεί ισάριθμο πλήθος χειριστών εδάφους καθώς και τηλεπικοινωνιακών πόρων για την σύνδεση τους με τους σταθμούς εδάφους. Αργότερα η φιλοσοφία αυτή τείνει να αλλάξει πηγαίνοντας προς την κατεύθυνση της δημιουργίας σμηνών (Swarms) ΜΕΑ δημιουργώντας εσωτερικές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων εντός του σμήνους (intra communication). και μειώνονται οι πόροι, διευκολύνοντας την πρόσβαση στο μέσο αφού οι μόνες πλέον συνδέσεις που απαιτούνται για την εκτέλεση της αποστολής του σμήνους είναι αυτές με τον σταθμό βάσης (Command and Control Station-C2) καθώς καλύπτονται μεγαλύτερες περιοχές. Οι απαιτήσεις για την δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου δημιουργούν αρχικά δύο κρίσιμα ζητήματα: α.) του αρχικού καθορισμού της συμπεριφοράς τους σμηνούς και β.) του καθορισμού των βασικών λειτουργιών του σμήνους[9] (Σχήμα 1.4).



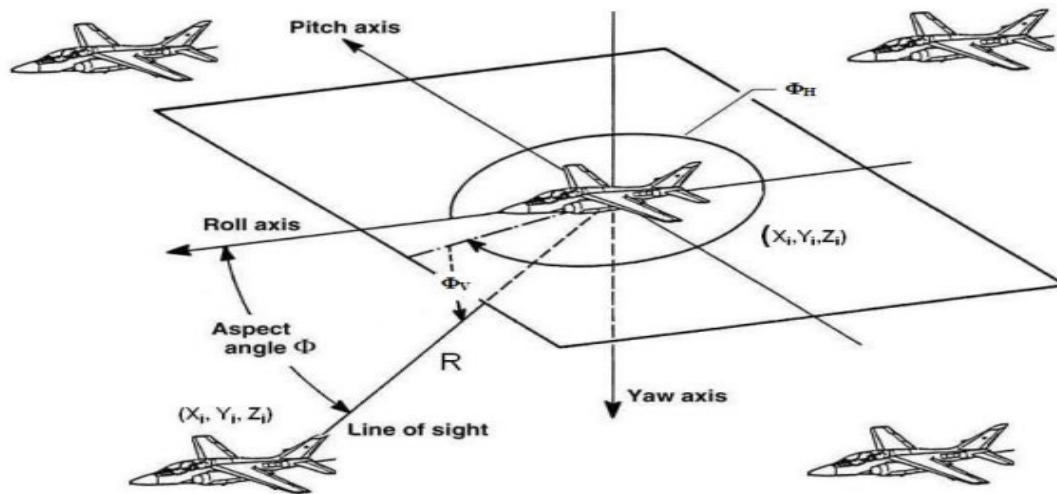
Σχήμα 1. 4: Σχηματισμός Σμήνους μεταξύ UAVs.

Τα κυριότερα προβλήματα τα οποία προκύπτουν από την δημιουργία ενός δυναμικά μεταβαλλόμενου δικτύου είναι α.) το πρόβλημα του περιορισμένου εύρους φάσματος (limited bandwidth), β.) της μεταβαλλόμενης συνδεσιμότητας και απόδοσης ενός τέτοιου δικτύου η οποία δημιουργεί νεκρές ζώνες κατά την ανταλλαγή των δεδομένων και καθιστώντας απαραίτητη την χειροκίνητη επανεγκαθίδρυση ζεύξης μεταξύ αυτών, γ.) οι παρεμβολές οι οποίες οφείλονται στις «χαοτικές» συνθήκες οι οποίες επικρατούν στην ατμόσφαιρα καθώς και δ.) οι δυσκολίες στην απόκτηση πρόσβασης στο μέσο λόγω της συνεχόμενης εναλλαγής στην τοπολογία του δικτύου, με διαρκείς μεταβολές στις τρεις μεταβλητές των αξόνων (x,y,z-pitch,roll,yaw)[12,15] (Σχήμα 1.5).

α.)



β.)



Σχήμα 1. 5:

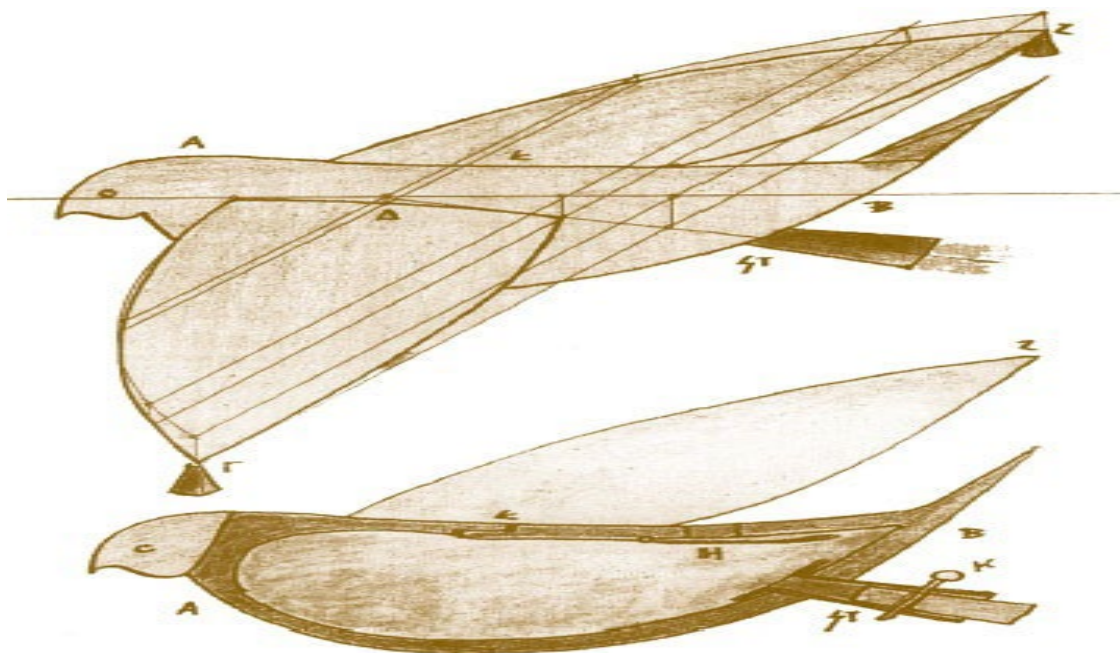
α. Αναπαράσταση ενός επιχειρησιακού-δυναμικά μεταβαλλόμενου δικτύου.

β. Απεικόνιση της τρισδιάστατης κίνησης των Α/Φ .

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στον τομέα των κινητών Ad-Hoc δικτύων είναι η δρομολόγηση των πακέτων σε ένα δίκτυο που αλλάζει τη δομή του δυναμικά λόγω της κινητικότητας των κόμβων, ειδικά όταν τόσο η πηγή και ο προορισμός των πακέτων είναι εκτός της εμβέλειας τους.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

Σε συνάρτηση με το πώς μπορεί να θεωρηθεί ότι ορίζεται το ΜΕΑ, μπορούμε να πούμε ότι η πρώτη εμφάνιση του τοποθετείται πολλούς αιώνες πριν. Το 425 π.Χ., ο Αρχύτας κατασκεύασε ένα μηχανικό περιστέρι, το οποίο το ονόμασε πετομηχανή, που μπορούσε να πετάξει τα φτερά του παίρνοντας ενέργεια από ένα μηχανισμό στο στομάχι του[28] (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1. 6: Το πρώτο αεριοπρωθούμενο περιστέρι.

Αρκετά χρόνια αργότερα, στις 22 Αυγούστου του 1849 καταγράφηκε η πρώτη επίτευξη πλήγματος από αέρα, των Αυστριακών ενάντια στους Βενετούς, από μη επανδρωμένο όχημα και συγκεκριμένα από μπαλόνια τα οποία διέθεταν μηχανισμούς καθυστέρησης και μετέφεραν εκρηκτικά, εκμεταλλευόμενα τον ευνοϊκό άνεμο πρόωσης[16]. Φτάνοντας στον 1^ο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι ΗΠΑ κατασκεύασαν ένα μη επανδρωμένο, με την ονομασία «**Kettering Bug**», πύραυλο οποίος είχε την ικανότητα προσβολής εχθρικού στόχου σε ακτίνα 64 χιλιομέτρων. Το παραπάνω σύστημα το οποίο θεωρείται πρόδρομος των UAVs, παρόλο το σχετικά χαμηλό του κόστος, δεν κατάφερε να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά λόγω της λήξης του πολέμου και λόγω άλλων δυσχερειών οι οποίες σχετίζονταν με την ασφάλεια των φίλιων τμημάτων[17]. Πολλές προσπάθειες ακόμη έγιναν για την κατασκευή ΜΕΑ κατά την διάρκεια καθώς και μετά τον 1^ο Παγκόσμιο Πόλεμο με κυριότερες από αυτές την κατασκευή του ΜΕΑ «Hewitt-Sperry» το οποίο μετέφερε και προσέβαλε επίσης με εκρηκτικά (kamikaze drone[18]) σε μία προκαθορισμένη ακτίνα της τάξης των 160 Χλμ[17]. Παράλληλα την δεκαετία του '30 το αγγλικό ναυτικό προχώρησε στην κατασκευή του "Queen Bee" το οποίο αποτελούσε το πρώτο τηλεχειριζόμενο όχημα στην ιστορία του[23]. Στα επόμενα χρόνια και κατά την διάρκεια του Β Παγκοσμίου πολέμου η τεχνολογία άρχισε ολοένα και να ενσωματώνεται στα υπό ανάπτυξη ΜΕΑ της εποχής. Τόσο οι δυνάμεις του άξονα όσο και οι συμμαχικές δυνάμεις των ΗΠΑ προέβησαν σε έναν αγώνα κατασκευής συστημάτων τηλεχειρισμού Α/Φ, όπως τα KDB-1 και MQM-61A, των οποίων οι δυνατότητες δεν υπερέβαιναν τις δυνατότητες ενός τηλεχειριζόμενου μη επανδρωμένου Α/Φ.

Στον πόλεμο του Βιετνάμ λόγω των απωλειών σε πιλότους από εχθρικά πυρά, λόγω διεξαγωγής «επικίνδυνων» αποστολών, οι ΗΠΑ θέλησαν να διαφυλάξουν τις ζωές ανθρώπων, οι οποίοι κόστιζε πολύ να εκπαιδευτούν σε χρόνο και σε χρήματα, οι οποίες θα ήταν δύσκολο να αναπληρωθούν. Έτσι δημιουργήθηκε το QH-50 DASH (Drone Anti-Submarine Helicopter) το οποίο αποτελούσε ένα ΜΕΑ περιστρεφόμενης

πτέρυγας μακράς ακτίνας, εκπεμπόμενο από πλοία για την εκτέλεση αποστολών ανθυποβρυχιακού πολέμου καθώς προβλεπόταν να μεταφέρει δύο торπίλες.

Λίγο αργότερα, και κατά την διάρκεια του πολέμου του Γιομ Κιπούρ [19] το 1973, η Ισραηλινή Αεροπορία εξαιτίας των μεγάλων απωλειών τις οποίες είχε από τις επιθέσεις των Α/Φ του Αραβικού Συνδέσμου, κατασκεύασε ικανό αριθμό ΜΕΑ παρατήρησης και καταγραφής των θέσεων της εχθρικής αεράμυνας, όπως τα E2-C, Tadiran Mastiff, και IAI Scout για να χρησιμοποιήσει αργότερα στον Πόλεμο του Λιβάνου κατά την επιχείρηση «Κρεμμυδοφάγος»[20] για την εκτέλεση αποστολών SEAD. Τέλος τα τελευταία χρόνια, μετά το 1980 το ΥΕΘΑ των ΗΠΑ σε συνεργασία με εταιρίες όπως η AAI και η Ισραηλινή MALAT δημιούργησαν ΜΕΑ των οποίων η παραγωγή συνεχίστηκε με το ξέσπασμα του πολέμου του Κόλπου το 1991[21] καθώς δημιουργούσαν τις προϋποθέσεις για την ανάληψη των «επικίνδυνων, βρώμικων και αποστολών ρουτίνας» εξασφαλίζοντας τις ζωές των πιλότων και των πληρωμάτων της Π.Α. των ΗΠΑ. Στον πόλεμο της Βοσνίας και του Κοσσοβού τα ΜΕΑ χρησιμοποιήθηκαν για πάνω από 4000 ώρες πτήσης για την εκτέλεση αποστολών επιτήρησης, αναγνώρισης, κατάδειξης στόχου και παροχής πληροφοριών. Υπολογίζεται ότι κατά τον πόλεμο στο Αφγανιστάν η USAF (United States Air Force in Afghanistan) αριθμούσε περίπου το ένα τρίτο των Α/Φ που χρησιμοποιούσε σε ΜΕΑ και ότι από το 2013 περίπου 76 χώρες χρησιμοποιούν ΜΕΑ, η χρησιμοποίηση των οποίων είναι συνυφασμένη με την εκτέλεση σύγχρονων αποστολών .

1.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΧΡΟΝΙΑ

Η βιωσιμότητα των πληρωμάτων αλλά το κόστος απώλειας ενός Α/Φ ήταν ένα από τα κυρίαρχα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν και απασχόλησαν την σύγχρονη αεροβιομηχανία μετά τον «Πόλεμο του Κόλπου το 1991». Οι αποστολές οι οποίες αφορούσαν στόχους αμφιβόλου αξίας αλλά και το ρίσκο ανάληψης τους « Risk Assessment Analysis» εξέθεταν τα πληρώματα σε αποστολές οι οποίες δεν ήταν αναγκαία η εμπλοκή τους[23] καθώς το τελευταίο αποτελούσε και την αιτία ανάπτυξής τους σε :

Αποστολές Ρουτίνας (Dull Roles): Πρόκειται για στρατιωτικές και πολιτικές εφαρμογές οι οποίες επιφέρουν κούραση λόγω της ρουτίνας τους, διότι προϋποθέτουν μακρά παραμονή σε κατάσταση αδράνειας πχ. παρατήρηση ενός φυσικού φαινομένου το οποίο εξελίσσεται σε πολύ αργούς ρυθμούς.

Αποστολές σε μολυσμένες από PBΧΠ (Ραδιοβιοχημικές ουσίες- Dirty Roles): Πρόκειται για αποστολές που διεξάγονται είτε σε περιοχές οι οποίες έχουν μολυνθεί από ραδιοβιοχημικά όπλα είτε σε περιοχές οι οποίες χρήζουν ραντίσματος για την αποφυγή νοσημάτων.

Αποστολές με Μεγάλο Ρίσκο (Dangerous Roles): Πρόκειται για αποστολές οι οποίες διεξάγονται σε περιοχές οι οποίες συνδυάζουν κλιμακούμενα κατά βάθος και βεληνεκές μέτρα ασφαλείας, τα οποία συντελούν σημαντικά στην μείωση της βιωσιμότητας μίας φίλιας επιχείρησης μέσω της αποκάλυψής της, όπως αντιαεροπορικοί πύραυλοι, ραντάρ εντοπισμού Α/Φ κ.ά. αλλά και για αποστολές στην

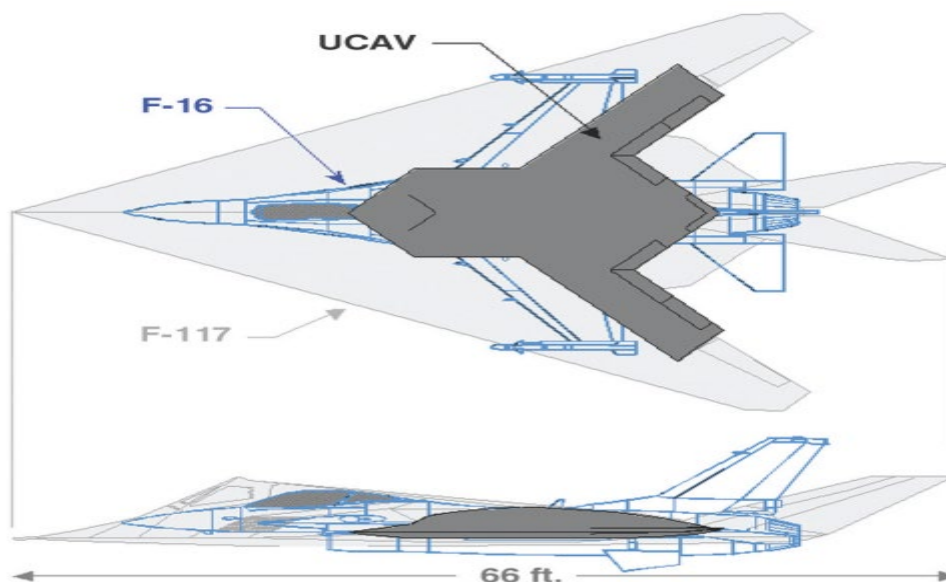
πολιτική ζωή όπως η επιθεώρηση των γραμμών υψηλής τάσης και η δασοπυρόσβεση όπου τίθεται σε κίνδυνο η ζωή του επιβαίνοντος πληρώματος.

Κεκαλυμμένες Αποστολές (Covert Roles) : Πρόκειται για αποστολές των οποίων η επιτυχία εξαρτάται από την διατήρηση της μυστικότητας τους. Τα ΜΕΑ λόγω της φύσης, αλλά και λόγω του μειωμένου ίχνους τους συντελούν στην βιωσιμότερη πορεία τους έναντι των εχθρικών μέσων προειδοποίησης.

Αποστολές Επιστημονικής Έρευνας (Research Roles) στον τομέα της αεροναυπηγικής: Πρόκειται για αποστολές όπου διεξάγονται δοκιμές και παραμετροποιήσεις σε πολιτικά και στρατιωτικά Α/Φ όπου η χρησιμοποίηση πληρωμάτων δεν ενδείκνυται για λόγους ασφαλείας.

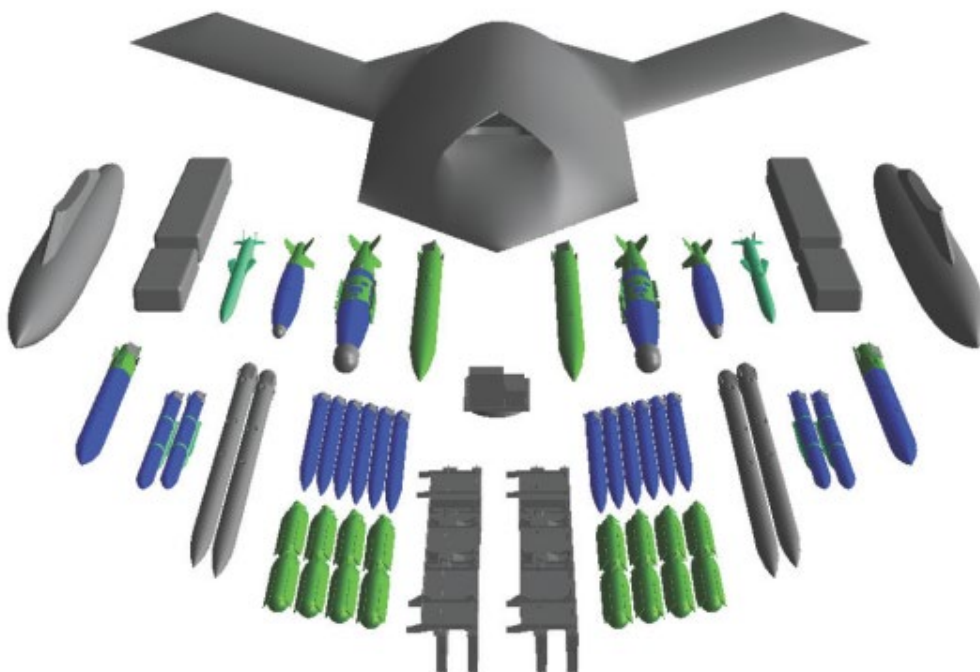
Αποστολές Περιβαλλοντολογικών Περιορισμών (Environmentally Critical Roles): Πρόκειται για αποστολές όπου τα ηπιότερα χαρακτηριστικά των ΜΕΑ ως προς την διατήρηση της αρμονίας στο περιβάλλον επιβάλλουν την χρησιμοποίηση τους για την ικανοποίηση των περιβαλλοντολογικών περιορισμών π.χ. η επιθεώρηση των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας από ΜΕΑ επιφέρει σημαντική διαφορά στον εκπεμπόμενο θόρυβο.

Οικονομικούς λόγους: Οι οποίοι συνδέονται με το κόστος κατασκευής, απόκτησης, λειτουργίας και συντήρησης των ΜΕΑ καθώς και της εκπαίδευσης του πληρώματος το οποίο παρόλο που είναι μειωμένο, δεν είναι ανάλογο με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το μέγεθος ενός ΜΕΑ σε σχέση με ενός επανδρωμένου Α/Φ εξαιτίας της ιδιαιτερότητας και πολυπλοκότητας στην κατασκευή και της τοποθέτησης πολυπλοκότερων συστημάτων στα ΜΕΑ, όπως το ηλεκτρονικό σύστημα διεύθυνσης-πλοήγησης και επικοινωνίας, το οποίο είναι ακριβότερο από αυτό ενός επανδρωμένου Α/Φ[23] (**Σχήμα 1.7**)



Σχήμα 1. 7: Σύγκριση μεγέθους μεταξύ ενός μαχητικού Α/Φ και ενός UCAV.

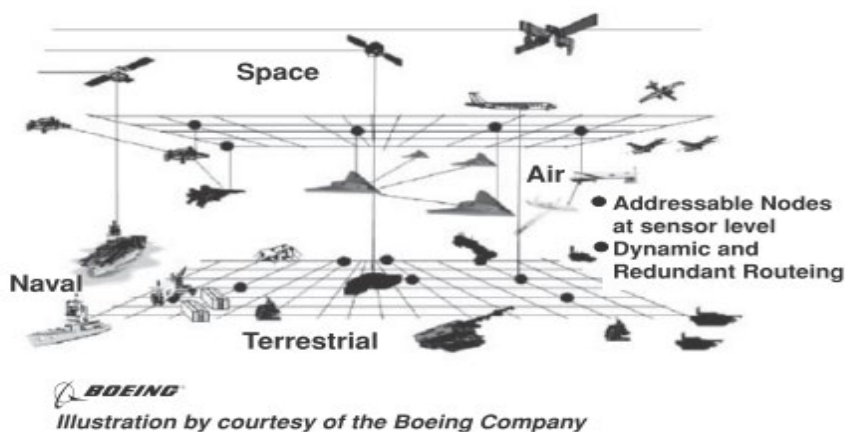
Τα ΜΕΑ έχουν επικρατήσει τα τελευταία χρόνια σε μία πληθώρα εφαρμογών οι οποίες επιτυγχάνουν ανάθεση πολλαπλών αποστολών, με μεγαλύτερο χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης και συχνότητες για μεγαλύτερη ευελιξία καθώς επίσης έχουν ενταχθεί στους διεθνείς κανονισμούς συμβάσεις για την ασφαλή υπερεπτήση τους στους Εθνικούς Εναερίους Χώρους (ΕΕΧ) των διαφόρων κρατών στα οποία θα υπερίπτανται[24]. Επίσης έχουν επιλυθεί θέματα ασφαλείας τα οποία συσχετιζονταν με την ασφαλή τοποθέτηση, μεταφορά και πλοήγηση των οπλικών συστημάτων τα οποία θα μεταφέρονται από τα ΜΕΑ καθώς επίσης και θέματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility EMC) των όπλων αυτών, από ιδρύματα τα οποία λειτουργούν για το σκοπό αυτό π.χ. το SEEK EAGLE των ΗΠΑ[24], έχοντας έτσι δώσει νέα ώθηση στην τοποθέτηση νέων εξελιγμένων όπλων μεγάλης ακρίβειας κατευθυνόμενα από αδρανειακούς γυροσκοπικούς μηχανισμούς και από το σύστημα GPS (global position system) (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8: Μεταφερόμενος Οπλισμός από ένα UCAV.

Ακόμη τα τελευταία χρόνια έχει αλλάξει ριζικά η διαλειτουργικότητα μεταξύ των τμημάτων ενός UAS και ενός επανδρωμένου Α/Φ επιτρέποντας την συνεργασία μεταξύ τους σε πολλαπλά επίπεδα πολλαπλασιάζοντας την σχετική μαχητική ικανότητα και ισχύ των συστημάτων αυτών. Επίσης ενώ παλαιότερα η ακρόαση, ο έλεγχος και η παρακολούθηση ενός ΜΕΑ γίνονταν μόνο από τον σταθμό χειρισμού εδάφους (GCS) οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις οι οποίες συνδυάζουν συνδυαζόμενες και διασταυρούμενες εφαρμογές επιτρέπουν την μεταβίβαση πληροφοριών αλλά και του ελέγχου σε όλα τα κλιμάκια της διοίκησης, αναλόγως των δικαιωμάτων και της δικαιοδοσίας που παρέχονται σε αυτά για το συγκεκριμένο σύστημα[24]. Αν και τα UAS συστήματα έχουν όπως προαναφέραμε ωφελήσει τόσο τον πολιτικό όσο και τον στρατιωτικό τομέα η απήγηση και η απορρόφηση που είχαν στον κάθε τομέα ήταν δραματικά διαφορετική. Έτσι ενώ στις στρατιωτικές εφαρμογές έχουμε πολύ μικρότερο

αριθμό οντοτήτων και χρηστών στις οποίες απηχεί η δυνατότητα χρήσης ΜΕΑ, λόγω κυρίως του κόστους αλλά και της τεχνολογίας ένταξης σε ένα ευρύτερο πλαίσιο διαλειτουργικότητας για την αποδοτική εκμετάλλευση του συνόλου των δυνατοτήτων τους, έχουν αναπτυχθεί **Δίκτυο-κεντρικά** συστήματα (Network-centric Operations)[8] τα οποία ενώ υποστηρίζουν μεν την χρησιμοποίηση των ΜΕΑ σε παραδοσιακά μονομερείς αποστολές, συνδυάζουν δε την ανάγκη ρεαλιστικής συνεργασίας μεταξύ διαφόρων συστημάτων όπως δορυφόρους ,πλοία, Α/Φ και άλλα ΜΕΑ, διαδίδοντας σε όλους τους κόμβους την πληροφορία που αποκτήθηκε ένα ΜΕΑ π.χ. ένα HALE (High Altitude Long Endurance) σύστημα (**Σχήμα 1.9**).



Σχήμα 1.9: Δίκτυο-κεντρική αρχιτεκτονική.

Στις πολιτικές εφαρμογές αν και η μερίδα ενδιαφέροντος για χρησιμοποίηση ΜΕΑ είναι αρκετά μεγαλύτερη η απήχηση που συναντάται είναι πολύ μικρή εξαιτίας του συνολικού κόστους αγοράς , λειτουργίας και συντήρησης των ΜΕΑ καθώς επίσης και εξαιτίας της πιθανότητας πρόκλησης τραυματισμών σε ανθρώπους ή ζώα ή σε ιδιοκτησίες ή κωλυμάτων στην κυκλοφορία λόγω πρόσκρουσης στο έδαφος ή σε άλλα διερχόμενα Α/Φ, εξαιτίας της μη ύπαρξης ενός ολοκληρωμένου οικονομικά βιώσιμου για τις επιχειρήσεις, συστήματος διάισθησης και αποφυγής (sense and avoid) των εμποδίων για τα ΜΕΑ που χρησιμοποιούνται στον πολιτικό τομέα. Εξαιρέσεις στην χρήση των ΜΕΑ στο πολιτικό τομέα αποτελεί η διαδεδομένη χρήση αυτών στην επιθεώρηση των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και ο ψεκασμός των καλλιεργειών για την πρόληψη από αρρώστιες[8].

Οι αποστολές οι οποίες αναλαμβάνονται σήμερα από τα ΜΕΑ χωρίζονται αναλόγως του επιχειρησιακού τους ελέγχου σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες, οι οποίες πολλές φορές μπορεί να είναι επικαλυπτόμενες, όπως παρακάτω[8]:

- Ναυτικές Αποστολές: Χωρίζονται σε τρεις διαφορετικούς τύπους αναλόγως με τον τύπο της αποστολής του ΜΕΑ σε α.) εκτός πλοίου, β.) παράκτια και γ.) Υποστήριξη μακρού βεληνεκούς από αέρος. Για την υποστήριξη τους συνήθως προβλέπουν την παραμετροποίηση των ΜΕΑ για «ναυτική χρήση» όπως μηχανισμούς πλύσης , συστημάτων σταθεροποίησης λόγω πιθανών ανέμων στην επιφάνεια κ.α. Οι κυριότερες συνοψίζονται όπως παρακάτω:

➤ Εντοπισμός σκάφους και παρακολούθηση με την χρήση ενός VTOL (Vertical Take Off and Landing) ή HTOL (Horizontal Take Off and Landing) MALE MEA μέσω παθητικών αισθητήρων και αποστολή των δεδομένων με την χρήση κατευθυνουσών μέσων επικοινωνίας πίσω στη βάση.

➤ Φίμωση ραντάρ με τη χρήση ενός MEA HTOL, εκτοξευόμενου από καταπέλτη, το οποίο φέρει κατάλληλο εξοπλισμό παρεμβολών.

➤ Εξουδετέρωση εχθρικών πυραύλων με την χρήση MEA το οποίο φέρει κατάλληλο εξοπλισμό προσομοίωσης ίχνους, για την προστασία του φίλιου σκάφους και πληρώματος.

➤ Ανθυποβρυχιακό Πόλεμο με τη χρήση α.) ενός VTOL MEA εξοπλισμένου με σόναρ ενεργού τύπου και ενός MEA για την εξουδετέρωση του θερμικού ίχνους και του θορύβου του ανθυποβρυχιακού MEA β.) ενός VTOL MEA εξοπλισμένο με σόναρ παθητικού τύπου και γ.) ενός VTOL ή HTOL MEA εξοπλισμένο με ανιχνευτές παρεμβολής του μαγνητικού πεδίου της γης.

➤ Ραδιοαναμετάδοση με την τοποθέτηση ενός αναμεταδότη σε ένα MEA (RUAV-Relay UAV) και την υπέρ-πτήση του πάνω από το φίλιο σκάφος.

➤ Προστασία Λιμένων με την χρήση MEA μέσω της επιτήρησης και εγκαίρου προειδοποίησης.

➤ Αναγνώριση της ακτής προ της φίλιου δυνάμει προσεγγίσεως.

➤ Προστασία των περιοχών ελεγχόμενης αλιείας.

➤ Εντοπισμός και παρακολούθηση σκαφών υπόπτων για παράνομη εισαγωγή προϊόντων με τη χρήση ενός MALE MEA εφοδιασμένου με τεχνολογία αντί-εντοπισμού (stealth).

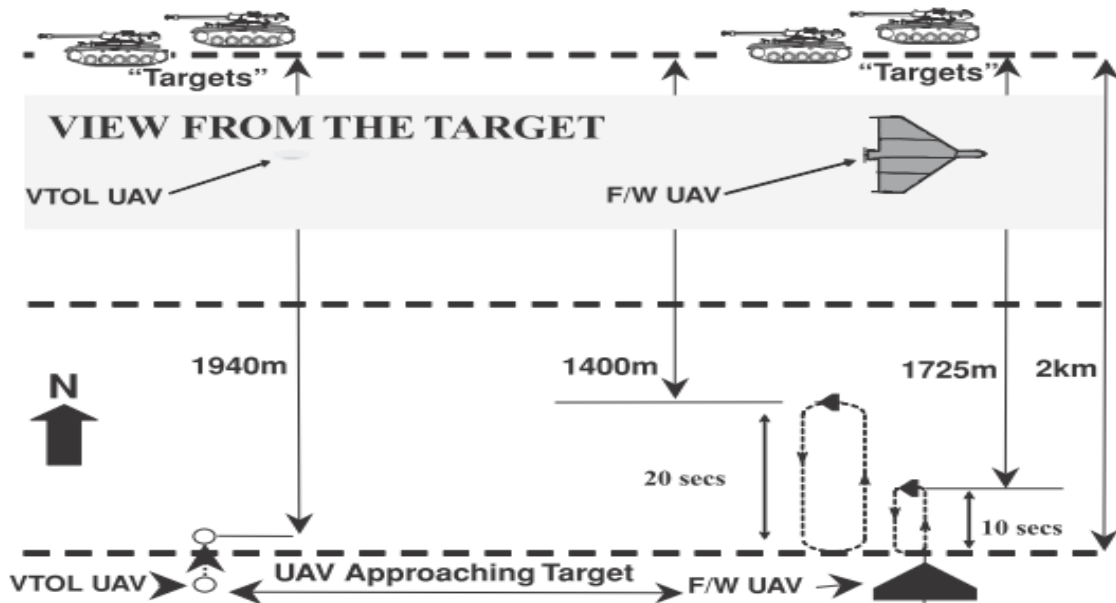
➤ ELINT (Electronic Intelligence) με την χρήση MEA, την αφανή διείσδυση και επί μακρόν παραμονή πίσω από τις γραμμές του εχθρού και εν συνέχεια την παρακολούθηση και καταγραφή των εχθρικών ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών καθώς και την διακοπή τους για πληροφοριακούς στρατηγικούς σκοπούς.

➤ Ναυτική Επιτήρηση (Maritime Surveillance) με την χρήση HALE ή MALE MEA εφοδιασμένα με H/O και I/R αισθητήρες αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά Α/Φ ναυτικής συνεργασίας όπως τα CN 235 F.

• Στρατιωτικές Αποστολές: Λόγω της ποικιλομορφίας των κλιματολογικών χαρακτηριστικών και του εδάφους έχουν την μεγαλύτερη ποικιλομορφία καθώς τα MEA που λαμβάνουν μέρος σε αυτές θα πρέπει να μετακινούνται από περιοχή σε περιοχή αναλόγως της τακτικής αναγκαιότητας για αυτά. Οι κυριότερες συνοψίζονται παρακάτω:

➤ Κεκαλυμμένη Αναγνώριση και Επιτήρηση: Η πλειοψηφία των MEA που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι μεσαίου ή μικρού βεληνικού VTOL ή HTOL MEA τα οποία έχουν τη δυνατότητα να εκτοξευθούν ακόμη και από πρόχειρους μη εγκεκριμένους διαδρόμους εκτόξευσης για επανδρωμένα Α/Φ. Επίσης

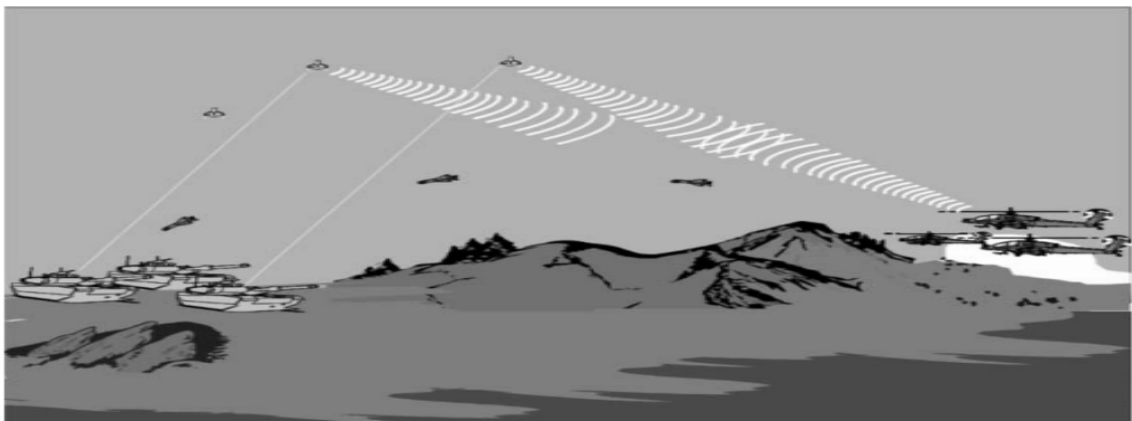
χρησιμοποιούνται και mini MEA τα οποία εκτοξεύονται από προσωπικό και αποτελούν την πλέον κατάλληλη λύση για τακτική αναγνώριση του εγγύς πεδίου της μάχης (Σχήμα1.10).



Σχήμα 1.10: Αποστολή Αναγνώρισης MEA

➤ Κατεύθυνση πυρών πυροβολικού μέσω διόρθωσης σύγκλισης του σημείου πρόσπτωσης των βλημάτων, αντικαθιστώντας τον ανθρώπινο παρατηρητή.

➤ Κατάδειξη στόχου με δέσμη I/R laser από MEA με τεχνολογία απόκρυψης ίχνους (stealth), τα οποία μπορούν να λάβουν την βέλτιστη θέση κατάδειξης στο χώρο χωρίς να γίνουν αντιληπτά (Σχήμα1.11).



Σχήμα 1.11: Κατάδειξη στόχου από MEA

➤ Ανίχνευση Μόλυνσης από PBXΠ ουσίες μέσω ανάλυσης δειγμάτων από τοποθετημένους στο MEA αισθητήρες.

➤ Ανίχνευση και Καταστροφή Ναρκών και Εκρηκτικών Υλών.

➤ ELINT (Electronic Inteligence).

➤ Διαλειτουργικότητα και συνεργασία με άλλα επανδρωμένα ή μη συστήματα.

➤ Επιτήρηση, παρατήρηση εντοπισμός και έγκαιρη προειδοποίηση εδαφικού τομέα ενδιαφέροντος.

- Αποστολές Αεροπορίας:
 - Αναγνώριση και βομβαρδισμός μακράς ακτίνας.
 - Εγγύς αεροπορική προειδοποίηση και προστασία.
 - ELINT (Electronic Intelligence).
 - Αποστολές SEAD.
 - Παρεμβολές στις επικοινωνίες.

- Πολιτικές Εφαρμογές:
 - Αεροφωτογράφιση.
 - Ράντισμα και παρακολούθηση καλλιερχειών.
 - Ακτοφυλακή και ναυαγοσωστικά.
 - Επιθεώρηση γραμμών μεταφοράς ισχύος και καυσίμων.
 - Καταστολή πυρκαγιών και επιτήρηση των δασών.
 - Μετεωρολογικές μετρήσεις.
 - Αστυνόμευση.

1.4 ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΩΝ ΜΕΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Η εξέλιξη των ΜΕΑ προβλέπει την εισαγωγή νέων τεχνολογιών οι οποίες με τις οποίες τα ΜΕΑ θα μπορούν να είναι ελαφρύτερα τόσο στο ωφέλιμο φορτίο όσο στο αεροόχημα και στα καύσιμα, θα μπορούν να χρησιμοποιούν κινητήρες ηλεκτρικής ισχύος οι οποίοι θα μειώνουν πάρα πολύ το θερμικό και το ηχητικό ίχνος του Α/Φ, θα έχουν πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων καθώς θα είναι εφοδιασμένα με εργαλεία με τα οποία θα είναι δυνατή η συμπίεση και αποστολή των δεδομένων που λαμβάνονται από τα όργανα του Α/Φ σε κατάλληλη μορφή που υποστηρίζεται από την υπάρχουσα ευρυζωνικότητα και ποιότητα των συνδέσεων. Επίσης θα έχει σχεδιαστεί κατάλληλη τεχνολογία λογισμικού (sense and avoid mechanism) η οποία θα παρέχει αξιόπιστη και ασφαλή συνεργασία με άλλα επανδρωμένα Α/Φ[31]. Στον Πίνακα 1.3.1 παρουσιάζονται οι εξελίξεις των συστημάτων ΜΕΑ σε διάφορους τομείς βελτίωσης σύμφωνα με το ΥΠΑΜ των ΗΠΑ (US-DoD).

	2009	Evolutionary Adaption	2015	Revolutionary Adaption	2034
Dependency	Man Dependent SA/ Off Board SA		Sense and Avoid		Fully Autonomous/ On Board SA
Speed	Subsonic		Transonic		Super/Hypersonic
Stealth	Signature High				Signature Low
Maneuverability	1 "G"		9 "G"		40 "G"
Self Protection	Threat Detection		Threat Jamming and Expendables		
Sensor Ranges	Current		25% Extended		50% Extended
Icing	Visual Meteorological Conditions - Light		Moderate		Severe
Turbulence	Light		Moderate		Severe
Precipitation	Light		Moderate		Severe

Σχήμα 1.12: Εξέλιξη των ΜΕΑ στο Μέλλον[31]

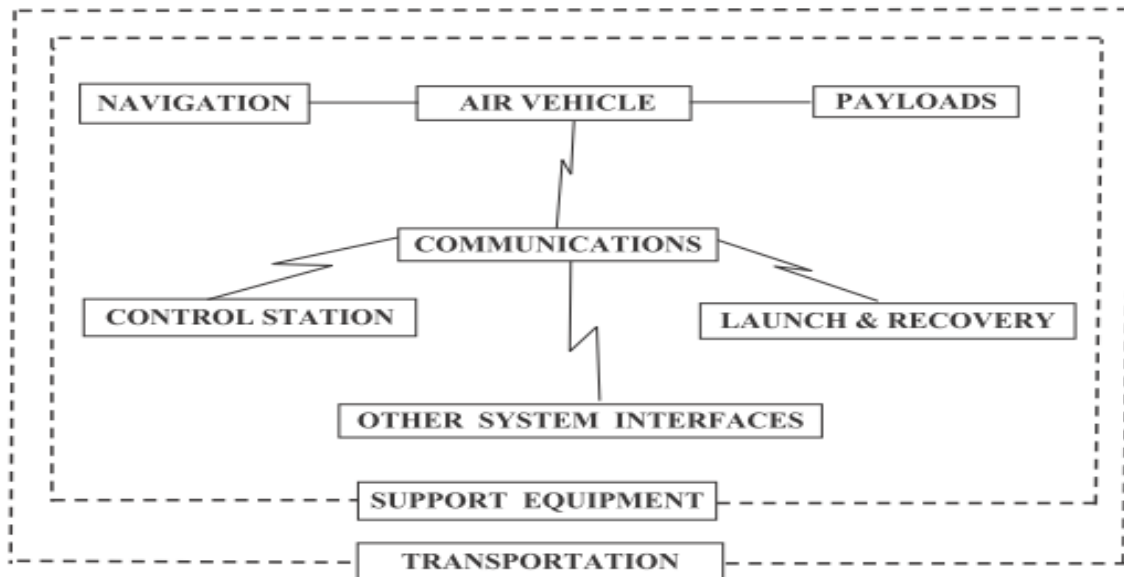
Με αυτόν τον τρόπο οι πιθανές αποστολές των ΜΕΑ επεκτείνονται σε τομείς όπου μέχρι σήμερα είναι απαραίτητη η ύπαρξη επανδρωμένων Α/Φ όπως παρακάτω:

- Ανεφοδιασμός από αέρος με την ρίψη εφοδίων με αλεξίπτωτα φορτίου.
- Επιχειρήσεις CSAR (Combat Search and Rescue) με την χρησιμοποίηση μεθόδων για τον εντοπισμό και εκκένωση φίλιου προσωπικού σε εχθρικό έδαφος.
- Ανεφοδιασμός Α/Φ από αέρος.
- Εμπλοκή σε μάχη με μη, ή επανδρωμένο Α/Φ η οποία θεωρείται και δυσκολότερη ως αποστολή καθώς οι απαιτήσεις ελιγμών και πρόωσης σε συνδυασμό με τα συστήματα στοχοποίησης και σπλισμού προϋποθέτουν την ύπαρξη του ανθρώπινου παράγοντα για την αποτελεσματική διεξαγωγή μίας αερομαχίας μέχρι σήμερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΡΙΩΝ ΜΕΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η αρχιτεκτονική και τα υποσυστήματα από τα οποία απαρτίζεται ένα UAS σύστημα αποτελούν αντικείμενο διαρκούς βελτίωσης και αναβάθμισης. Τα κυριότερα λειτουργικά υποσυστήματα-τμήματα αναφέρονται όπως παρακάτω (Σχήμα 2.1):



Σχήμα 2. 17: Λειτουργικά Υποσυστήματα ενός UAS

2.1.1 ΣΤΑΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (Control Station-CS)

Αποτελεί το υποσύστημα το οποίο παρέχει την διεπαφή μεταξύ ανθρώπου και ΜΕΑ καθώς επίσης και το σημείο σχεδίασης της αποστολής τους. Αναλόγως του τύπου διακρίνεται σε α.) Εδάφους (Ground Control Station-GCS), β.) Σκάφους (Ship control Station-SCS) και γ.) Αεροσκάφους (Aircraft Control Station-ACS). Η διαβίβαση των εντολών πραγματοποιείται μέσω γραμμών επικοινωνιών (άνω ζεύξη) ενώ οι συλλεγόμενες πληροφορίες συλλέγονται μέσω της κάτω ζεύξης. Ακόμη στο σταθμό ελέγχου, εμπεριέχονται τα συστήματα και οι εγκαταστάσεις επικοινωνιών για την ανταλλαγή πληροφοριών με άλλα δίκτυα ή σταθμούς ελέγχου.

2.1.2 ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΩΦΕΛΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (Payload Systems)

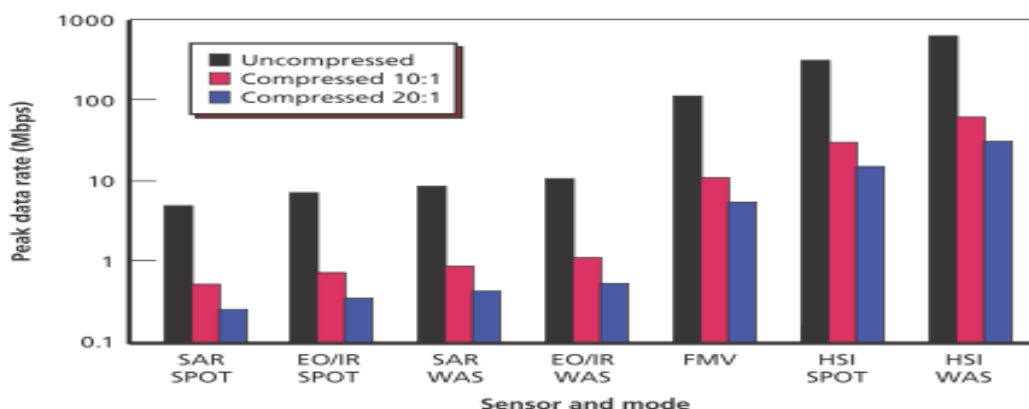
- Τα διάφορα υποσυστήματα που ενσωματώνονται σε ένα ΜΕΑ καθορίζονται από την αποστολή του και μπορούν να περιλαμβάνουν εξοπλισμό

παρατήρησης και βιντεοσκόπησης με αντικειμενικούς φακούς συνολικού βάρους 200 γραμμαρίων, έως πολύ πολυπλοκότερα συστήματα καταγραφής και τεράστιες δυνατότητες εστίασης ακόμη και ενός ραντάρ μεγάλης ισχύος με συνολικό ωφέλιμο βάρος 1000 κιλών. Ακόμη πολλά ΜΕΑ συνδυάζουν την ύπαρξη διαφορετικών τύπων αισθητήρων σε συνδυασμό με ένα ραντάρ ενεργητικού τύπου για την αποτελεσματικότερη και πληρέστερη επικάλυψη των δυνατοτήτων τους σε μία ενιαία πλατφόρμα απεικόνισης. Για παράδειγμα οι απεικονίσεις από μία θερμική κάμερα, μία κάμερα ημέρας υψηλής ανάλυσης και ενός ραντάρ μπορούν να παρέχουν μία ενιαία εικόνα στο πεδίο της μάχης, αλληλεπικαλύπτοντας τα νεκρά σημεία του καθενός χωριστά (HSI-Hyper Spectral Imaging). Τέλος τα διάφορα προϊόντα των υποσυστημάτων φορτίου μετατρέπονται ή παράγονται σε κατάλληλη μορφή ώστε να είναι δυνατή η αποστολή τους μέσω της κάτω ζεύξης αναλόγως του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Οι κυριότεροι τύποι αισθητήρων είναι:

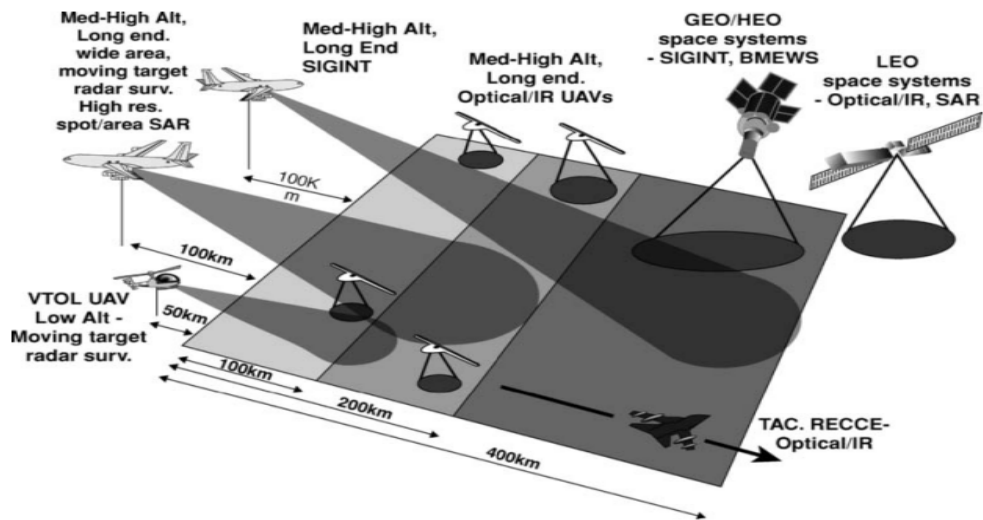
- Ηλεκτροπτικοί – υπέρυθροι εικόνες και βίντεο (Full Motion Video-FMV/EO/IR) σε λειτουργία σημείου ή σάρωσης περιοχής (Spot- C-Wide Area Scanning).
- Ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (Synthetic Aperture Radar-SAR) σημείου ή σάρωσης περιοχής (Spot- WAS).
- Αισθητήρες συλλογής πληροφοριών από την εκμετάλλευση των RF σημάτων (SIGINT).
- Πολυφασματικοί- Υπερφασματικοί συνθέσεως εικόνας από άλλους αισθητήρες (Multispectral/ Hyperspectral Imagery MSI/HSI) για την σύνθεση της καλύτερης μορφής εικόνας του στόχου προς εκμετάλλευση.
- Ραδιοβιοχημικοί- Πυρηνικοί (CBRN) .
- Εντοπισμού και μέτρησης απόστασης από laser μέσω της σύνθεσης εικόνας από τις επιστροφές της ανακλώμενης ακτινοβολίας.
- Κατάδειξης laser και φωτισμού.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται οι τύποι των διαφορετικών τύπων αισθητήρων σε σχέση με τις απαιτήσεις αποστολής των δεδομένων που συλλέγονται από αυτούς.

α.)



β.



γ.)

	Vehicle Endurance (hrs) Max	Altitude (ft) Max	Speed (kt)	Range (nm)	Additional Sensor	User
Eagle Eye	5.5	20000	210	110	MMR	Coast Guard
Grey Eagle	26	25000	120	150	None	Army
Maverick	7	10300	118	175	None	SOCOM
MQ-1	24	25000	118	500	SAR	AF
MQ-5B	18	18000	106	144	None	Army
RQ-4A	32	65000	350	5400	SAR/MTI	AF
RQ-4B	28	60000	340	5400	SAR/MTI, SIGINT	AF
RQ-5A	12	15000	106	144	None	Army
RQ-7A	5	14000	110	68	None	Army
RQ-7B	7	15000	105	68	None	Army
RQ-8	6	20000	125	150	LDFR	Army/Navy

Σχήμα 2. 18: α.) Επικοινωνιακές απαιτήσεις λειτουργίας αισθητήρων

β.) Κλιμάκωση των συστημάτων αισθητήρων κατά κατηγορία ΜΕΑ

γ.) Αποτύπωση των κύριων υποσυστημάτων αισθητήρων κατά ΜΕΑ

2.1.3 ΤΟ ΑΕΡΟΟΧΗΜΑ

Υπάρχουν διάφοροι τύποι Α/Φ. Οι δύο κυριότερες κατηγορίες είναι τα HTOL (Horizontal Take off and Landing) και τα VTOL (Vertical Takeoff and Landing) σταθερής και περιστρεφόμενης πτέρυγας. Ο κατάλληλος τύπος Α/Φ επιλέγεται βάσει της ικανότητας του να μεταφέρει το επιλεγμένο ωφέλιμο φορτίο και τα υποσυστήματα του στο κατάλληλο σημείο και στο επιθυμητό εύρος βεληγεκούς, για συγκεκριμένο εύρος χρόνου, με την πλοήγηση βάσει της επιθυμητής ταχύτητας να τα χρησιμοποιήσει εκμεταλλευόμενος όλες τις δυνατότητές τους και να επιστρέψει πίσω στην φίλια βάση ή στο προκαθορισμένο σημείο περισυλλογής. Αυτά τα υποσυστήματα περιλαμβάνουν:

- Το υποσύστημα επικοινωνιών: Παρέχει τις αναγκαίες ζεύξεις επικοινωνίας (άνω και κάτω) μεταξύ του ΜΕΑ και του σταθμού βάσης. Ως κύριο μέσο επικοινωνίας χρησιμοποιείται το φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων που έχουν εκχωρηθεί από την ITU (International Telecommunications Union) για χρήση από τα ΜΕΑ είτε αυτά επιχειρούν σε κρατικές- στρατιωτικές εφαρμογές, είτε πολιτικές μεμονωμένους τομείς εφαρμογής. Το έργο της άνω και κάτω ζεύξης συνοψίζεται ως εξής:

- Άνω ζεύξη:

- i) Εκπέμπει το σχέδιο χάραξης πορείας πτήσης το οποίο αποθηκεύεται στο σύστημα αυτόματου ελέγχου πτήσης.

- ii) Μεταδίδει άμεσα και σε πραγματικό χρόνο εντολές στο υποσύστημα ελέγχου πτήσης όταν παραστεί ανάγκη ελέγχου πτήσης από τον σταθμό ελέγχου.

- iii) Μεταδίδει εντολές χειρισμού στα υποσυστήματα οφέλιμου φορτίου του ΜΕΑ και τα παρελκόμενα τους.

- iv) Μεταδίδει ανανεωμένες πληροφορίες σχετικά με την πορεία την θέση και την πτήση του ΜΕΑ.

- Κάτω ζεύξη:

- i) Μεταδίδει δεδομένα θέσης του ΜΕΑ στο σταθμό ελέγχου.

- ii) Μεταδίδει τα προϊόντα του υποσυστήματος ωφέλιμου φορτίου στο σταθμό ελέγχου πχ. εικόνες, βίντεο, αποτελέσματα ανίχνευσης PBXΠ ουσιών.

- iii) Μεταδίδει δεδομένα της κατάστασης του ΜΕΑ όπως στάθμη καυσίμων, θερμοκρασία μηχανής, στροφές κινητήρα, ταχύτητα κλπ.

- Το υποσύστημα πλοήγησης: Περιλαμβάνει μηχανισμούς οι οποίοι επιτρέπουν την αυτόνομη πτήση του ΜΕΑ παρέχοντας ταυτόχρονα τις αναγκαίες πληροφορίες γεωγραφικού συσχετισμού όποτε αυτές χρειαστούν. Αυτό επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση στην άτρακτο ενός βελτιωμένου τελευταίας τεχνολογίας INS (Inertial Navigation System). Σε περίπτωση δε που η πλοήγηση του ΜΕΑ είναι αναγκαία χωρίς την χρήση GPS, εναλλακτικά μπορούν να εφαρμοστούν μία από τις ακόλουθες μεθόδους πλοήγησης:

- Εντοπισμός του στίγματος μέσω της επανεκπομπής του σαρωτικού σήματος το οποίο εκπέμπεται από ραντάρ ενεργητικού τύπου από τον σταθμό ελέγχου (CS) και επανεκπομπής του από το ΜΕΑ.

- Εντοπισμός μέσω του RF σήματος το οποίο εκπέμπεται από το ΜΕΑ και μεταφέρει δεδομένα γεωγραφικής θέσης στο σταθμό ελέγχου (CS), όταν αυτό βρίσκεται εντός του εύρους κάλυψης της ραδιοσυχνότητας RF. Αυτό βρίσκεται από τον χρόνο που κάνει ένα κωδικοποιημένο σήμα για να φτάσει από το ΜΕΑ στο CS.

➤ Εντοπισμός μέσω συσχέτισης των επιπεδομετρικών λεπτομερειών που καταγράφονται από τα όργανα του MEA και της ορατής ή μέσω χάρτη επιβεβαίωσης τους από το προσωπικό του σταθμού ελέγχου. Μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν οι τοπογραφικοί μέθοδοι της οπισθοτομίας και της εμπροσθοτομίας.

- Το υποσύστημα σταθεροποίησης και ελέγχου της πτήσης.
- Το υποσύστημα παροχής πρόωσης και καυσίμων.
- Το υποσύστημα παραγωγής και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία των υποσυστημάτων φορτίου.

• Το υποσύστημα προσαρμογής εκτόξευσης ή απογείωσης: Χρησιμοποιείται για τα MEA των οποίων οι δυνατότητες ή η έλλειψη κατάλληλου μήκους και πλάτους διαδρόμων τροχοδρόμησης δεν επιτρέπει την απογείωση χωρίς αυτό. Συνήθως αποτελείται από μία «ράμπα» κατά μήκος της οποίας το MEA επιταχύνει έως ότου αποκτήσει πάνω από ένα όριο U_0 του διανυσματικού μέτρου της ταχύτητας έτσι ώστε να είναι ικανό να συντηρήσει δύναμη ανώσεως μεγαλύτερη από αυτήν του βάρους του εκμεταλλευόμενο το δικό του σύστημα πρόωσης.

• Το υποσύστημα περισυλλογής- επανόδου και προσγείωσης: Χρησιμοποιείται για MEA των οποίων οι δυνατότητες ή το σύστημα ελέγχου και πρόωσης δεν επιτρέπουν την κατακόρυφη πτήση ή τροχοδρόμηση σε διάδρομο κατάλληλο για προσγείωση MEA. Συνήθως περιλαμβάνει ένα σύστημα αλεξιπτωτών ή αεροπτερύγων τα οποία προσγειώνουν ομαλά και παρέχοντας δυνατότητες πλοήγησης κατά την πτώση για την αποφυγή ανεπιθύμητης πρόσκρουσης σε εμπόδια στην ζώνη προσγείωσης. Ακόμη, για ελαφρότερα MEA, μπορεί να περιλαμβάνει κατακόρυφες διατάξεις τύπου «καρουσέλ» ή δικτύων στις οποίες το MEA συλλαμβάνεται, αποσβένοντας τους κραδασμούς, κατά την διέλευσή του μέσα από αυτές.

• Την άτρακτο: Συνήθως επιλέγονται συνδυασμοί οι οποίοι επιτυγχάνουν την μέγιστη σχέση απόδοσης καυσίμου –ταχύτητας-αεροδυναμικής έτσι ώστε να επιλέγεται και ο οικονομικά επωφελέστερος.

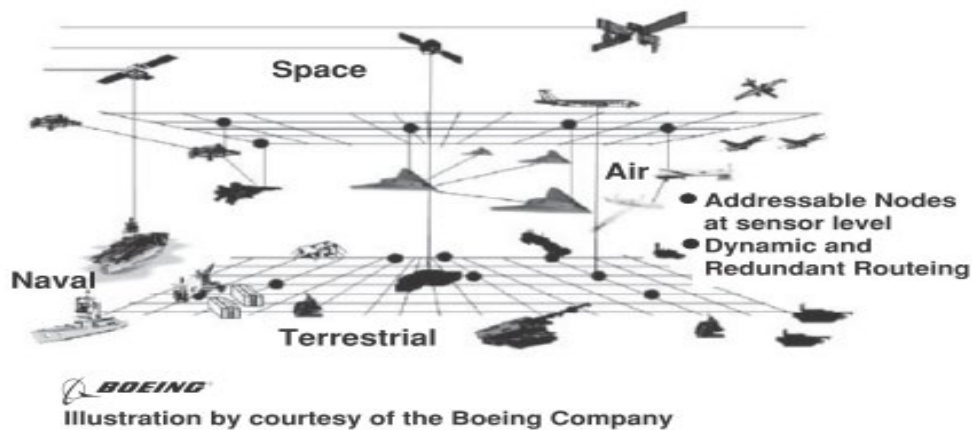


Σχήμα 2. 19: Κύρια μέρη ενός αεροχήματος

2.1.4 ΟΙ ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΧΡΗΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ

Στο σύγχρονο και ενιαίο θέατρο επιχειρήσεων η διαλειτουργικότητα μεταξύ των συστημάτων ΜΕΑ αλλά και άλλων συστημάτων, είτε σε μεγαλύτερο είτε σε μικρότερο κλιμάκιο αποτελεί κύριο παράγοντα της επιτυχίας και απόδοσης στην χρήση ΜΕΑ. Η συνεργασία αυτή ξεκινά από τα ίδια τα υποσυστήματα ενός ΜΕΑ που αφορά στην χρησιμοποίηση κοινά αποδεκτών πρωτοκόλλων επικοινωνίας καθώς επίσης και χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων οι οποίες να ανταποκρίνονται στις ξεχωριστά καθορισμένες ζώνες οι οποίες έχουν εκχωρηθεί από την ΙΤU και τον ΙCAO για διαφορετικό τομέα εφαρμογής (πολιτικό ή στρατιωτικό), και σε διαφορετικές χώρες ή ηπείρους.

Επίσης οι περιπτώσεις αποδοτικής χρήσης μεμονωμένων συστημάτων ΜΕΑ στην σύγχρονη εποχή παύουν να υπάρχουν καθώς είναι αναγκαία η ταυτόχρονη ενημέρωση όλων πληροφοριακά υπαγόμενων στην περιοχή επιχειρήσεων (ΠΕΠ) και περιοχή ενδιαφέροντος (ΠΕΝ) στην οποία δρα το συγκεκριμένο σύστημα ΜΕΑ από το ανώτερο μέχρι τα κατώτερα κλιμάκια[25] η μεταβίβαση του επιχειρησιακού ελέγχου από άλλες μονάδες της ΠΕΠ καθώς και η συνεργασία με άλλα συστήματα ΜΕΑ για την εκπλήρωση του αντικειμενικού σκοπού της διοίκησης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αρχιτεκτονική των «δίκτυο- κεντρικών επιχειρήσεων» σε ένα συνδυασμό συστημάτων τα οποία ενοποιούνται σε ένα ολοκληρωμένο διακλαδικό σύστημα . Για παράδειγμα σε μία διακλαδική αποστολή ISR- καταστροφής στόχου, προϋποτίθεται η συνεργασία ΜΕΑ- πολεμικών πλοίων, Α/Φ και χερσαίων τμημάτων, ενώ παράλληλα παρέχεται ενημέρωση και σε άλλες μονάδες σε ένα ενιαίο σύστημα πληροφόρησης και συνεργασίας (**Σχήμα 2.4**).



Σχήμα 2. 20: Δίκτυο- κεντρικές επιχειρήσεις

2.1.5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Επειδή πολλές φορές ένα UAS χρειάζεται να αποσυναρμολογηθεί και να συναρμολογηθεί εκ για να μεταφερθεί στο πεδίο που πρόκειται να επιχειρήσει, πρέπει να υπάρχει μέριμνα για την τοποθέτηση όλων των υποσυστημάτων που προαναφέρθηκαν παραπάνω εντός κατάλληλων κιβωτίων ή οχημάτων μεταφοράς μαζί με το υπόλοιπο υλικό υποστήριξης που μπορεί να περιλαμβάνει εργαλεία, τεχνικά

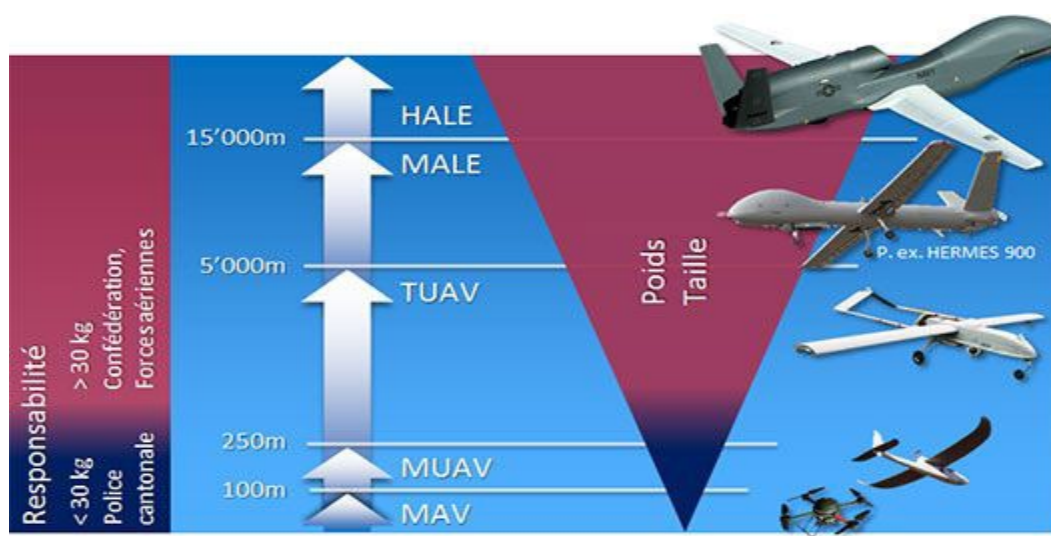
εγχειρίδια συντήρησης, ανταλλακτικά, γεννήτριες παροχής ηλεκτρικής ισχύος και εργαλεία διεξαγωγής ελέγχων του συστήματος.

2.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΑ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΗΣ ΤΑΚΤΙΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ

Αν και ένα ΜΕΑ απαρτίζεται από πολλά υποσυστήματα τα οποία προσδίδουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία μπορεί να επιτευχθεί διαχωρισμός πχ. αναλόγως του τύπου των αισθητήρων, του είδους του οπλισμού που αυτό μεταφέρει ή των δυνατοτήτων επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων, το σημαντικότερο υποσύστημα, το οποίο επιδρά στην απόδοση του υπόλοιπου συστήματος, πάνω στο οποίο δύνανται να προσαρμοστεί, αποτελώντας την «πλατφόρμα μεταφοράς του ωφέλιμου φορτίου», οποιοσδήποτε συνδυασμός από τα ανωτέρω υποσυστήματα είναι το αεροόχημα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα είδη των ΜΕΑ με κριτήριο το επιχειρησιακό ύψος, το βεληνεκές και την διάρκεια.

Classification	Description	Weight	Range	Altitude	Endurance
Mini-UAV	Miniature	Less than 25 kilograms	Less than 10 kilometers	Less than 500 feet	Less than 2 hours
CR-UAV	Close-Range	25 – 150 kilograms	10-30 kilometers	Less than 10,000 feet	2-4 hours
SR-UAV	Short-Range	50 – 250 kilograms	30-70 kilometers	Less than 10,000 feet	3-6 hours
MR-UAV	Medium-Range	150 – 500 kilograms	70-200 kilometers	Less than 16,500 feet	6-10 hours
MALE	Medium-Altitude Long-Endurance	1000 – 1500 kilograms	Over 500 kilometers	16,500-25,000 feet	24-48 hours
HALE	High-Altitude Long-Endurance	Over 2000 kilograms	Over 2000 kilometers	Less than 65,000 feet	24-48 hours
STRATO-UAV	Stratospheric	Over 2500 kilograms	Over 2000 kilometers	Over 65,000 feet	24-48 hours

Σχήμα 2. 21: Κατηγορίες συστημάτων ΜΕΑ[30]

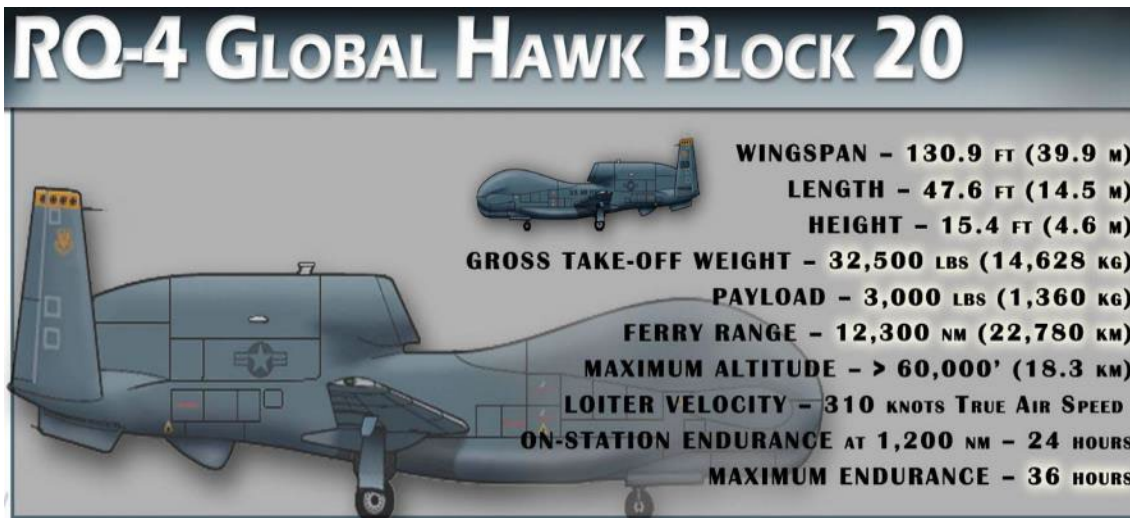


Σχήμα 2. 22: Κλιμάκωση κατά βάθος των συστημάτων ΜΕΑ

2.2.1 ΜΕΑ ΜΑΚΡΑΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΗΝΕΚΟΥΣ (Long Endurance-Long Range)

Αποτελούνται από ένα βασικό κορμό Α/Φ με σταθερά πτερύγια, με τον κινητήρα προώθησης στο πίσω μέρος του Α/Φ και με ουραία πτερύγια για την αλλαγή κατεύθυνσης του Α/Φ τόσο οριζόντια όσο και κάθετα. Μπορούν να φέρουν βαρύ ωφέλιμο φορτίο για μεγάλες αποστάσεις (5000 χιλιόμετρα) και για αυτό αποτελούν και τα μεγαλύτερα σε μέγεθος ΜΕΑ. Παρακάτω συνοψίζονται σε δύο κατηγορίες με την παρουσίαση των χαρακτηριστικών των κυρίων μοντέλων κάθε κατηγορίας:

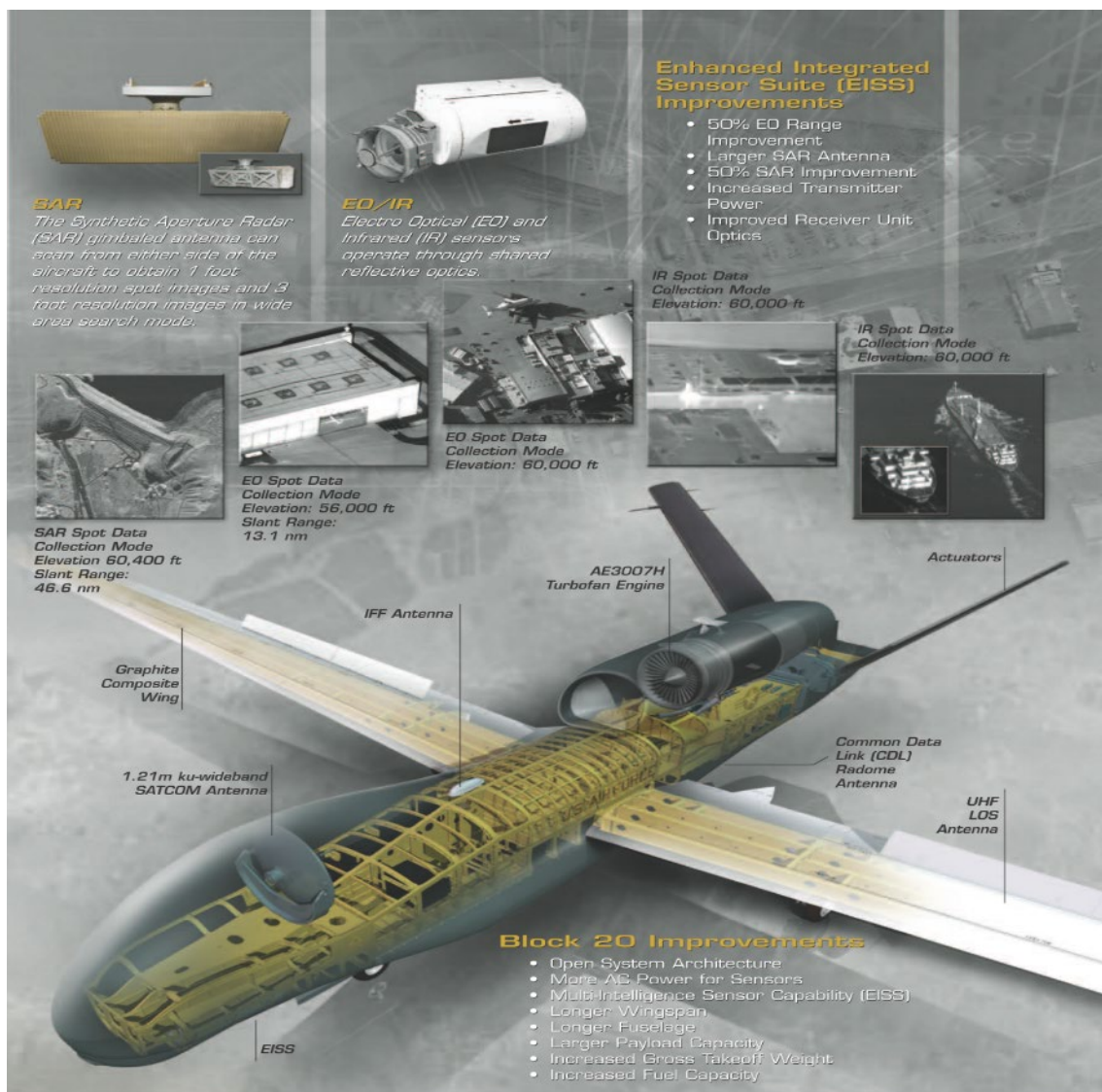
- Μεγάλου Ύψους και Μακρού Βεληνεκούς (High Altitude Long Endurance-HALE): Επιχειρούν σε ύψος πάνω από 15,000 μέτρα και για αποστολές διάρκειας μεγαλύτερης του 24ώρου φέρνοντας εις πέρας αποστολές επιτήρησης και αναγνώρισης σε παγκόσμια εμβέλεια και έχοντας τη δυνατότητα μεταφοράς οπλισμού. Επιχειρούν λόγω αναπτύγματος και λόγω μη δυνατότητας μεταφοράς από άλλα μέσα αλλά και λόγω της ασύμφορης σε χρόνο και οικονομικά σε μία τέτοια περίπτωση επιχείρησης, από σταθερές βάσεις (αεροδιαδρόμους, σταθμούς ανεφοδιασμού και συντήρησης). Αντιπροσωπευτικό σύστημα ΜΕΑ αυτής της κατηγορίας αποτελεί το **RQ-4 Global Hawk** της εταιρίας Northrop Grumman (**Σχήμα 2.7**) του οποίου τα κύρια χαρακτηριστικά παρουσιάζονται:



Σχήμα 2. 23: RQ-4 Global Hawk

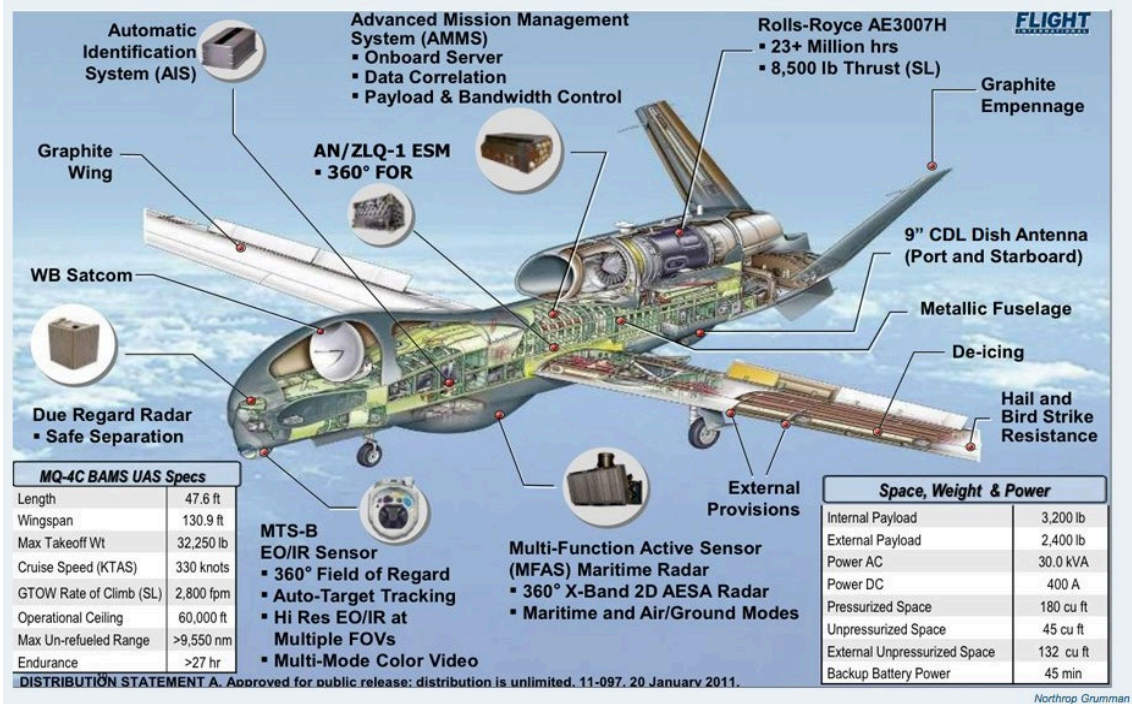
- Αισθητήρες:
 - i) Διαθέτει ραντάρ συνθετικού διαφράγματος[26] με ανάλυση 1.0/0.3 (WAS/SPOT).
 - ii) Ηλεκτροπτικούς (EO) ακρίβειας NIIRS[27] 6.0/6.5 (WAS/SPOT).
 - iii) Υπέρυθρους (IR) ακρίβειας NIIRS 5.0/5.5 (WAS/SPOT).

- ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ:
 - i) Δορυφορική επικοινωνία στην Κυ ζώνη (12,5 GHz κάτω ζεύξη-18 GHz άνω ζεύξη) με ρυθμούς μετάδοσης από 1,5 έως 47,9 Mbps.
 - ii) Dual Band Common Data Link [29] εντός του LOS (Line of Sight) με ρυθμούς μετάδοσης 137 και 274 Mbps.
 - iii) UHF SATCOM/LOS και Inmarsat για την διοίκηση και τον έλεγχο του Α/Φ (C2).
 - iv) Γραμμή ATC (Air traffic Control).
 - v) Secure Voice.



Σχήμα 2. 24: Αισθητήρες και υποσύστημα επικοινωνιών του MEA RQ-4 Global Hawk

- Μεσαίου Ύψους και Μακρού Βεληνεκούς (Medium Altitude Long Endurance- MALE): Επιχειρούν σε ύψος μεταξύ 5,000-15,000 μέτρων για διάρκεια έως 24ώρου. Έχουν αποστολές παρόμοιες με τα HALE αλλά σε σχετικά μικρότερο βεληνεκές και επιχειρούν επίσης από σταθερές βάσεις. Αντιπρόσωπος αυτής της κατηγορίας θεωρείται το **MEA MQ-9 Predator B** ή **Reaper** το οποίο διαθέτει:



Σχήμα 2. 25: Αισθητήρες και υποσύστημα επικοινωνιών του MQ-9 Predator

- Αισθητήρες:
 - i) Διαθέτει αισθητήρα ειδικά κατασκευασμένο για εφαρμογές σε υψηλό υψόμετρο της εταιρίας Raytheon, MTS-B (Multi-Spectral Targeting System) με ηλεκτροπτική κάμερα (E/O), υπέρυθρη κάμερα (IR) με ενσωματωμένο καταδείκτη laser και φωτισμού (illumination).
 - ii) Ραντάρ πολλαπλών χρήσεων Lynx με δυνατότητες υψηλής ποιότητας εικόνας και βίντεο ακόμη και μέσα από σύννεφα, βροχή, καπνό ή σκόνη από απόσταση μέχρι 80 χιλιομέτρων. Περιλαμβάνει δύο SPOT και δύο WAS λειτουργίες SAR. Ακόμη περιλαμβάνει λειτουργία D/GMTI (Dismount-Ground Moving Target Indicator) για την ανίχνευση και παρακολούθηση οχημάτων και προσωπικού τα οποία κινούνται με πολύ χαμηλές ταχύτητες στο έδαφος και λειτουργία MWAS (Maritime Wide Area Search) για τον εντοπισμό και παρακολούθηση πλοίων σε οποιαδήποτε κατάσταση θαλάσσης.
 - iii) Ραντάρ αέρος -θαλάσσης πολλαπλής χρήσης.
 - iv) Σύστημα Ηλεκτρονικού πόλεμου SIGINT (Signal Intelligence)/ ESM (Electronic Warfare Support Measures).
- Επικοινωνίες:
 - i) Αυτόματο σύστημα ταυτοποίησης AIS (Automatic Identification System).
 - ii) Δυνατότητα λειτουργίας επικοινωνιακού αναμεταδότη.
 - iii) Επικοινωνία TCDL (Tactical Common Data Link) στη C-ζώνη (4GHz- 8GHz) εντός του LOS και SATCOM στη Ku-ζώνη εκτός του LOS.
- Οπλισμός:
 - i) 4 A-T (Αντιαρματικοί) πύραυλοι Hellfire AGM 114-115.
 - ii) Κατευθυνόμενα Βλήματα GBU 12 (Guided Bomb Unit).
 - iii) Βόμβες GBU 38 (MK-82/500 λίβρες) JDAM (Joint Direct Attack Munition/GPS-INS).
 - iv) Κατευθυνόμενες με βόμβες GBU 49 laser JDAM(GPS and Laser guided version).

2.2.2 ΜΕΑ ΜΕΣΑΙΟΥ ΒΕΛΗΝΕΚΟΥΣ Η ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΦΥΣΕΩΣ (Medium Range or Tactical UAV-TUAV)

Έχουν δυνατότητες μεταξύ 100 – 300 χιλιόμετρα επιχειρησιακής ακτίνας δράσεως ,πολύ μικρότερο μέγεθος από τα συστήματα HALE-MALE και είναι πιο απλά στην λειτουργία τους. Επιχειρούν συνήθως από σταθερές βάσεις αλλά έχουν δυνατότητα μεταφοράς. Η αυτονομία τους δεν ξεπερνά τις 21 ώρες. Σε αυτήν

κατηγορία ανήκουν και τα Τηλεχειριζόμενα Μη Επανδρωμένα Ελικόπτερα (Remotely Piloted Helicopter) ή ΜΕΑ καθέτου απογείωσης (Vertical take –off UAV). Σε αυτήν την κατηγορία στα Α/Φ σταθερής πτέρυγας αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το ΜΕΑ της ισραηλινής Malat και της αμερικάνικης Northrop Grumman **Hunter MQ-5B** , με αυτονομία 21 ώρες, το οποίο περιλαμβάνει:



Σχήμα 2. 26: MQ-5B Hunter

- Επικοινωνίες:
 - i) Χρησιμοποιεί σύνδεση στη C-ζώνη καθώς και CDL εντός του LOS.
 - ii) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αναμεταδότης.
- Αισθητήρες:
 - i) Ηλεκτροπτικούς και IR.
 - ii) Καταδείκτη laser.
- Έχει δυνατότητα τοποθέτησης οπλισμού σε ειδικά διαμορφωμένες θέσεις στα περύγια

Όσον αφορά τα Α/Φ περιστρεφόμενης πτέρυγας σε αυτή την κατηγορία θα παρουσιαστεί το ΜΕΑ της Northrop-Grumman **MQ-8C Fire Scout**, με αυτονομία διάρκειας έως 12 ώρες, το οποίο χρησιμοποιείται από το ΠΝ των ΗΠΑ και επιχειρεί από πλατφόρμες (επίστεγα) πλοίων σαν εξέλιξη του MQ-8B περιλαμβάνοντας:

- Επικοινωνίες:
 - i) TCDL (Tactical Common Data Link) εντός του LOS.
 - ii) Σύστημα AIS.

iii) Σύστημα αυτόματης προσέγγισης και προσγείωσης UCARS-V2 (UAV Common Automated Recovery System).

iv) Επικοινωνία με το σταθμό ελέγχου στην ζώνη VHF/UHF.

v) Χρήση σαν αναμεταδότης επικοινωνιών.

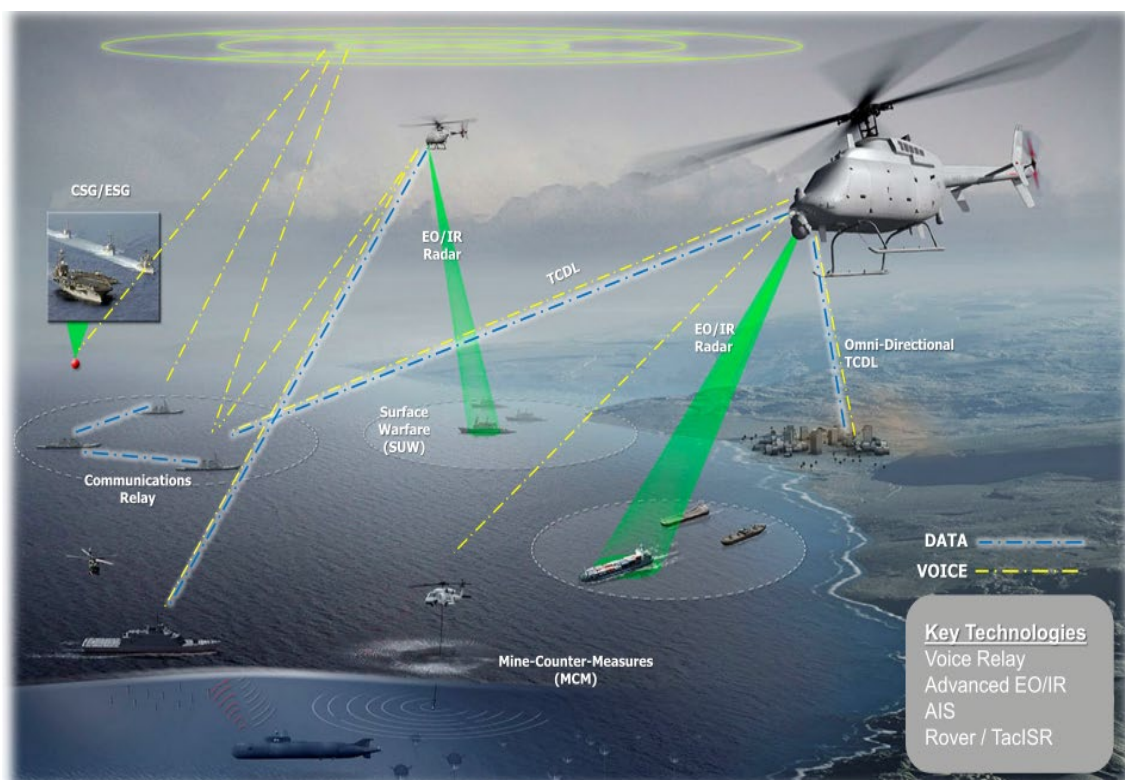
- Αισθητήρες:

i) Κάμερα E/O I/R LR/LD (Long Range Laser Designator/Range Finder).

ii) Ραντάρ πολλαπλών χρήσεων SAR και ναυτικό εντός του 2018.

iii) Σύστημα ανιχνεύσεως και εντοπισμού ναρκών και εμποδίων εγγύς της ακτής AN/DVS-1 COBRA (Coastal Battlefield Reconnaissance and Analysis) μέχρι το 2020.

- Προς το παρόν δεν έχει τοποθετηθεί αλλά δύναται να τοποθετηθεί στο εγγύς μέλλον.



Σχήμα 2. 27: MQ-8C Fire Scout

2.2.3 ΜΕΑ ΜΙΚΡΟΥ ΒΕΛΗΝΕΚΟΥΣ (Close- Range UAV)

Έχουν ακτίνα δράσης μέχρι τα 100 χιλιόμετρα και χρησιμοποιούνται από κινητές μονάδες ο οποίες αναπτύσσονται όπου καθίσταται η ανάγκη χρήσης τέτοιων συστημάτων. Αναλαμβάνουν πληθώρα αποστολών είτε σε

πολιτικές είτε σε στρατιωτικές εφαρμογές. Λόγω της μικρότερης ακτίνας δράσεως και των τεχνικών χαρακτηριστικών τους υπόκεινται σε μεγαλύτερους περιορισμούς όσον αφορά τις απότομες ατμοσφαιρικές αλλαγές στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, το επιχειρησιακό ύψος και την ανίχνευση από τα εχθρικά αντίμετρα κατά την εκπλήρωση της αποστολής τους. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Α/Φ χωρίς δυνατότητα κάθετης απογείωσης (Non-VTOL): Αναλόγως της τακτικής χρησιμοποίησης εάν μεν υπάρχει κατάλληλος διάδρομος τροχοδρόμησης το ΜΕΑ μπορεί να εκτελέσει διαδικασίες απογείωσης και προσγείωσης χωρίς την ανάγκη τροποποίησης των πτερύγων ή της δυνάμεως πρόωσης. Εάν δε δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα (όπως είναι σύνηθες λόγω της άμεσης ανάγκης χρησιμοποίησης τους ταχύτατα σε οποιοδήποτε πεδίο της μάχης για την εγγύς υποστήριξη των ανεπτυγμένων στο έδαφος μονάδων) είναι αναγκαία η χρήση ράμπας εκτόξευσης στην οποία στο Α/Φ θα επιτυγχάνει ταχύτητα απογείωσης με την δυναμική του επιτάχυνση μέσω μηχανισμού. Ομοίως θα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα απόσβεσης κραδασμών για την ομαλή προσγείωση του ΜΕΑ σε ανώμαλο έδαφος το οποίο συνήθως περιλαμβάνει την απελευθέρωση ενός αλεξιπτώτου χαμηλής ταχύτητας καθόδου σε συνδυασμό με ένα αερόσακο οποίος αναπτύσσεται πριν την πρόσκρουση του ΜΕΑ στο έδαφος. Παρακάτω αναλύεται το ΜΕΑ της εταιριών AAI (Aircraft Armament Inc) και της IAI (Israel Aircraft Industries) **RQ-2 Pioneer**:



Σχήμα 2. 28: RQ-2 Pioneer

- Επικοινωνίες:
 - i) Tactical Common Data Link εντός του LOS.
 - ii) Σύστημα αυτόματης προσέγγισης UCARS (UAV Common Automated Recovery System).
- Αισθητήρες POP 300D-HD που διαθέτει:

- i) Υψηλής ευκρίνειας E/O και I/R φωτογραφική κάμερα και βιντεοκάμερα.
- ii) Καταδείκτη laser.
- iii) Αποστασιόμετρο laser.
- iv) Laser pointer.

• A/Φ καθέτου απογείωσης- περιστρεφόμενης πτέρυγας (VTOL):
 Αν και αυτού του είδους ΜΕΑ δεν επιβαρύνουν με περιττό εξοπλισμό για την απογείωση και προσγείωση τους, παρόλα αυτά έχουν εξελιχθεί και χρησιμοποιηθεί πολύ λιγότερο σε σχέση με τα ΜΕΑ σταθερής πτέρυγας αυτής της κατηγορίας λόγω της διαφοράς στην πτητική σταθερότητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί το ΜΕΑ της αγγλικής εταιρίας ML Aviation **Sprite** (Surveillance Patrol Reconnaissance Intelligence Target Designation Electronic Warfare) το οποίο κατασκευάστηκε πρώτη φορά το 1980:



Σχήμα 2. 29: MEA Sprite

- Ο εξοπλισμός του περιλαμβάνει:
 - i) Θερμική κάμερα, έγχρωμη κάμερα ημέρας και χαμηλού φωτισμού.
 - ii) Ανιχνευτή NBC ουσιών.
 - iii) Καταδείκτη laser.
 - iv) Εξοπλισμό ηλεκτρονικού πολέμου (φίμωση ραντάρ).

2.2.4 MINI-MEA (Mini UAV-MUAV)

Έχουν ακτίνα δράσης μέχρι 30 χιλιόμετρα, και επιχειρησιακό ύψος μέχρι τα 1000 μέτρα. Αναπτύσσονται και εκτοξεύονται από προσωπικό (συνήθως όχι πάνω από 2 άτομα) στο πεδίο επιχειρήσεων κατά την χρησιμοποίησή τους από άνδρες και για αυτό το λόγο δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 10 κιλά σε βάρος. Τόσο στον στρατιωτικό όσο και στον πολιτικό τομέα ο έλεγχος και η επιχειρησιακή τους χρησιμοποίηση γίνεται από κινητές μονάδες κατωτέρων ιεραρχικά κλιμακίων για αποστολές αναγνώρισης παρατήρησης και επιτήρησης R&S (Reconnaissance and Surveillance) από πολύ χαμηλό ύψος (στον στρατιωτικό πχ. μια ομάδα βατραχανθρώπων για Close Target Recognition-CTR από 50-100 μέτρα). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί το **ηλεκτρικής παροχής** ισχύος MEA της αμερικάνικης εταιρίας AeroVironment **RQ-11 Raven**:

- **Επικοινωνίες:** Επιχειρεί σε VHF/UHF συχνότητες εντός του LOS μέχρι 10 χιλιόμετρα. Επίσης διαθέτει σύστημα αυτόματης επιστροφής στο επιθυμητό σημείο περισυλλογής μέσω GPS.
- **Αισθητήρες:** Διαθέτει E/O αισθητήρες ημέρας και I/R για την νύκτα. Αποστέλλει βίντεο σε ζωντανή μετάδοση με τοπογραφική συσχέτιση (διόπτρευση-στίγμα).



Σχήμα 2. 30: RQ-11 Raven

2.2.5 MICRO-MEA (Micro UAV-MAV)

Χρησιμοποιούνται για αποστολές ISR σε κατοικημένους τόπους σε πολύ μικρές αποστάσεις (ακόμη εντός του ιδίου κτηρίου) και λόγω του ανορθόδοξου τρόπου επιχειρησιακής τους χρησιμοποίησης, έχουν την ικανότητα, μεν να αιωρούνται και να πετούν αθόρυβα κοντά στο στόχο καθώς επίσης και να επικάθονται πάνω σε αντικείμενα, τα οποία μπορούν να τους παρέχουν κάλυψη και απόκρυψη, και να παρατηρούν από εκεί. Επιδέχονται δε, μεγάλους περιορισμούς στην σταθερότητα πτήσεως, λόγω του πολύ μικρού τους μεγέθους, ανάπτυγμα πτερύγων 32 εκατοστά, από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Λόγω του ανορθόδοξου τρόπου χρησιμοποίησης τους, έχουν διάφορα σχήματα και για την παραλλαγή τους προσομοιάζουν σε διάφορους τύπους ζώων αντικειμένων[32] (συνήθως πουλιών) όπως α.) σταθερές

πτέρυγας, β.) περιστρεφόμενης πτέρυγας, γ.) παλλόμενων πτερύγων και δ.) ανώσεως μέσω αέρα διερχόμενου από σωλήνα (ducted lift-fan). Σε αυτή την κατηγορία ανήκει το MEA της αμερικάνικης εταιρίας Lockheed Martin **Indago** με εκπέτασμα φτερών 32 εκατοστά και βάρους 2,3 κιλών:

➤ Επικοινωνίες: 802.16 Secure Digital Data Link (2,4-2,7 GHz) για απόσταση μέχρι ένα χιλιόμετρο εντός του LOS και μέχρι 10 χιλιόμετρα με κατευθυντική κεραία μεγάλης εμβέλειας. Διαθέτει σύστημα GPS.

➤ Αισθητήρες: E/O και I/ R κάμερα.



Σχήμα 2. 31: MEA Indago

2.2.6 NANO-MEA (Nano Air Vehicles-NAV)

Έχουν εκπέτασμα πτερύγων μέχρι 5 εκατοστά και βάρος μέχρι 10 γραμμάρια. Για την κάλυψη τους, έχουν εμβιομηχανικό σχήμα και εφαρμόζουν, εμπνευσμένη από ζώα όπως το «κολιμπρί» ανορθόδοξη, μεταβαλλόμενη αερομηχανική αναδιπλωμένων πτερύγων (active wing shape flapping wings) και χρησιμοποιούνται για αποστολές πολύ κοντινής παρατήρησης-επιτήρησης με την τοποθέτηση μικροσκοπικών συστημάτων προώθησης, κάμερας, επικοινωνιών και ελέγχου[33] όπως το MEA της εταιρίας Aerovironment **Hummingbird (Κολιμπρί)** με εκπέτασμα 16 εκατοστά και βάρος 19 γραμμάρια:



Σχήμα 2. 32: MEA Hummingbird

- Επιτυγχάνει ταχύτητα μέχρι 18 Χλμ/ώρα.
- Έχει αυτονομία 11 λεπτά.
- Διαθέτει επικοινωνία μέσω RF σύνδεσης και φέρει χαμηλής ευκρίνειας έγχρωμη βιντεοκάμερα.

2.2.7 ΜΕΑ ΜΑΧΗΣ (Unmanned Combat Air Vehicle-UCAV)

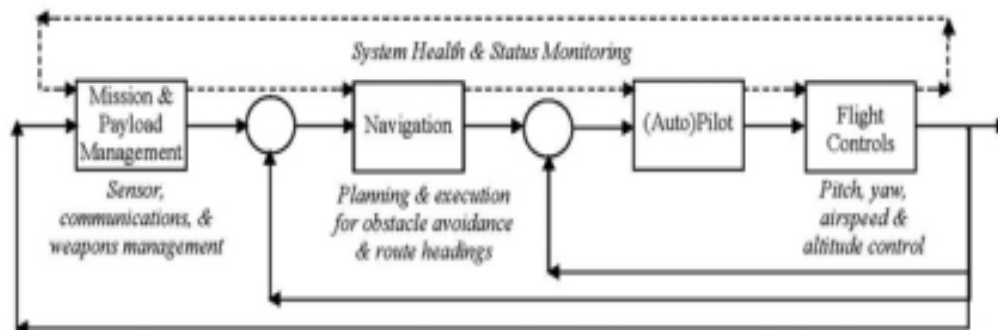
Περιλαμβάνουν αεροσχήματα είτε σταθερής είτε περιστρεφόμενης πτέρυγας (UCAR) [8] τα οποία αφενός μεν μπορούν να φέρουν διαφόρων τύπων οπλισμού για την εκπλήρωση της αποστολής τους, αφετέρου μπορούν να αναλάβουν αποστολές «μάχης επανδρωμένων Α/Φ» σε έδαφος απαγόρευσης πτήσεων (Anti access-Area Denial, A2/AD) [34] και με την εκτέλεση ελιγμών εναντίον ενός άλλου επανδρωμένου ή μη μαχητικού Α/Φ. Αν και έχουν δημιουργηθεί διαφορετικά προγράμματα στην προσπάθεια επίτευξης κατασκευής ενός UCAV, το 2004 συγχωνεύτηκαν από το ΗΠΑΜ των ΗΠΑ σε ένα, υπό την αιγίδα του ιδρύματος DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) για την κατασκευή του J-UCAS (Joint Unmanned Combat Air System) για ενσωμάτωση του σε αεροπλανοφόρο (Unmanned Carrier Launched Airborne Surveillance and Strike- UCLASS) και με αυτονομία 11-14 ώρες μέχρι το 2018[31] . Σε αυτήν τη κατηγορία η εταιρία Northrop Grumman κατασκευάζει το UCLASS X-47B με εκπέτασμα 20 μέτρα και αυτονομία εννέα ώρες για 2500 χιλιόμετρα.



Σχήμα 2. 17: UCLASS X-47B [34]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

Όπως προαναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η επικοινωνία μεταξύ των ΜΕΑ περιλαμβάνει την άνω και την κάτω ζεύξη κατά τις οποίες γίνεται η μεταβίβαση α.) των εντολών πτήσης, διοίκησης και ελέγχου και β.) των προϊόντων των υποσυστημάτων ωφέλιμου φορτίου και των δεδομένων διαχείρισης κατάστασης του ΜΕΑ (Housekeeping Data). Η διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ των ΜΕΑ και του σταθμού βάσης αποτελεί την σημαντικότερη παράμετρο στην εκτέλεση της αποστολής τους καθώς οδεύουμε προς την επίτευξη δίκτυο-κεντρικής αρχιτεκτονικής, επειδή αποτελεί τον εξώτερο κόμβο κατά την ιεράρχηση των επιπέδων ελέγχου σε ένα ΜΕΑ όπως αυτός υλοποιείται κατά στάδια [35] (**Σχήμα 3.1**). Οποιαδήποτε λοιπόν αποτυχία του συστήματος επικοινωνιών η οποία μπορεί να οφείλεται σε οποιαδήποτε δυσλειτουργία ενός εσωτερικού κόμβου λειτουργιών θα επιφέρει αποκοπή των υπολοίπων λειτουργιών- κόμβων από τον χειριστή του συστήματος με πιθανότητα για ολέθριες συνέπειες τόσο για τους ανθρώπους όσο και για το σύστημα.



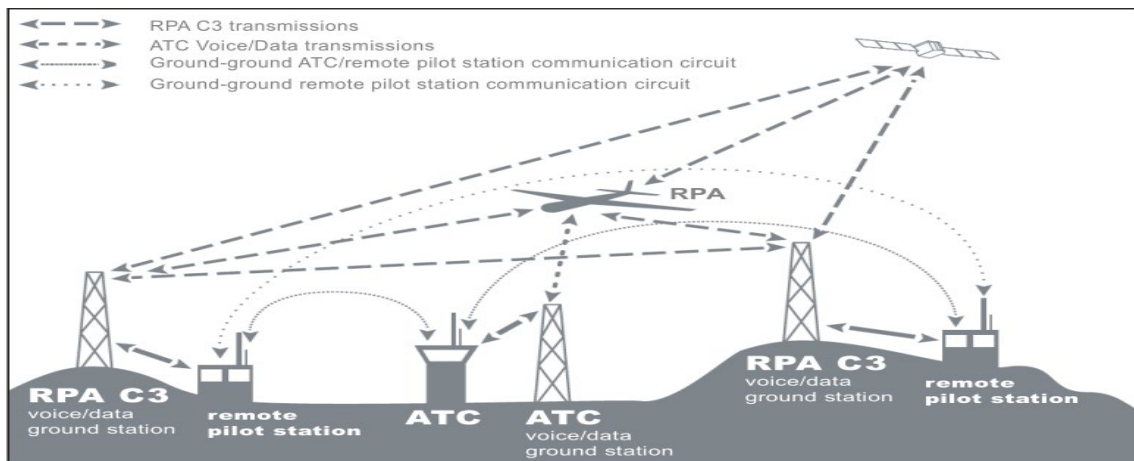
Σχήμα 3. 42: Ιεραρχική διαδοχή λειτουργιών ελέγχου σε ένα ΜΕΑ[35]

Γενικά ένα ΜΕΑ για να μπορέσει να επιχειρήσει με ασφάλεια θα πρέπει να εκτελεί τρεις βασικές λειτουργίες στον ίδιο βαθμό με τα επανδρωμένα Α/Φ. Αυτές είναι η ασφαλής και αξιόπιστη αεροπλοΐα, ο ακριβής εντοπισμός στίγματος και η σωστή πλοήγηση του ΜΕΑ και η εξασφάλιση επικοινωνίας με τον σταθμό βάσης. Για να μπορεί να εκτελέσει τις παραπάνω λειτουργίες χρειάζεται να αναπτυχθούν δράσεις με έναν από τους ακόλουθους τρόπους : α.) Πλήρης έλεγχος όλων των λειτουργιών από σε πραγματικό χρόνο από προσωπικό στο έδαφος (πιλότος εδάφους) (Man –in-the-loop), β.) Ημιαυτόνομη όπου ένας αυτόματος πιλότος ελέγχει τη σταθερότητα της πτήσης και εκτελεί τις εντολές και το σχέδιο πτήσης, σύμφωνα με τις οδηγίες που έχει λάβει από τον πιλότο εδάφους (Man-on- the-Loop) και γ.) Αυτόνομη όπου το ΜΕΑ εκτελεί τις λειτουργίες του χωρίς την άμεση καθοδήγηση από τον πιλότο στο έδαφος και μπορεί και εκτελεί αλλαγές στο σχέδιο πτήσης και στις εκτελούμενες λειτουργίες

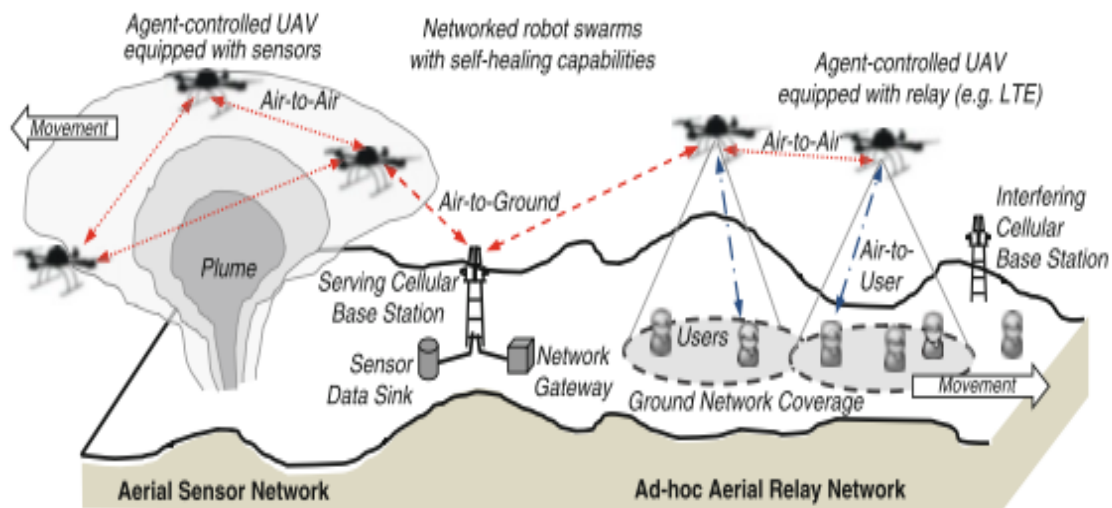
σύμφωνα με τις αλλαγές που δέχεται από το περιβάλλον. Ο συνηθέστερος τρόπος χειρισμού ενός MEA είναι με πλήρη έλεγχο κατά τη απογείωση- προσγείωση και στην ανάγκη κατάρρευσης των κύριων τρόπων επικοινωνίας και με ημιαυτόνομη καθοδήγηση κατά την εκτέλεση της προσχεδιασμένης από τον σταθμό εδάφους αποστολής και σχεδίου πτήσης.[42] .

Αρχικά υπήρχαν πολλοί τρόποι επικοινωνίας των MEA με τους σταθμούς βάσης, όπως μέσω ραδιοσυχνότητας (RF), μέσω laser και μέσω οπτικών ινών. Από τους παραπάνω τρόπους λόγω περιορισμών οι οποίοι προκύπτουν, οι δύο τελευταίοι έχουν εγκαταλειφθεί και χρησιμοποιείται μόνο ο πρώτος. Οι τρόποι επίτευξης επικοινωνίας μέσω RF συχνότητας (Σχήμα 3.2) για τα MEA είναι α.) μέσω απευθείας ράδιο σύνδεσης του MEA με τον σταθμό βάσης εντός του LOS, β.) μέσω δορυφορικής σύνδεσης γ.) με τη χρήση αναμεταδότη, δ.) μέσω δόμων κυψελωτών συστημάτων ή μέσω επίγειων κυψελωτών δικτύων κορμού - σταθμών εκπομπής βάσης (BTS –Base Transceiver Station) στο έδαφος και δ.) με συνδυασμό των ανωτέρω[2]-[8].

α.)



β.)

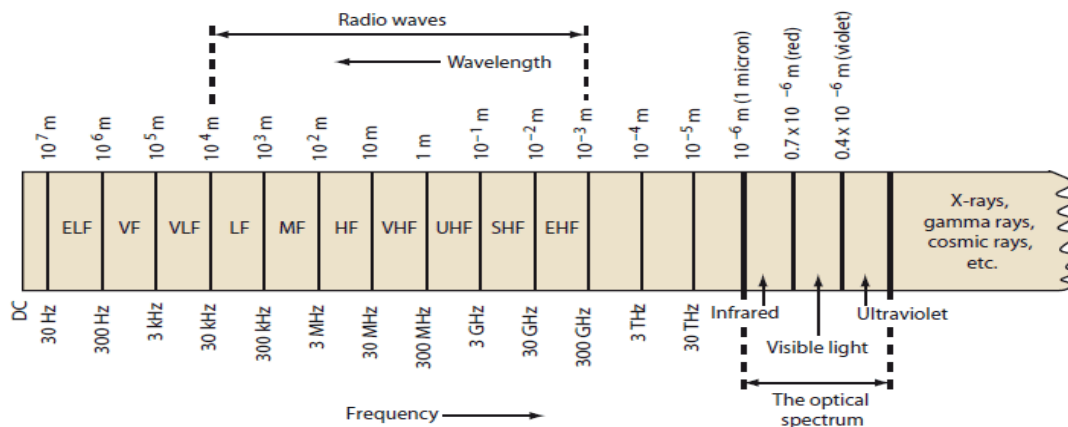


Σχήμα 3. 43: α.) Τρόποι Επικοινωνίας μεταξύ MEA και σταθμού βάσης.

β.) Σχηματισμός δικτύωσης μεταξύ MEA

3.1 ΦΑΣΜΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Οι επικοινωνιακές απαιτήσεις που διέπουν την ζεύξη μεταξύ του ΜΕΑ και του σταθμού βάσης και απορρέουν από την χρήση των UAS στον εναέριο χώρο όπου θα υπερίπτανται μαζί με άλλα Α/Φ πάνω από κατοικημένες περιοχές, καθορίζουν ως προαπαιτούμενα την εξασφάλιση ίδιων επιπέδων διαθεσιμότητας, αξιοπιστίας, ακεραιότητας και συνέχειας με αυτές που προβλέπονται στις πτήσεις επανδρωμένων Α/Φ (QoS)[36]. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων σε συνάρτηση με τις

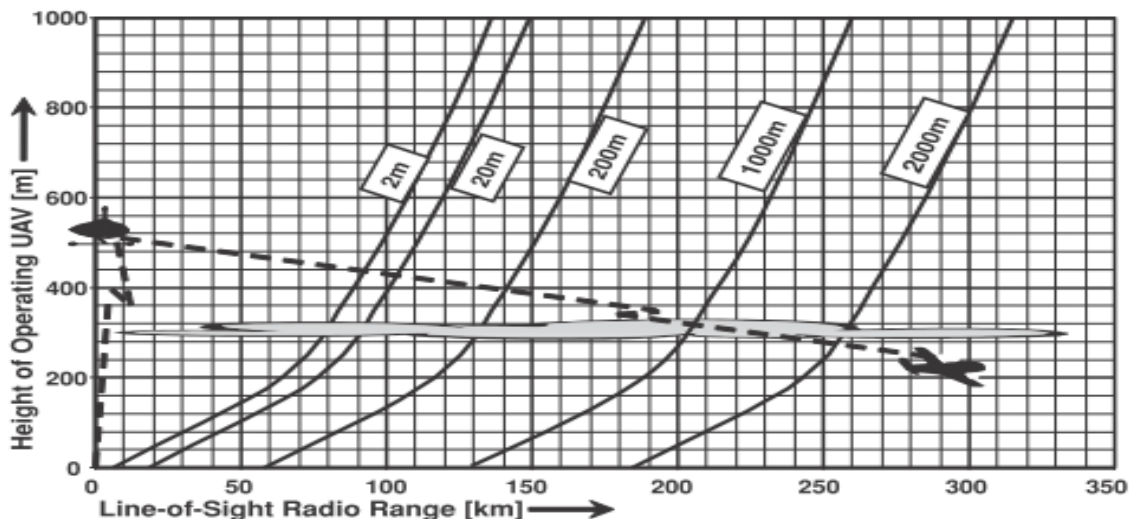


1. The electromagnetic frequency spectrum ranges from dc to light. The lower radio frequencies are designated mainly by frequency. The optical ranges are referred to by wavelength.

Σχήμα 3. 44: Η κατανομή του διαθέσιμου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

επιχειρησιακές απαιτήσεις των ΜΕΑ θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα με σύνδεση τόσο για τον έλεγχο του Α/Φ και την μεταφορά δεδομένων προς τον σταθμό βάσης όσο και με σύνδεση (voice/data) για την ενημέρωση των εκάστοτε υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας (ATC- Air Traffic Services) συνήθως σε VHF-UHF συχνότητες[2]. Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για εκχώρηση και ανάθεση συχνοτήτων εντός του υπάρχοντος ραδιοφάσματος για την κάλυψη ολοένα αυξανόμενων υπηρεσιών , όπως και τα UAS, έχει οδηγήσει στην συγχώνευση χρήσης του ραδιοφάσματος τόσο από την τα επανδρωμένα Α/Φ όσο και από τα ΜΕΑ όταν αυτά επιχειρούν σε μη απομονωμένο εναέριο χώρο από τα πολιτικά αεροσκάφη[37]. Η Παγκόσμια Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) σε συνεργασία με την EASA (European Aviation Safety Agency) και την FAA (Federal Aviation Administration) έχουν καθορίσει τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (bandwidth) σε 34 MHz για τις ραδιοζεύξεις του ΜΕΑ με επίγειους σταθμούς εντός του LOS και σε 56 MHz για τις δορυφορικές ζεύξεις, των μεγαλύτερων σε μέγεθος και ανυψωτική ικανότητα ΜΕΑ, εκτός του LOS- BLOS (Beyond Line of Sight) [37-39-42]. Οι περιορισμοί στην χρήση του ραδιοφάσματος (Σχήμα 3.5) από τις διάφορες εφαρμογές όπως αυτές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα έχουν οδηγήσει στην χρήση συχνοτήτων VHF-UHF-SHF-EHF στις οποίες είναι απαραίτητη η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (LOS) καθώς σε αυτές τις συχνότητες το σήμα δεν υπόκειται ανάκλαση από την

ατμόσφαιρα και απορροφάται. Η εκπομπή εντός του LOS (Line of Sight) περιορίζει το Α/Φ εκτός της αποφυγής των εμποδίων και σε περιορισμούς βεληνεκούς, καθώς η απόσταση στην οποία το ΜΕΑ θα επιχειρήσει την αποστολή του εξαρτάται από το ύψος στο οποίο υπερπίπτει πάνω από το έδαφος (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3. 45: Επέκταση του LOS ανάλογα με το ύψος

Οι κατανομή των συχνοτήτων γίνεται σε συνεργασία με τους κύριους και αρμόδιους φορείς οι οποίοι είναι α.) την ITU (International Telecommunications Unions), β.) την IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineering), ο ICAO, δ.) το NATO και δ.) την E.E , την EASA, την FAA, την RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) και την EUROCAE (European Organisation for Civil Aviation Equipment) (Σχήμα 3.6) σύμφωνα πάντα με τα καθοριζόμενα στα παγκόσμια συνέδρια για την κατανομή του ράδιο-φάσματος και των δορυφορικών επικοινωνιών ITU/WRC (World Radio- Communication Conference) όπου γίνεται προσπάθεια για ομοιόμορφο και σύμφωνα με τις αναδυόμενες ανάγκες, για τη χρήση του ραδιοφάσματος, καθορισμό των ζωνών σε παγκόσμιο επίπεδο[8].

Band Name (Frequency)	Abbr.	ITU Band	Frequency	Wave Length	Typical Uses
Extremely Low	ELF	1	3-30Hz	100,000km-10,000km	Submarine Communications
Super Low	SLF	2	30-300Hz	10000 - 1000km	Submarine Communications
Ultra Low	ULF	3	300-3000Hz	1000 -100km	Comm. in mines
Very Low	VLF	4	3-30kHz	100-10km	Heart Monitors
Low	LF	5	30-300kHz	10km-1km	AM Broadcast
Medium	MF	6	300-3000kHz	1km-100m	AM Broadcast
High	HF	7	3-30MHz	100m -10m	Amateur Radio
Very High	VHF	8	30-300MHz	10m-1m	TV Broadcast
Ultra High	UHF	9	300-3000MHz	1m-100mm	TV, phones, air to air comm. 2-way radios
Super High	SHF	10	3-30GHz *	100-10mm	Radars, LAN *
Extremely High	EHF	11	30-300GHz *	10mm-1mm	Astronomy *

* Note that these are microwave frequencies and are also used in domestic devices

Σχήμα 3. 46: Τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές στην κατανομή του χρησιμοποιούμενου ραδιοφάσματος

IEEE		EU, NATO, US ECM.	
BAND	FREQUENCY RANGE	BAND	FREQUENCY RANGE
HF	3 to 30MHz	A	0 to 0.25GHz
VHF	30 to 3MHz	B	0.25 to 0.5GHz
UHF	0.3 to 1.0GHz	C	0.5 to 1.0GHz
L	1 to 2GHz	D	1 to 2GHz
S	2 to 4GHz	E	2 to 3GHz
C	4 to 8GHz	F	3 to 4GHz
X	8 to 12GHz	G	4 to 6GHz
K _U	12 to 18GHz	H	6 to 8GHz
K	18 to 26GHz	I	8 to 10GHz
K _A	26 to 40GHz	J	10 to 20GHz
V	40 to 75GHz	K	20 to 40GHz
W	75 to 111GHz	L	40 to 60GHz
		M	60 to 100GHz

Σχήμα 3. 47: Κατανομή του ραδιοφάσματος αναλόγως του οργανισμού

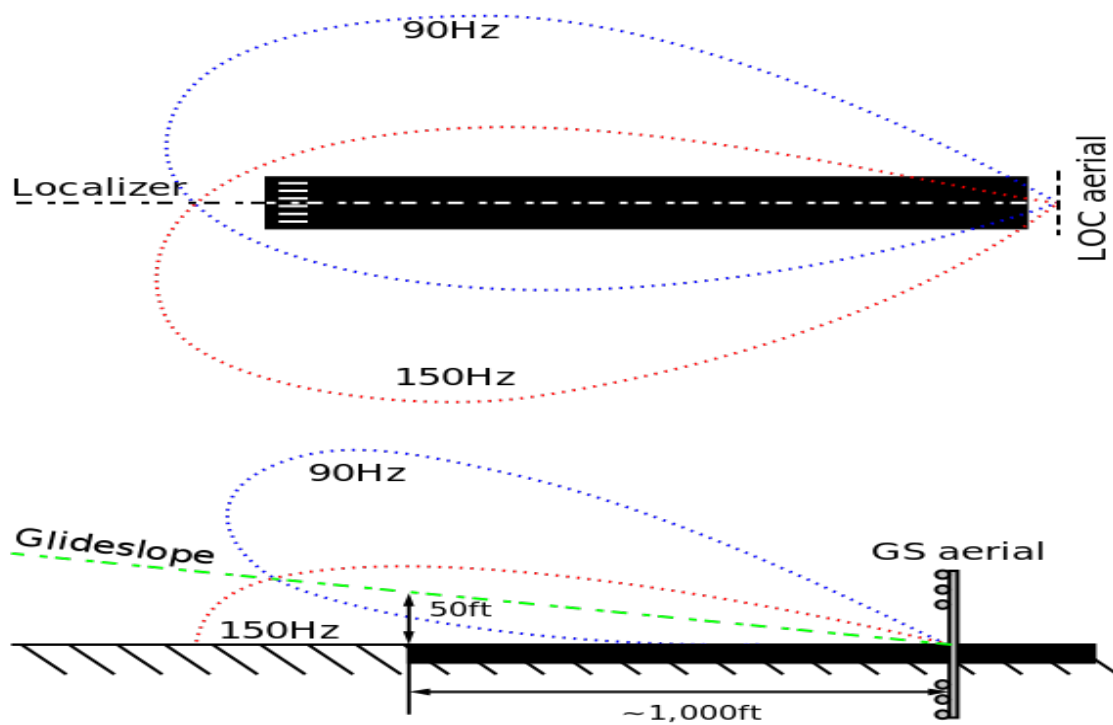
3.1.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΑΠΟ ΜΕΑ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟΥ ΡΑΔΙΟΦΑΣΜΑΤΟΣ

Οι συχνότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται από τα συστήματα ΜΕΑ σήμερα κυμαίνονται από το φάσμα των VHF (72 MHz) μέχρι το φάσμα της Ku ζώνης (15 GHz) παράλληλα με διάφορες υπηρεσίες οι οποίες λειτουργούν είτε εντός είτε εκτός του LOS. Δεδομένης της αξιοπιστίας των υπηρεσιών αυτών είτε εντός είτε εκτός του LOS καθώς και των απαιτήσεων, αναλόγως του ΜΕΑ, για επικοινωνία μπορεί να αντιστοιχηθούν οι ζώνες των αεροναυτικών υπηρεσιών[43] με τις ζώνες που θα χρησιμοποιηθούν από τα ΜΕΑ. Οι κυριότερες υπηρεσίες παρουσιάζονται όπως παρακάτω:

1. ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service):

Περιλαμβάνει όλες τις παρεχόμενες υπηρεσίες ράδιο-πλοήγησης στην διεθνή αεροπλοΐα αποτελούμενο από σταθερούς αυτόνομους σταθμούς. Λειτουργεί υπό την μορφή αιτήσεως από το Α/Φ και απάντησης από την υπηρεσία μέσω του πιο προσβάσιμου αεροναυτικού σταθμού. Κύρια συστήματα τα οποία εμπεριέχονται σε αυτή την υπηρεσία είναι :

- ILS (Instrument Landing System): Αποτελεί βοηθητικό σύστημα το οποίο αποκαθιστά την οριζόντια και κάθετη πλοήγηση με τον αεροδιάδρομο σε περίπτωση φυσικής αδυναμίας μέσω εκπεμπόμενων ραδιοσημάτων καταδεικνύοντας το επιθυμητό σημείο πρόσπτωσης της τροχιάς του Α/Φ. Υλοποιείται με την χρήση των επίγειων Localizer (LOC) τα οποία είναι τοποθετημένα πριν από την έναρξη του αεροδιαδρόμου και αποτελούνται από αρκετές διατάξεις κατευθυντικών κεραιών οι οποίες εκπέμπουν σε στενό εύρος ζώνης, για την αποφυγή παρεμβολών, στο εύρος 108,10- 111,95 MHz.

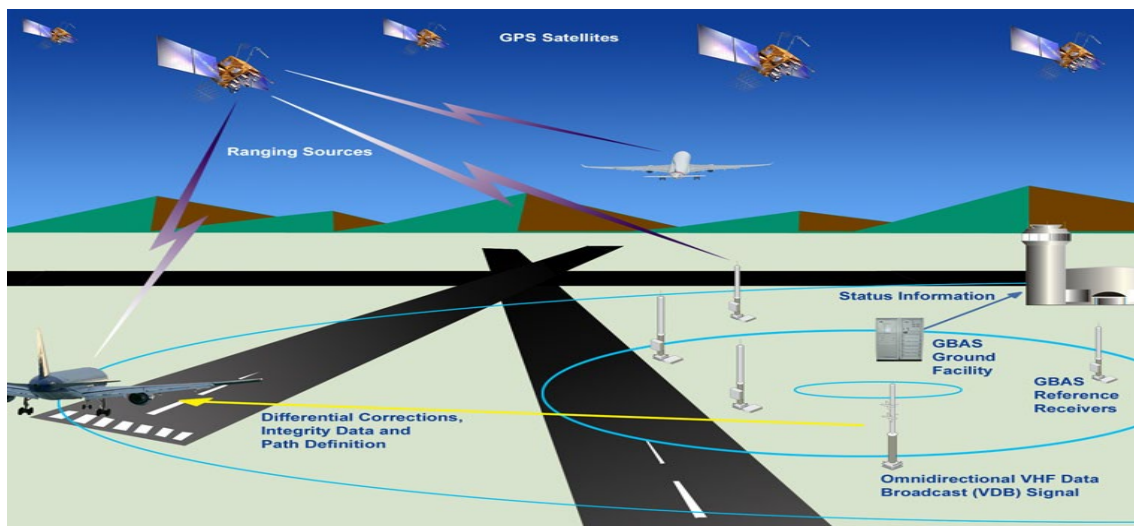


Σχήμα 3. 48: Τομείς κύριων λοβών εκπομπής συστήματος ILS



Σχήμα 3. 49: ILS Localizer

- GBAS (Ground- Based Augmentation System): Αποτελεί μία μέθοδο τοπικής (κοντά σε αεροδρόμια ή κρίσιμα σημεία) επαύξησης των δυνατοτήτων των συστημάτων πλοήγησης μέσω εγκαταστάσεων οι οποίες ενισχύουν το παρεχόμενο από την υπηρεσία GNSS (Global Navigation Satellite System) σήμα.



Σχήμα 3. 50: Ground Based Augmentation System

- IFF (Identification Friend or Foe): Αποτελεί σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των εχθρικών πολεμικών Α/Φ. Για την λειτουργία αυτού του συστήματος χρησιμοποιούνται πομποί και δέκτες οι οποίοι εκπέμπουν στα 1030 και λαμβάνουν στα 1090 MHz αντίστοιχα.

- VOR/DME (VHF Omnidirectional Range/Distance Measuring Equipment): Αποτελεί σύστημα το οποίο εκμεταλλεύόμενο το φαινόμενο Doppler εκπέμπει χρησιμοποιώντας ράδιο-φάρους (radio beacon) εκ των οποίων ο ένας λειτουργεί μεταξύ 962- 1213 MHz (DME) και ο άλλος μεταξύ 108-118 MHz (VOR), παγκατευθυντικά και υπολογίζουν την απόσταση και την γωνία μεταξύ του DME/VOR σταθμού(Σχήμα 3.10) και του Α/Φ. Το εύρος χρησιμοποίησης του συστήματος κυμαίνεται από 240 Km στα 18 Km υψόμετρο μέχρι τα 46 Km για ύψος 3,7 Km.



Σχήμα 3. 51: Σταθμός εκπομπής VOR/VORTAC

- TACAN/VORTAC (Tactical Air Navigation Systems/ VHF Omnidirectional Range Tactical): Αποτελεί παρόμοιο σύστημα με το VOR/DME το

οποίο χρησιμοποιείται για στρατιωτικούς σκοπού και λειτουργεί σε διαλειωτικότητα με τους υπάρχοντες DME/VOR επίγειους σταθμούς.

- **SSR (Secondary Surveillance Radar):** Αποτελεί ένα σύστημα το οποίο όχι μόνο παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη θέση του Α/Φ αλλά ζητά και επιπρόσθετες οι οποίες σχετίζονται με τη θέση το υψόμετρο την κατεύθυνση και άλλες επιπρόσθετες οι οποίες ανακτούνται μέσω μίας διαδικασίας αποστολής αίτησης στο Α/Φ και λήψης απάντησης παρόμοια με την υπηρεσία IFF. Χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 21,5 MHz και περιλαμβάνει τις επιμέρους υπηρεσίες όπως παρακάτω:



Σχήμα 3. 52: Secondary Surveillance Radar

- **ATCRBS/ (Air Traffic Control Radar Beacon System):** Αποτελείται από ένα πομποδέκτη ο οποίος λαμβάνει στα 1090 MHz και εκπέμπει στα 1030 MHz και χρησιμοποιείται από τις ATS (Air Traffic Service) είτε αυτόνομα είτε σε διασύνδεση με άλλα συστήματα για την παροχή πληροφοριών πτήσεων των Α/Φ. Η ακτίνα χρησιμοποίησής του συστήματος φθάνει τα 370 Km.

- **Mode S:** Αποτελεί παρόμοιο σύστημα με το ATCRBS με την διαφοροποίηση ότι αντί να αποστέλλει αιτήματα σε όλα τα Α/Φ στέλνει κατόπιν επιλογής σε ορισμένα από την υπηρεσία. Επίσης έχει τη δυνατότητα αποστολής ES (extended squitter) μηνύματος το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με την πρόθεση του Α/Φ στο μέλλον.

- **TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System):** Αποτελεί ένα σύστημα αποφυγής συγκρούσεων στον αέρα το οποίο χρησιμοποιεί ένα πομποδέκτη που εκπέμπει στα 1030 και λαμβάνει στα 1090 MHz. Εκπέμπει προς όλα τα Α/Φ τα οποία διαθέτουν παρόμοιο πομποδέκτη αποστέλλοντας και λαμβάνοντας μηνύματα τα οποία αναλόγως της απόστασης και της ταχύτητας μετατρέπονται σε εντολές προς σύστημα διεύθυνσης και ελέγχου του Α/Φ αλλάζοντας το ύψος πτήσης

για την αποφυγή σύγκρουσης. Λειτουργεί αυτόνομα από οποιοδήποτε επίγειο σύστημα.



Σχήμα 3. 53: Traffic Alert and Collision Avoidance System

2. **AM(R) S (Aeronautical Mobile (R) Service):** Υπηρεσία η οποία περιλαμβάνει την αποστολή μηνυμάτων που αφορούν την πτήση α.) Distress, β.) επείγοντα, γ.) ασφάλειας πτήσεως, δ.) μετεωρολογικά, ε.) ομαλής διεξαγωγής πτήσης, στ.) διόρθωσης πορείας. Θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση της στην περίπτωση που δύναται να χρησιμοποιηθεί η υπηρεσία AFS.

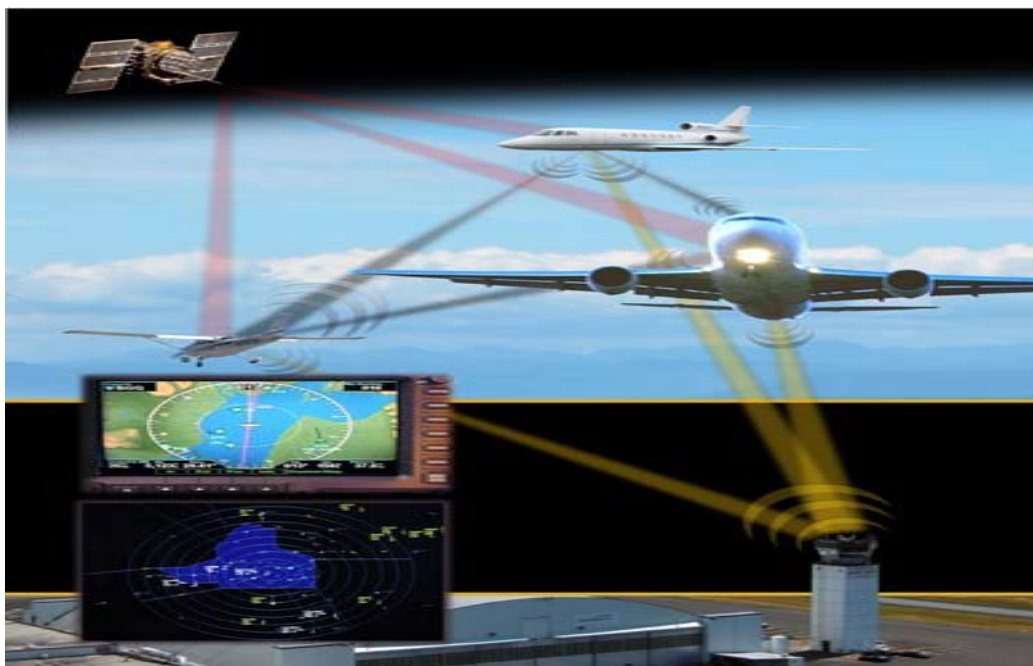
- UAT (Universal Access Transceiver)[45]: Αποτελεί υπηρεσία η οποία περιλαμβάνει τα εξής επιμέρους συστήματα:

- ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast): Παρέχει πληροφορίες στίγματος, ταχύτητας, ταυτότητας (IFF) και πορείας στην κονσόλα του Α/Φ, το οποίο είναι εφοδιασμένο με το σύστημα, των στοιχείων των άλλων Α/Φ. Χρησιμοποιεί ένα δέκτη ADB-S (in) ο οποίος είναι επιφορτισμένος με την συλλογή και απεικόνιση των δεδομένων των συστημάτων FIS-B, TIS-B και ADS-R που λαμβάνονται από τους πομπούς και ένα πομπό ADB-S (out) οποίος αποστέλλει ανά ένα δευτερόλεπτο τα στοιχεία του ίδιου Α/Φ. Χρησιμοποιεί την συχνότητα των 1090 MHz για τις ΗΠΑ τύπος πομπού Mode S ES (extended squitter) και των 978 MHz με εύρος ζώνης 1 MHz και για απόσταση 200 ναυτικών μιλίων.

- TIS-B (Traffic Information Service Broadcast): Αποτελεί επίγειο σύστημα το οποίο παρέχει πληροφορίες στίγματος και αποφυγής συγκρούσεως για Α/Φ που δεν είναι εφοδιασμένα με το σύστημα ADS-B. Χρησιμοποιεί τις συχνότητες των 1090 MHz (ES) για τις ΗΠΑ και των 978 MHz για το σύστημα UAT με εύρος ζώνης 1 MHz για ακτίνα 55 ναυτικών μιλίων.

- FIS-B (Traffic Information Service Broadcast): Αποτελεί ένα επίγειο σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί εξωγενείς πηγές για να παρέχει στα Α/Φ μετεωρολογικά δεδομένα καθώς και ειδικές ανακοινώσεις σχετικά με την

κατάσταση του εναερίου χώρου και τις NOTAM (Notice to Airmen). Λειτουργεί στην συχνότητα των 978 MHz με εύρος ζώνης 1 MHz για ακτίνα 200 ναυτικών μιλίων.



Σχήμα 3. 54: Σύστημα Traffic Information Service Broadcast

3. AMS(R) S (Aeronautical Mobile Satellite (R) Service):

Αποτελεί υπηρεσία η οποία λειτουργεί παρόμοια με την AM(R) S αλλά εκτός του LOS (BLOS) μέσω δορυφορικής μετάδοσης.

4. AFS (Aeronautical Fixed Service):

Χρησιμοποιείται για επικοινωνίες εδάφους- Α/Φ- εδάφους και περιλαμβάνει την ανταλλαγή μηνυμάτων από την ATS (Air Traffic Service) της χώρας που το Α/Φ υπερίππεται τα οποία αφορούν πληροφορίες για την πτήση α.) distress, β.) επείγοντα, γ.) ασφάλειας πτήσεως, δ.) μετεωρολογικά, ε.) ομαλής διεξαγωγής πτήσης, στ.) πληροφορίες (AIS), ζ.) πληροφορίες για λειτουργία εγκαταστάσεων και υπηρεσιών (πχ. επικοινωνίες) και η.) διορθωτικά σε πρότερη ανταλλαγή μηνύματος.

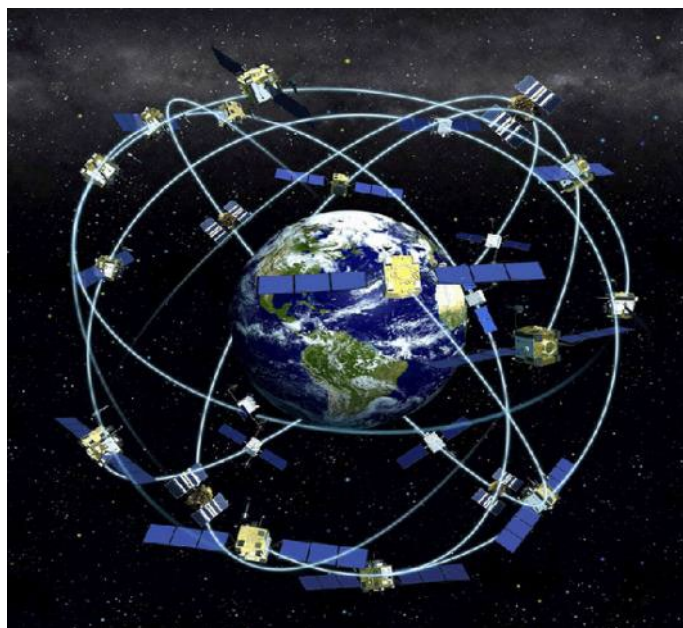
5. FSS (Fixed Satellite Service):

Είναι η υπηρεσία στην οποία οι επίγειοι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε σταθερές προσδιορισμένες θέσεις. Οι υλοποιούμενες ζεύξεις μπορεί α). Οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες είναι α.) 6725-7025 MHz (άνω ζεύξη) και 4500- 4800 MHz (κάτω ζεύξη) με εύρος ζώνης 300 MHz και β.) 12,75-13,25 GHz (άνω ζεύξη) και 10,70-10,95 / 11,20-11,45 (κάτω ζεύξεις) με εύρος ζώνης 500 MHz[44].

6. RNSS (Radio Navigation Satellite Service):

Χρησιμοποιείται για την επικοινωνία των δορυφόρων με το διάστημα. Λειτουργεί στην συχνότητα των 1176,45 MHz (Space to Space) . GNSS (Global Navigation Satellite System) (Space to Earth): Αποτελείται από συστήματα εντοπισμού θέσης-πλοήγησης και συγχρονισμού (Position-Navigation-Timing, PNT). Αποτελούνται από 24 MEO (Medium Earth Orbit) δορυφόρους με κύριο εκπρόσωπο το σύστημα GPS. Χρησιμοποιεί τρεις κεντρικές

φέρουσες συχνότητες στα 1575,42 MHz (L1), στα 1227,6 MHz (L2) και στα 1176,45 MHz (L5). Η L1 και η L5 συχνότητες χρησιμοποιούνται από την αεροπορία καθόλη την διάρκεια της πτήσης.



Σχήμα 3. 55: Σύστημα GPS

7. JTIDS- MIDS (Joint Tactical- Multifunctional Information Distribution System): Πρόκειται για ένα ευρυζωνικό σύστημα επικοινωνιών το οποίο δημιουργήθηκε από τις ΗΠΑ και το NATO το 1981 για την παροχή ασφαλούς και αδιάλειπτης επικοινωνίας σε πολεμικές επιχειρήσεις. Λειτουργεί στη ζώνη 960-1164 MHz .

Από την εξέταση των παραπάνω υπηρεσιών σε συνάρτηση με το διαθέσιμο ραδιοφάσμα προκύπτουν αρκετά σημεία στα οποία μπορούν να συγχωνευθούν τόσο οι υπηρεσίες της αεροναυτικής για τα επανδρωμένα Α/Φ όσο και τα ΜΕΑ. Παρακάτω παρουσιάζονται σχηματικά (Σχήμα 3.15), στο φάσμα μεταξύ 100 και 5.150 MHz, περιπτώσεις χρήσης συχνοτήτων οι οποίες είναι κατάλληλες για χρήση από τα ΜΕΑ.

Frequency Band	Allocated Use (typical systems)
108 - 112 MHz	ARNS (ILS LOC)
112 - 117.975 MHz	ARNS (VOR, GBAS)
117.975 - 137 MHz	AM(R)S (VHF voice and data)
960 - 1215 MHz	ARNS (DME, TACAN, Radar Transponders)
1525 - 1559 MHz	AMS(R)S
1610 - 1660 MHz	AMS(R)S
2900 - 3100 MHz	Radiolocation, Radionavigation
5000 - 5150 MHz	ARNS (MLS), Radionavigation Satellite, AMS(R)S, FSS (but limited to MSS feeder links)

Σχήμα 3. 56: Αεροναυτικές Ζώνες που είναι δυνατή η χρήση τους από UAS

Από τις παραπάνω ζώνες συχνοτήτων λόγω συνωστισμού και λόγω διάθεσης εύρους ζώνης (34 MHz επίγεια και 54 MHz για δορυφορικά) για την ικανοποίηση των

ρυθμών μετάδοσης για τα MEA θα παρουσιαστούν οι ζώνες μεταξύ 960-1024 MHz, όπου συλλειτουργεί η υπηρεσία ARNS, για επικοινωνία εντός του LOS και 5030-5091 MHz, όπου συλλειτουργούν οι υπηρεσίες ARNS και AMS(R)S, για χρήση τόσο εντός αλλά και εκτός του LOS καθώς επίσης και άλλες κατάλληλα διαπιστευμένες από παγκόσμιους φορείς.

- **960-1164 MHz:** Αποτελεί κατάλληλο ραδιοφάσμα για την χρησιμοποίηση με επίγειους αυτόνομους σταθμούς με ακτίνα δράσης έως 200 νμ. Στερείται υπηρεσίας AMS και για την αντιμετώπιση προβλημάτων τα οποία σχετίζονται με την ακτίνα δράσης είναι δυνατόν να μετακινηθεί το σημείο εκπομπής (standpoint).

- Ακόμη περισσότερο κατάλληλοι είναι οι υποτομείς μεταξύ **960-976 και 1151-1156 MHz** η οποίοι δεν χρησιμοποιούνται για αεροναυτική χρήση και επίσης δεν έχουν εκχωρηθεί σε επίγειες υπηρεσίες. Επειδή όμως στερούνται του καθιερωμένου από την ITU εύρους ζώνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρότερα συστήματα MEA τα οποία ικανοποιούν την λειτουργία του ωφέλιμου φορτίου (εκτός βίντεο) με αυτό το εύρος ζώνης.

- **5030-5091 MHz:** Αποτελεί κατάλληλο ραδιοφάσμα για χρήση είτε εντός είτε εκτός του LOS εξαιτίας της ύπαρξης τόσο της ARNS όσο και της AMS(R)S. Επιπλέον αποτελεί κατάλληλο φάσμα για την ανάπτυξη συστημάτων MEA λόγω της αραιής και μη συχνής χρησιμοποίησης του από το σύστημα ILS (Instrument Landing System).

- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ζώνη **1,5-1,6 GHz** στην οποία διατίθεται η υπηρεσία AMS(R)S (Inmarsat και Iridium) για επικοινωνίες εκτός του LOS (BLOS) με διαθέσιμο εύρος ζώνης 14 MHz η οποία είναι κατάλληλη για MEA χωρίς μεγάλες απαιτήσεις ρυθμών μετάδοσης[46].

- Επίσης μία ακόμη λύση αποτελεί την εκ νέου ανάθεση συχνοτήτων της Ku και στην Ka ζώνη για επικοινωνία εκτός LOS εκμεταλλευόμενη το δίκτυο των GEO (Geostationary Earth Orbits) δορυφόρων[46]. Πιο συγκεκριμένα στη Ku ζώνη (12/18 GHz) λειτουργεί η υπηρεσία FSS (Fixed Satellite Service) [47] στα 12-14 GHz όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ζώνες 13,25-13,4 και 15,4-15,7 GHz της υπηρεσίας AMS(R)S και της υπηρεσίας ARNS αντίστοιχα. Παρομοίως οι ζώνες 19,7-20,2 της K(18-26 GHz) ζώνης και 29,5-30 GHz της Ka ζώνης (26-40 GHz) προσδίδουν εύρος ζώνης της τάξης των 50 MHz για επικοινωνία εκτός LOS[46]. Το πρόνομο των ζωνών αυτών Ku-K-Ka είναι ότι εμφανίζονται στο εύρος ενός πομποδέκτη αλλάζοντας απλά την συχνότητα[42].

3.1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΑΛΕΙΨΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ ΣΤΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟ ΦΑΣΜΑ ΤΩΝ ΜΕΑ

Επειδή όπως προαναφέραμε οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες για την επικοινωνία μεταξύ των MEA απαιτούν οπτική επαφή, καθώς αυξάνεται η συχνότητα στο ραδιοφάσμα τα VHF-UHF-SHF και EHF υπόκεινται τόσο σε τροποσφαιρικές επιπτώσεις οι οποίες παρουσιάζονται σε συχνότητες μεγαλύτερες των 3 GHz και ιονοσφαιρικές αυτές που παρουσιάζονται σε συχνότητες μικρότερες των 3 GHz. Ακόμη δεν υπόκεινται σε ανάκλαση άλλα αυξάνεται η απορρόφηση τους από την ατμόσφαιρα καθώς αυτές περνούν το «κατώφλι» των 10 GHz όπου παρατηρείται κατακόρυφη

πτώση της ποιότητας επικοινωνίας[41]. Οι κύριες μέθοδοι εξάλειψης των διαλείψεων αυτών αποτελούνται από:

1. Έλεγχος Ισχύος της προς τα Άνω Ζεύξης ULPC: Με αυτή τη μέθοδο ρυθμίζεται η ισχύς εκπομπής του επίγειου σταθμού βάσης ώστε η ισχύς που θα φθάσει στο ΜΕΑ να είναι μεγαλύτερη από μία συγκεκριμένη τιμή. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελούν η παρεμβολές σε γειτονικές εκπομπές στο ραδιοφάσμα.

2. Έλεγχος Ισχύος της προς τα Κάτω Ζεύξης-DLPC: Με τη μέθοδο αυτή ρυθμίζεται η ισχύς εκπομπής του ΜΕΑ. Ο περιορισμός αυτής της μεθόδου, είναι ότι λόγω των περιορισμών στο βάρος και στο ωφέλιμο φορτίο του ΜΕΑ, έχουν συγκεκριμένο περιθώριο ισχύος . Ένα άλλο πρόβλημα είναι η δημιουργία παρεμβολών σε άλλα επικαλυπτόμενα συστήματα.

3. Διαμόρφωση Λεπτής Δέσμης SBS: Σε αυτή τη μέθοδο η απαραίτητη κάλυψη επιτυγχάνεται με τη μείωση του λοβού ακτινοβολίας και την δημιουργία σημειακών ακτινών επιτυγχάνοντας υψηλή κατευθυντικότητα εκπομπής και υψηλότερη απόδοση του συστήματος. Έτσι επιτυγχάνεται σταθερή ισχύς στο διάγραμμα εκπομπής ακόμη και σε συνθήκες βροχής. Το μειονέκτημα είναι ότι μειώνεται η καθολική κάλυψη μίας κεραίας.

4. Χρησιμοποίηση κεραιών υψηλού κέρδους και χαμηλού θορύβου: Με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών οι οποίες είναι τοποθετημένες σε ατρακτίδιο και έχουν τη δυνατότητα περιστροφής κατά x' και y' και μπορούν να ευθυγραμμίσουν τον κύριο λοβό εκπομπής τους με την κατεύθυνση από την οποία λαμβάνουν το σήμα κατά την λήψη και αντίστροφα κατά την εκπομπή είτε μέσω ανίχνευσης της κατεύθυνσης του σήματος είτε μέσω μηχανισμού ο οποίος δέχεται τα στοιχεία θέσεως (x, y, z) του πομπού –δέκτη σε ενθυλακωμένα πακέτα. Στα συστήματα ΜΕΑ χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες κεραίες υψηλού κέρδους λήψης- εκπομπής από τους σταθμούς βάσης εξαιτίας των περιορισμών των ΜΕΑ λόγω ενέργειας εκπομπής και ωφέλιμου φορτίου.

Επίσης για την επιτυχή και ασφαλή παράλληλη λειτουργία των υπηρεσιών, δεδομένης της μελλοντικής τους συνύπαρξης στον εναέριο χώρο με τα επανδρωμένα Α/Φ, στο υπάρχον ραδιοφάσμα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν νέες αποδοτικότερες μέθοδοι πολυπλεξίας (frequency division multiplexing) έτσι ώστε να γίνει επωφελέστερη χρήση του χρησιμοποιούμενου ραδιοφάσματος λόγω των μεγάλων απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, για να πραγματοποιηθεί η αποστολή των προϊόντων από τα υποσυστήματα ωφέλιμου φορτίου κατά την κάτω ζεύξη. Για παράδειγμα το προϊόν μίας υπέρυθρης κάμερας υψηλής ευκρίνειας χρειάζεται ρυθμό μετάδοσης περίπου ίσο με 75 Mbps. Το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με υπόλοιπες απαιτήσεις των υπόλοιπων υποσυστημάτων μπορεί να αυξήσει την συνολική απαίτηση σε πολύ μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης ίσους με 320-500 Mbps[8] αντί της τάξης των 10 Kbps που είναι το όριο για την άνω ζεύξη ανά ΜΕΑ [42] (Σχήμα 3.16) , καταλαμβάνοντας έτσι μεγάλο εύρος φάσματος και περιορίζοντας τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων υπηρεσιών. Μία λύση σε αυτό το πρόβλημα θα αποτελούσε η χρήση της μεθόδου Πολυπλεξίας Ορθογώνιας Διάρθρωσης Συχνότητας (OFDM- Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [42]:

PHASE OF FLIGHT AND OPERATING MODE (MANUAL OR AUTOMATIC)	COMMAND AND CONTROL				ATC RELAY				SENSE AND AVOID		
	CONTROL		NAVAIDS		VOICE RELAY	DATA RELAY		TARGET TRACKS	AIRBORNE WEATHER RADAR	VIDEO	
	UPLINK (UL)	DOWNLINK (DL)	UL	DL	UL and DL	UL	DL	DL	DL	DL	
MAXIMUM FOR ANY PHASE OF FLIGHT [1]	4600	7600	670	1100	4800	50	60	9100	28 000	270 000	
AVERAGE FOR MANUAL OPERATION	1700	3200	670	870	4800	24	31	9100	8700	270 000	
AVERAGE FOR AUTOMATIC OPERATION	440	650	140	190	4800	24	31	9100	8700	270 000	
OVERALL AVERAGE	690	1200	250	330	4800	24	31	9100	8700	270 000	

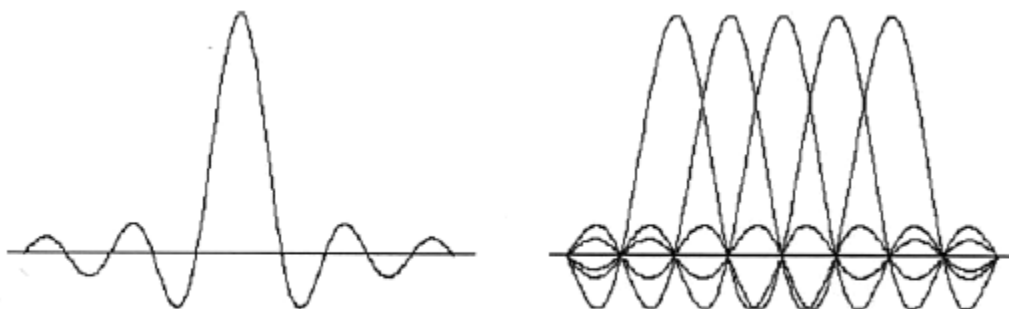
References: RTCA SC-203 CC008 (May 2009) (relying in part on ITU-R, 2009, Table 16)

NOTES:

1. Flight phases include departure, en route, and arrival. Pre-flight and post-flight phases are excluded.
2. Data throughput values include overhead and are rounded to two significant figures.
3. Target tracks assumes 60 targets in local environment of the UA.
4. Video is only needed intermittently, for some aircraft.
5. Overall average assumes 80% of aircraft are operating automatically in each flight phase; 20% operating manually.

Σχήμα 3. 57: Απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης αναλόγως της λειτουργίας

- Αποτελεί την πιο σημαντική μέθοδο διαμόρφωσης και για αυτό θα την περιγράψουμε περαιτέρω. Είναι εξέλιξη της μεθόδου FDM (Frequency Division Multiplexing) μια μέθοδο κωδικοποίησης και διαμόρφωσης δεδομένων κατά την οποία το αρχικό κανάλι - εύρος δέσμης διαχωρίζεται σε πολλαπλά κανάλια – υποφορείς (subcarriers) μετάδοσης, τα οποία χρησιμοποιούν ψηφιακή μετάδοση σήματος μέσω ορθογώνιας διαφοράς φάσης π/2 των διαφορετικών σημάτων, από τα οποία προκύπτει το αρχικό σήμα και τα οποία μεταφέρονται μέσω αυτών των διαφορετικών καναλιών(subcarriers). Θεωρητική ταχύτητα μέχρι και 200 Mbps (μονό κανάλι).
- Η διαφορά της μεθόδου αυτής σε σχέση με την προκάτοχο της είναι ότι χρησιμοποιώντας ορθογώνια διαφορά φάσης, η οποία αναφέρεται στην γωνιακή απόσταση μεταξύ των διαφορετικών σημάτων, το κάθε σήμα σχεδόν επικαλύπτει το άλλο με αποτέλεσμα την εκμηδένιση των παρεμβολών και των παραμορφώσεων αφενός και την σημαντική εξασφάλιση σε εύρος ζώνης(bandwidth).
- Η μετάδοση των σημάτων υλοποιείται χρησιμοποιώντας Serial to Parallel μετατροπείς με το κάθε sub-carrier να κωδικοποιείται και στην συνέχεια να διαμορφώνεται για την μεταφορά.
- Επειδή κάθε σήμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο πολλών αργά διαμορφωμένων σημάτων στενής ζώνης αντί για ένα ταχέως διαμορφωμένου σήματος ευρείας ζώνης, καθένα από τα διαφορετικά αυτά σήματα μπορεί να διαμορφωθεί με μία από τις μεθόδους διαμόρφωσης στενής ζώνης, όπως QAM ή PSK.



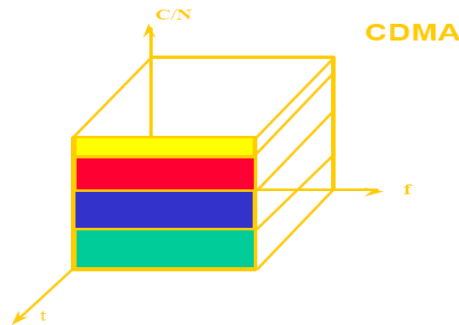
Σχήμα 3. 58: Διαμόρφωση OFDM με 1 και 5 υπό-κανάλια

Ακόμη λόγω της αύξησης των υπηρεσιών είναι αναγκαία η ταυτόχρονη χρησιμοποίηση του φάσματος από πολλούς χρήστες σε ζώνες συχνοτήτων οι οποίες είναι ήδη «φορτωμένες» (L-S-C ζώνες). Για την αποφυγή παρεμβολών οι οποίες σχετίζονται με τα παραπάνω αίτια θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τεχνικές εξάπλωσης του χρησιμοποιούμενου φάσματος (spread spectrum techniques). Οι δύο μέθοδοι εξάπλωσης φάσματος βοηθούν στην προστασία των σημάτων από υποκλοπές, παραμόρφωση πολλών διαδρομών, παρεμβολές καθώς και επιτρέπουν την κρυπτογράφηση του σήματος. Επίσης αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν την ταυτόχρονη χρησιμοποίηση του ίδιου φάσματος από πολλούς χρήστες. Ο τρόπος λειτουργίας των μεθόδων αυτών συνίσταται στο ότι ο αρχικό σήμα εξαπλώνεται σε όλο το διατιθέμενο φάσμα, με αποτέλεσμα μετά την μετατροπή αυτή να χρειάζεται περισσότερο φάσμα για να μεταδοθεί το αρχικό σήμα. Η εξάπλωση που υφίσταται ένα σήμα εξαρτάται από την αναλογία του αρχικού με το διατιθέμενο φάσμα. Αυτές οι μέθοδοι είναι:

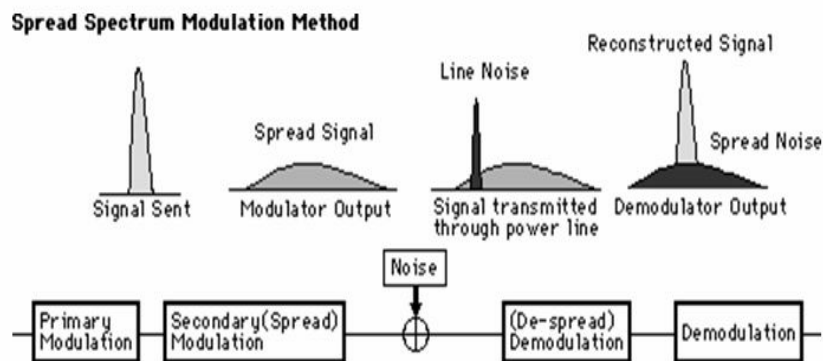
- Frequency Hoping Spread Spectrum (FHSS): Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί εκπέμποντας το ψηφιακό σήμα χρησιμοποιώντας μια τυχαία συχνότητα η οποία μεταβάλλεται, μεταπηδώντας από την μια συχνότητα στην άλλη σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα και για αυτόν τον λόγο θα πρέπει ο πομπός και ο δέκτης να είναι συγχρονισμένοι μεταξύ τους. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι: α. Η αντίσταση στις παρεμβολές «στενής ζώνης», η αποτελεσματική χρήση του διατιθέμενου φάσματος και η προστασία από τις υποκλοπές. Η αναπήδηση συχνότητας μπορεί σε περιπτώσεις ανίχνευσης ευρείας ζώνης παρεμβολών να υλοποιηθεί και σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων (πχ. από UHF στην S ζώνη).

- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS): Αυτή η μέθοδος «εξάπλωσης του φάσματος» λειτουργεί μετατοπίζοντας τυχαία ένα ημιτονοειδές κύμα, από μία ακολουθία από σύμβολα-κωδικούς ψευδοθορύβου τα οποία λέγονται «τσιπ». Κάθε «τσιπ» έχει πολύ μικρότερη διάρκεια από ότι ένα bit πληροφορίας και γι αυτό τον λόγο το τελικό διαμορφωμένο σήμα έχει πολύ πιο γρήγορο ρυθμό «τσιπ» από το αρχικό σήμα. Για την επιτυχή μετάδοση των δεδομένων ο δέκτης θα πρέπει να γνωρίζει τον ρυθμό με τον οποίο παράγονται τα «τσιπ» από τον πομπό. Επίσης στην συνέχεια ο δέκτης αντιστρέφει την ακολουθία από τα σύμβολα για να απεικονίσει την αρχική πληροφορία. Εξέλιξη των δύο παραπάνω μεθόδων αποτελεί η Hybrid Direct Sequence Frequency Hoping Spread Spectrum (DS/FH SS)

- Πολλαπλή Πρόσβαση με τη μέθοδο Επιμερισμού Κώδικα (CDMA): Με την μέθοδο του εναλλακτικά απλωμένου φάσματος (SSMA- Spread Spectrum Multiple Access) επιτυγχάνεται ταυτόχρονη χρήση της ίδιας περιοχής συχνοτήτων και του διαθέσιμου εύρους ζώνης του αναμεταδότη χωρίς την ανάγκη ούτε χρονικού αλλά ούτε και φασματικού διαχωρισμού. Για τον διαχωρισμό των σημάτων χρησιμοποιείται μία ψηφιακή ακολουθία (κώδικας) η οποία διαφοροποιείται από αυτές που χρησιμοποιούνται από άλλα σήματα επίγειων σταθμών. Προβλήματα προκύπτουν όταν δεν είναι δυνατή η απόρριψη των ανεπιθύμητων σημάτων εξαιτίας είτε της μη δυνατότητας του δέκτη να ξεχωρίζει τις διευθύνσεις είτε λόγω της μεγάλης αύξησης των επίγειων σταθμών. Για την διαμόρφωση με του CDMA μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί αναπήδηση συχνότητας, είτε αναπήδηση χρόνου είτε ευθείας ακολουθίας (direct sequence) διαμόρφωση . Έτσι προκύπτει η FH-CDMA, η TH-CDMA και η DS-CDMA πολλαπλή πρόσβαση αντίστοιχα. Εξέλιξη της παραπάνω μεθόδου αποτελεί η Multi – Carrier Code Division Multiple Access (MC-CDMA)[38].



Σχήμα 3. 59: Σχηματική αναπαράσταση CDMA



Σχήμα 3. 60: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου εξάπλωσης φάσματος

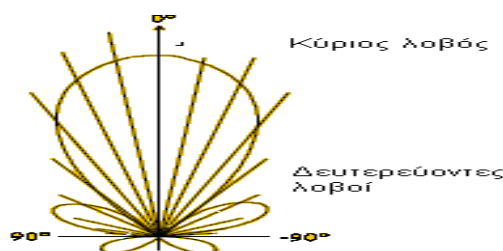
Επιπλέον, για την προστασία των UAS συστημάτων και την εκμηδένιση των πιθανών τρωτοτήτων τους με συνέπεια την ανίχνευσή τους από αντίμετρα εντοπισμού θέσεως, όπως ραδιογωνιόμετρα και ανιχνευτές ηλεκτρομαγνητικών σημάτων (SIGINT- Signal Intelligence), χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραιές οι οποίες έχουν όσο το δυνατόν λεπτότερη δέσμη και μεγαλύτερο κέρδος, καθώς επίσης

και η μετάδοση υλοποιείται κατά ριπές (burst transmissions). Σημειωτέον δε, είναι ότι η επικοινωνία των ΜΕΑ με τους σταθμούς ενέχει πολύ μεγαλύτερο κίνδυνο καθόσον υπόκεινται σε πολύ μεγαλύτερες πιθανότητες διεξαγωγής ηλεκτρονικού πολέμου από τον αντίπαλο, πάρα στην πιθανότητα εκπομπής Α/Φ- περιπόλου με αισθητήρες ανίχνευσης σημάτων (SIGINT) από τον σταθμό βάσης προς το Α/Φ.

3.2 ΚΕΡΑΙΕΣ

EIRP: Είναι η ενεργώς ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς. Ο έλεγχος της συνίσταται στην αύξηση της ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος ώστε να αντισταθμιστούν οι απώλειες λόγω μετάδοσης στην ατμόσφαιρα.

Η επιλογή κατάλληλης διάταξης κεραίας ή κεραιών αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο στην επίτευξη ζεύξης μεταξύ του ΜΕΑ και του σταθμού βάσης. Οι τύποι κεραιών οι οποίοι χρησιμοποιούνται είναι είτε α.) πολυκατευθυντικές (omnidirectional) ή κατευθυνόμενης εκπομπής- κατευθυντικές (directional).

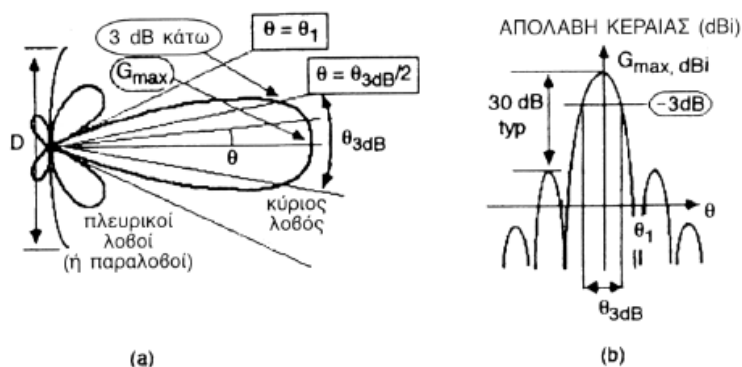


Σχήμα 3. 61: Κύριος και δευτερεύοντες λοβοί εκπομπής

Η κεραία είναι ένα από τα κυριότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά διότι το κατευθυντικό κέρδος της (EIRP) καθορίζει και την λαμβανόμενη ισχύ στον δέκτη. Εκτός από την ισχύ που μεταδίδεται ή λαμβάνεται κατά την επιθυμητή κατεύθυνση, μέσω του κύριου λοβού ακτινοβολίας, μέρος της ισχύος μεταδίδεται σε μη επιθυμητές κατευθύνσεις μέσω πλευρικών λοβών ακτινοβολίας. Οι εκπομπές αυτές προκαλούν παρεμβολές σε άλλες υπηρεσίες και για αυτό επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι α. η υψηλή κατευθυντικότητα και β. οι αμελητέες πλευρικές εκπομπές. Τα κύρια χαρακτηριστικά μίας κεραίας συνοψίζονται παρακάτω:

- **Απολαβή-Κέρδος:** Η απολαβή(κέρδος) G μιας κεραίας είναι, ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολείται (ή λαμβάνεται) ανά μονάδα στερεάς γωνίας, από την κεραία προς μία δεδομένη διεύθυνση, προς την ισχύ που ακτινοβολείται(ή λαμβάνεται) ανά μονάδα στερεάς γωνίας από μία ιστροπική (ομοιόμορφη κατανομή ακτινοβολίας) κεραία, η οποία τροφοδοτείται με την ίδια ισχύ. Η μέγιστη τιμή του κέρδους κάθε κεραίας συνδέεται με την ενεργό επιφάνεια της κεραίας και εξαρτάται από τη διάμετρο και τη συχνότητα λειτουργίας. Για δεδομένη συχνότητα, καθώς μεγαλώνει η διάμετρος της κεραίας, μεγαλώνει με εξάρτηση τετραγώνου και το κέρδος.

- **Γωνιακό Εύρος Δέσμης Κεραίας:** Το εύρος δέσμης(3dB, θ_{3dB}) αντιστοιχεί στη γωνία του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας η οποία σχηματίζεται από τις διευθύνσεις στις οποίες η απολαβή της ελαττώνεται στο μισό της μέγιστης τιμής της. Το εύρος δέσμης εξαρτάται από τη διάμετρο της κεραίας και τη συχνότητα λειτουργίας.



Σχήμα 3. 62: Εύρος Δέσμης και Απολαβή Κεραίας

- **Πόλωση:** Λόγω του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου το κύμα που ακτινοβολείται από κάποια κεραία είναι πολωμένο. Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης. Η πόλωση του εκπεμπόμενου κύματος καθορίζεται από την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Η πόλωση χαρακτηρίζεται από **α.** την κατεύθυνση περιστροφής, η οποία σε σχέση με την διεύθυνση διάδοσης διακρίνεται σε δεξιόστροφη και αριστερόστροφη, **β.** τον αξονικό λόγο που ορίζεται ως ο λόγος του μεγάλου προς τον μικρό άξονα της έλλειψης την οποία διαγράφει το ηλεκτρικό πεδίο σε επίπεδο κάθετο με αυτό της διεύθυνσης διάδοσης και **γ.** την κλίση της έλλειψης. Μία κεραία σχεδιασμένη υπό μία πόλωση δεν μπορεί να λάβει ή να εκπέμψει στην κάθετη αυτής πόλωση. Η ιδιότητα αυτή εφαρμόζεται κυρίως στα συστήματα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.

Αναλόγως της απόστασης και του LOS η χρήση μίας διάταξης κεραίας μπορεί να περιορισθεί σε πολυκατευθυντική για μικρές αποστάσεις ή σε κατευθυντική προσαρμοσμένης κύριας εκπομπής με μειωμένες πλευρικές εκπομπές και διαμορφούμενη λεπτή δέσμη όπου σε αυτή τη μέθοδο η απαραίτητη κάλυψη επιτυγχάνεται με τη μείωση του λοβού ακτινοβολίας και την δημιουργία σημειακών ακτινών επιτυγχάνοντας υψηλή κατευθυντικότητα εκπομπής και υψηλότερη απόδοση του συστήματος.

3.2.1 ΕΙΔΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

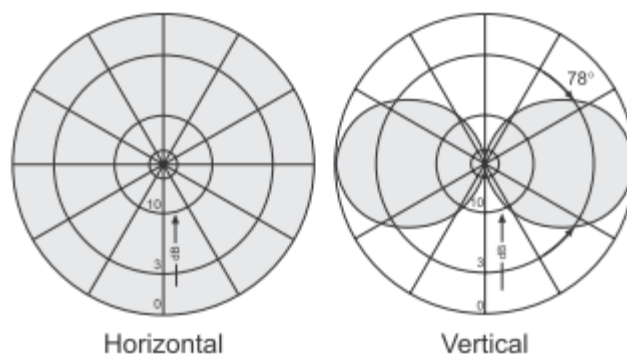
Εκτός από τις ισοτροπικά κατευθυνόμενες κεραίες (omnidirectional) για την διατήρηση του LOS μεταξύ πομπού και δέκτη, απαιτείται η τοποθέτηση της κατευθυντικής κεραίας σε ένα περιστρεφόμενο πυργίσκο ακολουθώντας τις μεταβολές τις θέσεως του Α/Φ. Πολλές φορές είναι απαραίτητη η τοποθέτηση παρόμοιας κεραίας και σημείο του Α/Φ έτσι ώστε ο κύριος λοβός εκπομπής της να έχει συμπληρωματικό τομέα σε σχέση με την κύρια κεραία. Ακόμη τα περισσότερα

συστήματα ΜΕΑ έχουν διαφορετικές διατάξεις κεραιών αναλόγως οπτικού πεδίου και της φέρουσας συχνότητας του σήματος.

➤ **Πολυκατευθυντική κάθετη μήκους $\lambda/4$:** Αποτελεί την πιο κοινή διαδεδομένη λόγω της απλότητας στην διάταξη της κεραία, η οποία εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις ως προς τα επίπεδα που σχηματίζονται περιμετρικά από το στέλεχος της κεραίας με γωνιακό εύρος απολαβής 78° . Εξαιτίας όμως της ομοιόμορφης διάδοσης του σήματος, γεγονός που αποτελεί και το κυριότερο πλεονέκτημα της, έχει πολύ γρήγορη εξασθένιση του σήματος καθώς αυξάνεται η απόσταση. Χρησιμοποιείται συνήθως ως κύρια για συστήματα τα οποία λειτουργούν εντός του LOS και σε κοντινές αποστάσεις ή κατά την φάση εκτόξευσης, απογείωσης ή προσγείωσης όπου ένας περιστρεφόμενος πυργίσκος δεν θα προλάμβανε να αφομοιώσει τις μεταβολές της γωνιακής ταχύτητας λόγω εγγύτητας με αποτέλεσμα να χάνεται η συνταύτιση των κυρίων λοβών εκπομπής.

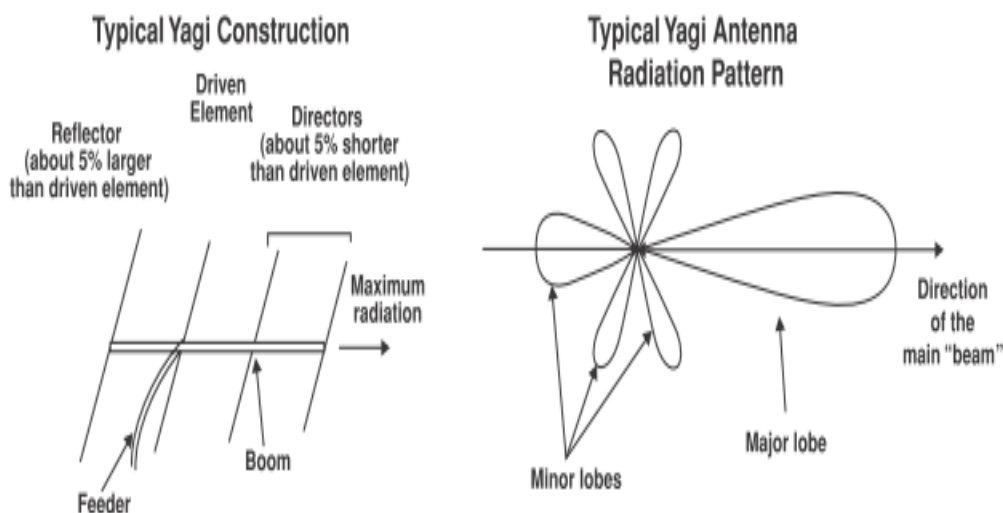


Σχήμα 3. 63: Πολυκατευθυντική Κεραία $\lambda/4$



Σχήμα 3. 64: Διάγραμμα εκπομπής αναλόγως της διάταξης

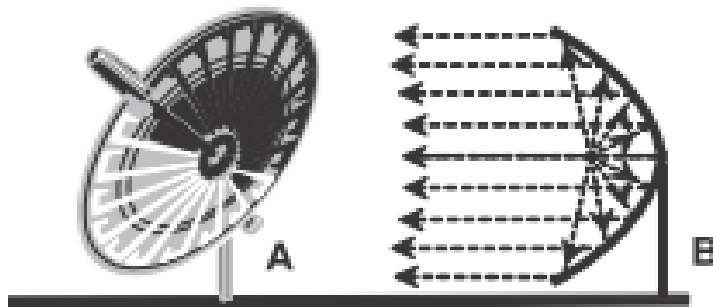
➤ **Κατευθυντική κεραία Yagi-Uda:** Αποτελείται από μία διάταξη από παράλληλες μεταλλικές ράβδους, ανακλαστές και κατευθυντήρες (parasitic elements) μήκους $\lambda/2(+)$ και $\lambda/2(-)$ αντίστοιχα, οι οποίες επανακτινοβολούν την ισχύ την οποία λαμβάνουν από μία ράβδο μήκους $\lambda/2$, η οποία ονομάζεται κάθοδος και είναι συνδεδεμένη με τον τον πομποδέκτη μέσω καλωδίου, με γωνιακή αλλαγή φάσης 180° κατευθυνόμενα προς από τους ανακλαστές (reflectors) προς τους κατευθυντήρες (directors). Οι τελευταίοι δε είναι σε τέτοια διάταξη τοποθετημένοι έτσι ώστε το τελικό σήμα το οποίο προκύπτει να αποτελεί συνάθροισμα των επιμέρους σημάτων, σχηματίζοντας ένα ενεργό δίπολο το οποίο αναλόγως της συχνότητας λήψης ή εκπομπής εκμεταλλεύεται την ποικιλομορφία των δυνατών συνδυασμών μήκους κύματος αναλόγως της αποστάσεως στην οποία είναι τοποθετημένες οι ράβδοι. Παρότι ότι, από τα διαγράμματα ακτινοβολίας μίας τέτοιας κεραίας προκύπτουν κεντρικοί λοβοί μεγάλης απολαβής, ωστόσο προκύπτουν και μικρότεροι πλευρικοί οι οποίοι δίνουν την δυνατότητα εισόδου σε πιθανούς παρεμβολείς. Χρησιμοποιούνται για εύρος συχνοτήτων από 500 έως 2000 MHz



Σχήμα 3. 65: Τυπική διάταξη και διάγραμμα εκπομπής κατευθυντικής κεραίας Yagi Uda

➤ **Παραβολική Κατευθυντική Κεραία:** Αποτελεί μία διάταξη η οποία παρουσιάζει υψηλή κατευθυντικότητα με πλευρικούς λοβούς με στάθμη τουλάχιστον 17db χαμηλότερη σε σχέση με αυτήν του κυρίου λοβού για μεταδόσεις από σημείο σε σημείο. Χρησιμοποιείται για υψηλότερες συχνότητες (L ζώνη και άνω) λόγω περιορισμών στις διαστάσεις του ανακλαστήρα ο οποίος θα πρέπει να ενσωματωθεί σε ένα περιστρεφόμενο πυργίσκο εντός του ΜΕΑ ανάλογα με την συχνότητα εκπομπής (Σχήμα:3.26) Τα βασικά τμήματα της κεραίας παραβολικού κατόπτρου είναι (Σχήμα 3.27):

Parabolic Dish



Σχήμα 3. 66: Κεραία παραβολικού κατόπτρου

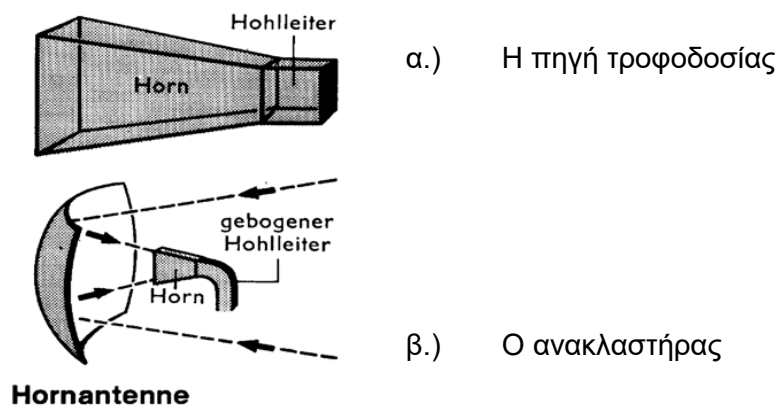
		Diameter							
		0.3 m	0.6 m	1.2 m	1.8 m	2.4 m	3 m	3.7 m	4.5 m
Frequency	2 GHz	35	17.5	8.75	5.83	4.38	3.5	2.84	2.33
	6 GHz	11.67	5.83	2.92	1.94	1.46	1.17	0.95	0.78
	8 GHz	8.75	4.38	2.19	1.46	1	0.88	0.71	0.58
	11 GHz	6.36	3.18	1.59	1	0.8	0.64	0.52	0.42
	14 GHz	5	2.5	1.25	0.83	0.63	0.5	0.41	0.33
	18 GHz	3.89	1.94	0.97	0.65	0.49	0.39	0.32	0.26
	23 GHz	3	1.52	0.76	0.51	0.38	0.3	0.25	0.2
	38 GHz	1.84	0.92	0.46	0.31	0.23	0.18	0.15	0.12

Beamwidth in Degrees

Σχήμα 3. 67: Διάμετρος του ανακλαστήρα ανάλογα με την συχνότητα

α) Η πηγή τροφοδοσίας: Είναι συνήθως η πρωτεύουσα πηγή σχήματος χοανοκεραίας η οποία εκπέμπει ή συλλέγει το μεταδιδόμενο σήμα από και προς τον πομποδέκτη.

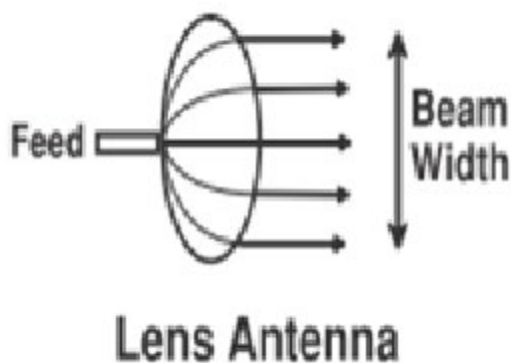
β) Ο ανακλαστήρας: Είναι παραβολικού σχήματος και τελείως αγώγιμος, κατευθύνει την ακτινοβολούμενη ισχύ μέσα σε μια δέσμη παράγοντας κατά προσέγγιση επίπεδο κύμα. Το παραβολικό σχήμα του πιάτου αντανακλά το σήμα και το συγκεντρώνει στο σημείο εστίασης. Στο σημείο αυτό είναι τοποθετημένη η χοανοκεραία, η οποία είναι ουσιαστικά η άκρη ενός κυματοηογού ο οποίος συγκεντρώνει τα σήματα σε ένα σημείο εστίασης και το οδηγεί σε ένα μετατροπέα χαμηλού θορύβου LNB (Low Noise Block). Το θεωρητικό κέρδος ενός κατόπτρου αυξάνεται καθώς η συχνότητα αυξάνεται. Το ακριβές κέρδος εξαρτάται, από πολλούς παράγοντες όπως της επιφάνειας της κεραίας, της ακρίβειας του σχήματος και της κατάλληλης επιλογής της χοάνης. Μια τυπική τιμή κέρδους για ένα δορυφορικό πιάτο 60cm σε συχνότητα 11.75GHz είναι 37.5dB.



Σχήμα 3. 68: Κύρια μέρη παραβολικού κατόπτρου

- γ) Το σύστημα πρωτεύουσας τροφοδότησης:
- Εκπέμπει προς τον κύριο ανακλαστήρα.
 - Διαχωρίζει τη ζώνη συχνότητας εκπομπής από την αντίστοιχη της λήψης.
 - Επιλέγει και συνδυάζει τις δύο πολώσεις (δεξιόστροφη και αριστερόστροφη) στα συστήματα διπλής πόλωσης.

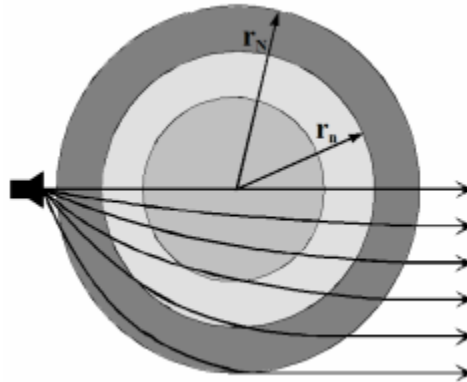
➤ **Κεραία Πρίσμα (Lens Antenna)[48]:** Λειτουργεί όπως ένα πρίσμα διαθλώντας τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα προς μία δομή παράλληλης κατεύθυνσης. Για να είναι αποτελεσματική η χρησιμοποίησή τους, λειτουργούν για συχνότητες άνω των 10 GHz. Χρησιμοποιεί σαν πηγή εξόδου δύο τύπων κεραίες.



Σχήμα 3. 69: Διάγραμμα εκπομπής πρισματικής κεραίας

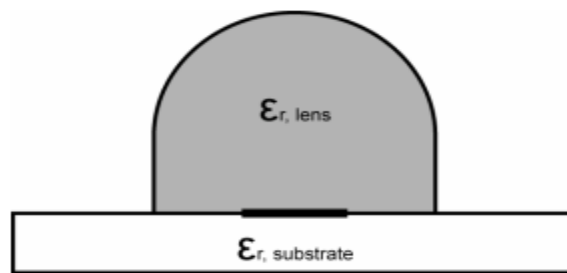
Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται μία χοανοκεραία η οποία ωθεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσα από διηλεκτρικό υλικό το οποίο τους προκαλεί διάθλαση και τα μορφοποιεί ευθυγραμμίζοντας τις γραμμές του φάσματος. Μειονέκτημα των παραπάνω κεραίων αποτελεί το μέγεθος της χοανοκεραίας το οποίο

επιδρά αρνητικά στην ενοποίηση της λειτουργικότητας του συστήματος κεραία- φακός (Σχήμα 3.29). Για να βελτιωθεί η απόδοση χρησιμοποιούνται ανοικτού τύπου κυματοδηγοί.



Σχήμα 3. 70: Διάγραμμα εκπομπής πρισματικής κεραίας με πηγή εισόδου χοανοκεραία

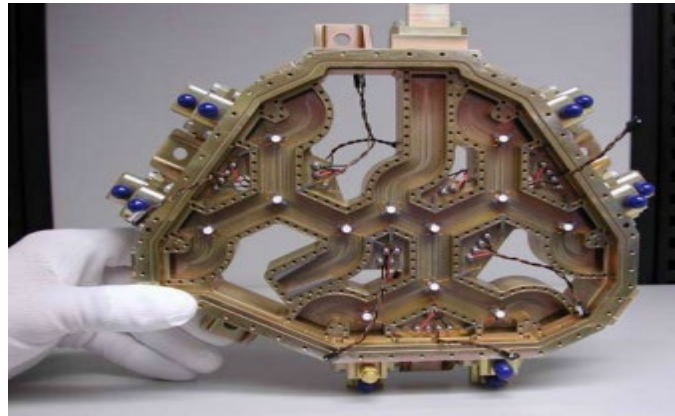
Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται «ράδιο-μικρολωρίδες πομποί» (Σχήμα 3.30) τύπου «μπαλώματος» οι οποίες μειώνουν σημαντικά το μέγεθος και το βάρος της κεραίας. Μειονέκτημα λόγω του μεγέθους αποτελεί το σχετικά μικρό διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι μικρές διαστάσεις των «μικρολωρίδων» δίνουν τη δυνατότητα σχηματισμού επίπεδων συστοιχιών, διαμορφώνοντας τόσο την ζώνη ακτινοβολίας όσο και την κατεύθυνση εκπομπής. Η αρχή λειτουργίας αυτών των βασίζεται στον νόμο του *Luneburg* [48] όπου καθορίζεται η διάθλαση που υπόκειται ένα κύμα, για τον υπολογισμό της εστιακής απόστασης συγκέντρωσης των ακτινών μικροκυμάτων στην αντιδιαμετρικά αντίθετη πλευρά του διηλεκτρικού υλικού σε μία επιθυμητά διαμορφωμένη διάταξη. Οι φακοί μπορεί να είναι κατασκευασμένοι α.) από ειδικό αφρό, β.) από τεφλόν, γ.) από σιλικόνη και δ.) από ρεξολίτη. Οι δυνατότητες αυτών των κεραίων μειώνονται καθώς αυξάνεται η συχνότητα με κατώφλι χρησιμοποίησης τα 30 GHz όπου και χάνουν και τα πλεονεκτήματά τους.



Σχήμα 3. 71: Πρισματική κεραία με πηγή εισόδου ράδιο-μικρολωρίδες

➤ **Κεραία Συγχρονισμένων Στοιχείων** ή Διάταξης Φάσης (Phased Array) ή έξυπνη κεραία (smart antenna)[50]: Αποτελεί διάταξη κεραιών η οποία παρέχει την δυνατότητα ηλεκτρονικού ελέγχου του διαγράμματος ακτινοβολίας τους το οποίο σε συνδυασμό με την κατάλληλη επιλογή της φάσης του ρεύματος

τροφοδότησης των στοιχείων προσδίδει συγκριτικό πλεονέκτημα στην βελτιστοποίηση του κατευθυντικού κέρδους. Αποτελεί την πιο περίπλοκη και ακριβή κεραία καθώς χρησιμοποιεί αλγόριθμους ανάλυσης σήματος οι οποίοι προσδιορίζουν το ίχνος και την κατεύθυνση άφιξης του σήματος και ενεργοποιούν στην συνέχεια τη κατάλληλη διαμόρφωση του κυρίου λοβού εκπομπής προς την βέλτιστη κατεύθυνση. Ο διαχωρισμός των τύπων κεραιών αυτής της κατηγορίας γίνεται βάσει του τρόπου αλλαγής κατεύθυνσης του κυρίου λοβού ακτινοβολίας και διακρίνεται σε α.) σταθερού τύπου ακτινοβολίας (fixed beam) οι οποίες λειτουργούν είτε μέσω μηχανισμού περιστροφής της ακτινοβολίας της κεραίας στην επιθυμητή κατεύθυνση, είτε μέσω της ακτινοβολίας σε προδιαμορφωμένες κατευθύνσεις εκπομπής (switched beam)[49] (Σχήμα 3.31)

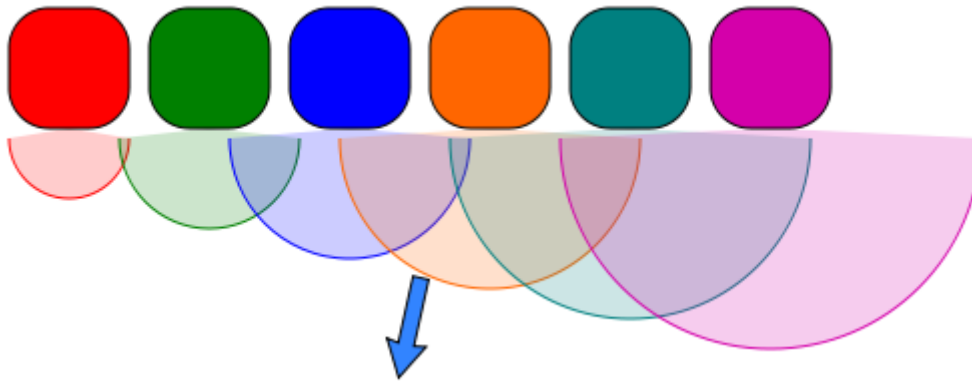


Σχήμα 3. 72: Κεραία Switched beam MEA Predator

και β.) ενεργής ακτινοβολίας οι οποίες λειτουργούν προσαρμόζοντας την ακτινοβολία στην επιθυμητή κατεύθυνση εκπομπής (εύρος 120°) μέσω της προσαρμογής της διαφοράς φάσεως του σήματος από διαφοροποιητές φάσης(phase swifter) οι οποίοι τροφοδοτούν πολλαπλές συμπαραταγμένες συστοιχίες κεραιών (adaptive array) (Σχήμα 3.32).

α.)

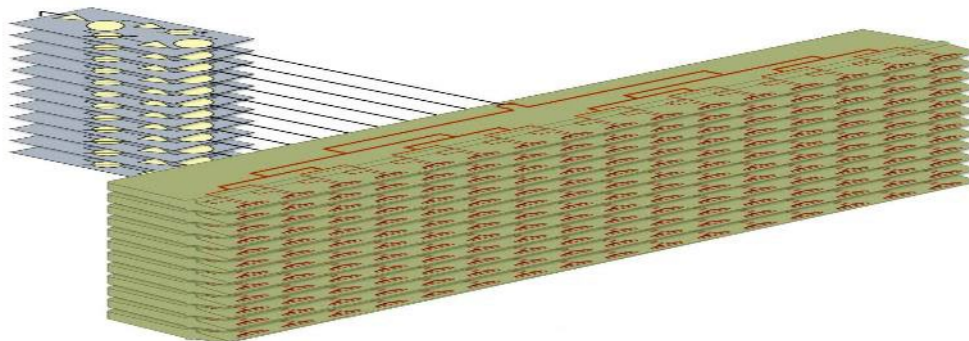
β.)



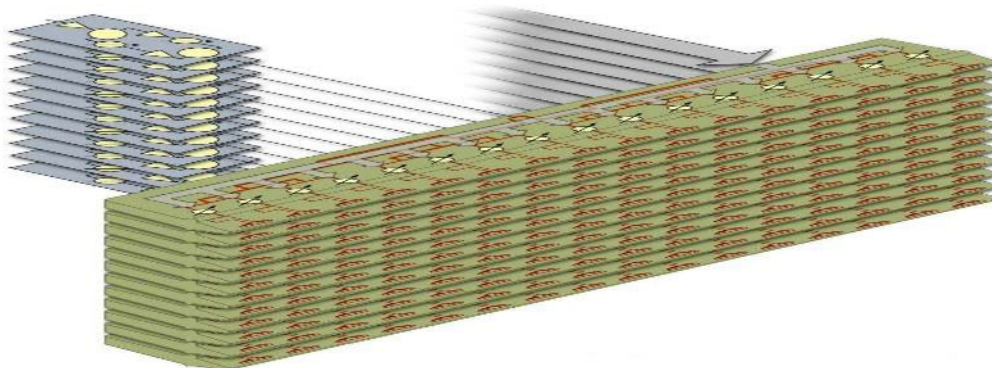
**Σχήμα 3. 73: α.) Διάταξη συμπαρατεταγμένων στοιχείων
β.) Εκπομπή με διαφορά φάσης**

Οι κυριότερες διατάξεις που μπορεί να λάβει μία κεραία προσαρμογής της κατεύθυνσης ζώνης εκπομπής είναι είτε γραμμικές συστοιχίες οι οποίες τροφοδοτούνται από έναν διαφοροποιητή φάσης και προσφέρουν αλλαγή στην κατεύθυνση εκπομπής κάθετα στο επίπεδο των συστοιχιών, είτε γραμμικές συστοιχίες οι οποίες διαθέτουν διαφοροποιητές τάσης τόσο κατά κύρια συστοιχία όσο και κατά τις επιμέρους κεραίες παρέχοντας δυνατότητες εκπομπής σε όλες τις κατευθύνσεις εντός του διαθέσιμου εύρους (120°) (Σχήμα 3.32).

α.)



β.)



**Σχήμα 3. 74: α.) Κεραία Adaptive Array για εκπομπή σε ένα επίπεδο
β.) Κεραία Adaptive Array για εκπομπή σε δύο επίπεδα**

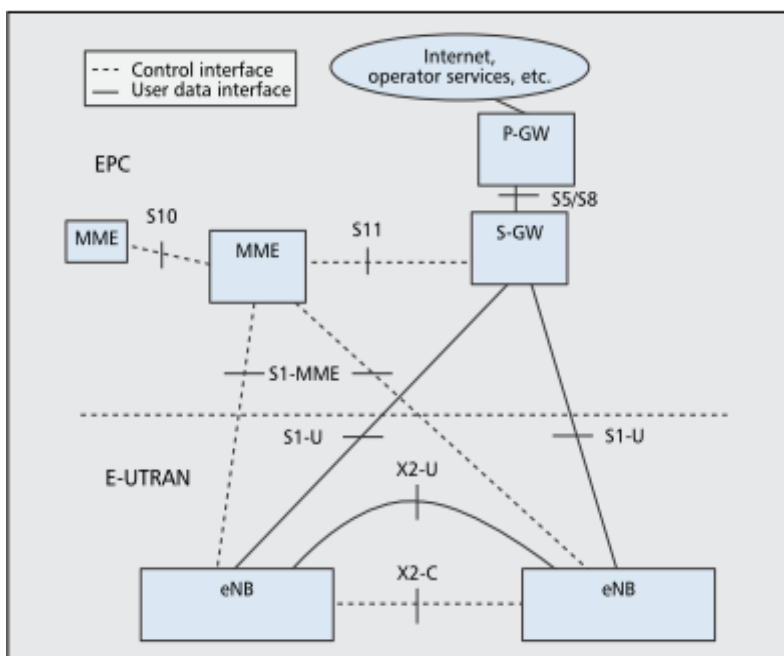
3.3 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η επικοινωνία μεταξύ MEA και σταθμού εδάφους μπορεί όπως προαναφέραμε να υλοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους αναλόγως της οπτικής επαφής και της απόστασης. Για να επιτευχθεί αυτή είναι αναγκαία η υλοποίηση συνδέσεων αέρος- αέρος (air to air-A2A), αέρος –εδάφους (air to ground- A2G) οι οποίες χρησιμοποιούν αυτόνομα κυψελωτά συστήματα τα οποία είτε μπορεί να βασίζονται σε συστήματα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς είτε να είναι βασισμένα στο πρότυπο “All IP Network” LTE (Long Term Evolution) [51] και ενσωματώνουν τόσο επίγεια κυψελωτά συστήματα και απευθείας ζεύξη μέσω ραδιοσυχνότητας (πχ. 900 MHz) όσο και δορυφορικές ζεύξεις για την επικοινωνία σε πολύ μεγαλύτερο βεληνεκές. Η αρχιτεκτονική αυτή δίνει την δυνατότητα στους χρήστες για την επιλογή του κατάλληλου δικτύου για την εξυπηρέτηση του Α/Φ επιτρέποντας τόσο την κατακόρυφη όσο και οριζόντια μεταπομπή (Hand Off) μειώνοντας τόσο τις καθυστερήσεις και την μεταπομπή αλλά και μεγιστοποιώντας τους ρυθμούς μετάδοσης για την ικανοποίηση των αναγκών των MEA. Ακόμη για περιορισμένες αποστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα πρότυπα 802.11 (Wi-Fi) καθώς και το 802.16 (Wi-Max) με το πρώτο να χρησιμοποιείται κυρίως για την δικτύωση μεταξύ των MEA με την δημιουργία Ιπτάμενων MANET’s τα αποκαλούμενα FANET’s [52]. Τέλος για περιορισμένο ύψος εφαρμογών <500 μέτρων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα επίγεια εγκατεστημένα κυψελωτά συστήματα GSM, UMTS και LTE 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς αντίστοιχα[54] σε MUAV’s (Micro Air Vehicle).

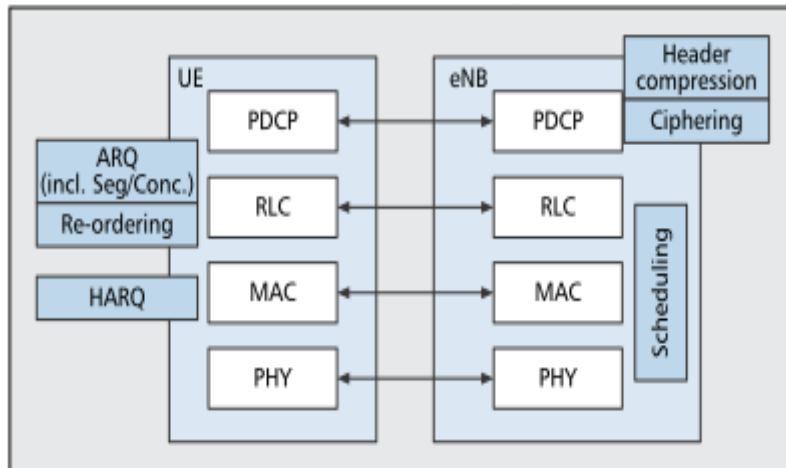
3.3.1 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ LTE (3GPP Release 8)

Ακολουθώντας τα πρότυπα 2^{ης} γενιάς HSPA (High Speed Packet Access) και 3^{ης} γενιάς 3GPP που αποτελεί βελτίωση του συστήματος UTRAN (Universal Mobile Telecommunications System- UMTS Terrestrial Radio Access Network), το πρότυπο LTE[58] αποτελεί διαστρωματωμένη διαδραστική (cross layer) προσέγγιση των υπάρχοντων πρωτοκόλλων επιτρέποντας τα να αλληλεπιδρούν για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος επιτρέποντας την μεταφορά δεμένων χρησιμοποιώντας διαφορετικές συχνότητες και αναλόγως του διαθέσιμου εύρους ζώνης, από 1,4 έως >20 MHz, και εκπέμποντας τόσο σε χαμηλές ταχύτητες όσο και σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλές καθυστερήσεις στην προώθηση των ενθυλακωμένων πακέτων δεδομένων. Το πρότυπο LTE αποτελεί πρόδρομο των δικτύων 4^{ης} γενιάς LTE Advanced καθώς ονομάζεται και 3,9 G. Οι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να ξεπερνούν τα 300 Mbps κατά την κάτω ζεύξη και 75 Mbps για την άνω ζεύξη ενώ η καθυστερήσεις κυμαίνονται σε επίπεδα 5 ms. Υποστηρίζει επικοινωνία διπλής ζεύξης διαχωρισμού συχνότητας (FDD-Frequency Division Duplex) και διαχωρισμού χρόνου (TDD- Time Division Duplex).

Η λειτουργία του βασίζεται στην υλοποίηση OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) με τα δεδομένα να μεταφέρονται διαχωρίζοντας το αρχικό κανάλι σε 12 υποφορείς (subcarriers) χρησιμοποιώντας ένα κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) [53]. Το LTE υλοποιείται μέσω του εξελιγμένου συστήματος ενθυλάκωσης (evolved packet system- EPS) και αποτελείται από τρία μέρη: α.) τον κύριο πυρήνα του δικτύου, β.) τον εξελιγμένο πυρήνα ενθυλάκωσης (EPC- Evolved Packet Core) και γ.) το εξελιγμένο UTRAN- E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network). Το EPC δίνει την δυνατότητα στο πρότυπο να συνδέεται και με άλλα συστήματα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς και αποτελείται από ένα επίπεδο ελέγχου κόμβου (MME- Mobility Management Entity) και κόμβους επιπέδου χρήστη οι οποίοι ονομάζονται α.) εξυπηρετητής πύλης (Serving Gateway- S-GW) και πύλη δικτύου ενθυλακωμένων δεδομένων (Packet Data Gateway- P-GW). Οι βασικοί λειτουργοί στη δομή του LTE είναι σταθμοί βάσης (NodeB) οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X₂ και με το EPC μέσω της διεπαφής S₁ και οι κινούμενοι κόμβοι οι οποίοι αποτελούν τις διεπαφές χρήστη (UE) (Σχήμα 3.34).

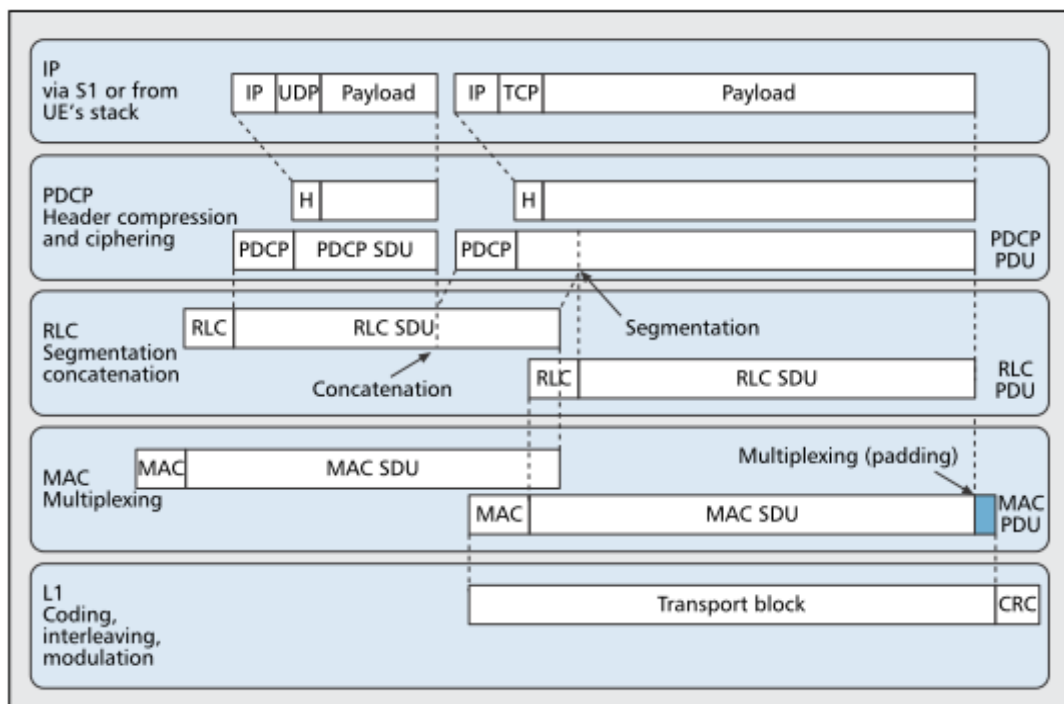


Σχήμα 3. 75: Αρχιτεκτονική του πρότυπου LTE



Σχήμα 3. 76: Διαστρωμάτωση πρωτοκόλλου LTE

Η βασική διάρθρωση του πρωτοκόλλου βασίζεται στη χρήση μίας υβριδικής ARQ- HARQ (Hybrid Automatic Repeat re-Quest) η οποία ενώ λειτουργεί στο MAC επίπεδο αλληλεπιδρά με το επίπεδο δικτύου όπου γίνεται ο έλεγχος των πακέτων- RLC (Radio Link Control) προ-αντιλαμβανόμενη τα σφάλματα στις μεταγωγές των πακέτων από τον πομπό και επιδιορθώνοντάς τα με την παροχή πληροφορίας τον πομπό για την μη σωστή μεταγωγή του λανθασμένου πακέτου. Επειδή ο μηχανισμός αυτός είναι πολύ πιο «ελαφρύς» όσον αφορά την φόρτωση του πρωτοκόλλου, βοηθά τόσο στην ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων όσο και στην υπέρβαση του κατωφλίου επαναπροωθήσεων κατεστραμμένων πακέτων καθώς παρακάμπτει την αρχή του «σταμάτησε και περίμενε» που χρησιμοποιούσαν τα πρωτόκολλα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς υλοποιώντας συνεχή ροή πακέτων. Για να επιτευχθεί η ζεύξη το πρωτόκολλο LTE χωρίζεται σε τέσσερα υποστρώματα:

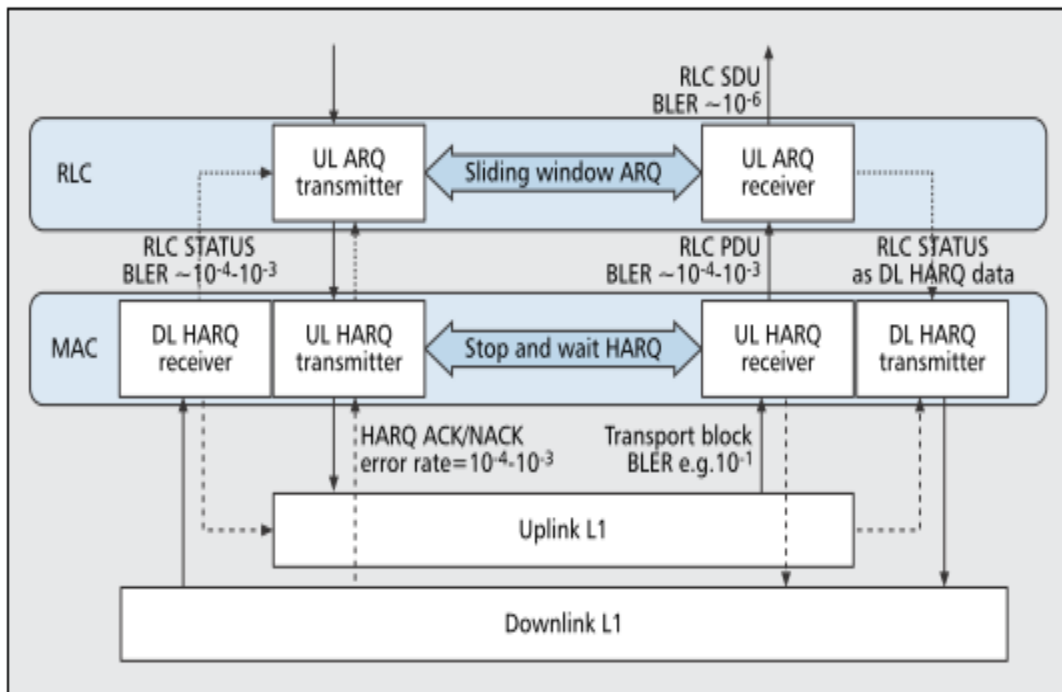


Σχήμα 3. 77: Λειτουργίες του πρωτοκόλλου LTE

Το επίπεδο σύγκλισης πακέτων δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol- PDCP) είναι υπεύθυνο για την κωδικοποίηση και συμπίεση της επικεφαλίδας IP των ενθυλακώσεων καθώς και για την μεταπομπή μεταξύ των σταθμών βάσης eNB. Παρέχει ακεραιότητα ως την ροή των πακέτων προς τα ανώτερα επίπεδα.

Το επίπεδο ελέγχου ράδιο- σύνδεσης (Radio Link Control-RLC) συνδυάζει την λειτουργία του μηχανισμού ARQ καθώς και με την τμηματοποίηση και συνένωση των δεδομένων ώστε να μειωθεί η επιβάρυνση του πρωτοκόλλου. Εάν γίνει αντιληπτή ασυνέχεια στη συχνότητα των λαμβανόμενων πακέτων (protocol data units) σε σχέση με τον αριθμό τυχαίας συχνότητας τότε μία διαδικασία επανάκτησης του χαμένου πακέτου μέσω της HARQ λειτουργίας. Σε περίπτωση που η «ελαφριά» HARQ δεν καταφέρει να διορθώσει ένα επίμονο σφάλμα τότε μόνο θα ενεργοποιηθεί βραδύτερη και «βαρύτερη» ARQ για να το επιλύσει με την μέθοδο «σταμάτησε και περίμενε».

Το επίπεδο πρόσβασης στο μέσο (MAC Layer) παρέχει τη λειτουργία του μηχανισμού HARQ και είναι υπεύθυνο για την πρόσβαση και την αναμονή κατάληψης του καναλιού καθώς και για την πολυπλεξία των πακέτων. Αντί για ένα μήνυμα κατάστασης που περιέχει ένα αριθμό τυχαίας συχνότητας, ένα μονό bit της λειτουργίας αναδραστικής επιβεβαίωσης HARQ (ACK /NACK) με σταθερή χρονική συσχέτιση με την εκάστοτε προσπάθεια εκπομπής παρέχει πληροφορίες σχετικά με την επιτυχή λήψη από την διαδικασία HARQ.



Σχήμα 3. 78: Αναπαράσταση του μηχανισμού ARQ-HARQ

Το φυσικό κανάλι όπου γίνεται η μετάδοση των δεδομένων στο κανάλι κατά την άνω ζεύξη πραγματοποιείται μέσω διαχωρισμό μετατροπής Fourier [53] (DFT- Discrete Fourier Transmission) ή προκωδικοποιημένη OFDM (precoded OFDM-

SC- FDMA / Single Carrier Frequency Division Multiple Access) ενώ κατά την κάτω ζεύξη χρησιμοποιεί συμβατική OFDM. Στην συνέχεια λαμβάνει χώρα η διαμόρφωση και στη συνέχεια η κωδικοποίηση του σήματος το οποίο προστατεύεται από ένα 24 bit CRC κώδικα για την ανίχνευση των λανθασμένων πακέτων οδηγώντας προς το επόμενο επίπεδο (MAC) μόνο τα πακέτα τα οποία δεν είναι λανθασμένα. Υποχρέωση του φυσικού επιπέδου είναι και η ομαλοποίηση της ροής, χωρίς καθυστερήσεις εκτός παραδεκτών ορίων, προς τα άνω επίπεδα επηρεάζοντας την ταχύτητα του προτύπου.

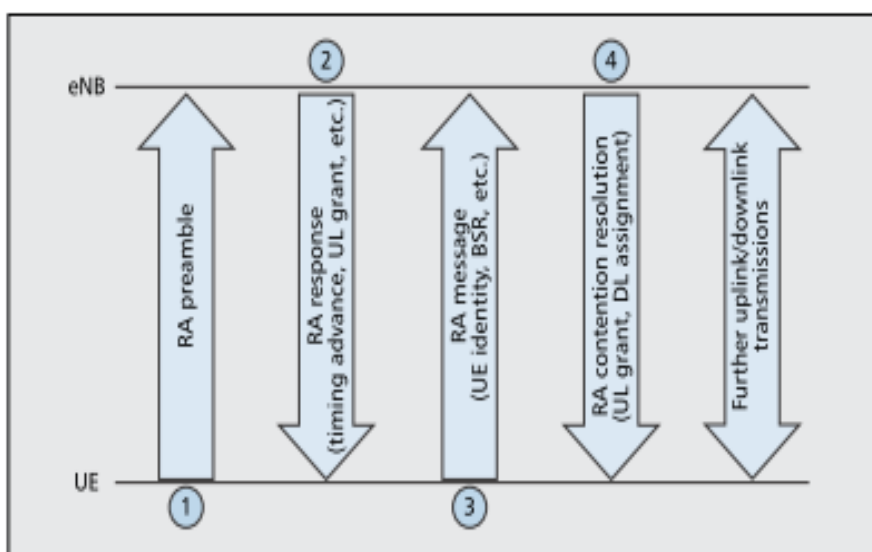
- **Διαδικασία κατάληψης του μέσου στο πρότυπο LTE:** Για να εξασφαλιστεί η αποστολή δεδομένων από διαφορετικούς χρήστες (UEs) θα πρέπει πρώτα αυτοί να χρονιστούν με το δίκτυο LTE εκτελώντας την διαδικασία τυχαίας πρόσβασης (Random Access-RACH) η οποία έχει ως ακολούθως (Σχήμα 3.38):

- Αποστολή RA Preamble: Ο χρήστης αποστέλλει σε ένα τυχαίο διαθέσιμο κανάλι αναμένοντας ένα χρονικό διάστημα για προφύλαξη από παρεμβολές σε γειτονικές ζεύξεις που χρησιμοποιούν το κανάλι. Για να μην αποστέλλονται δεδομένα μη διαμορφωμένα σε OFDM τα πακέτα RA Preamble δεν μεταφέρουν δεδομένα.

- Λήψη RA Response: Ο κόμβος eNB αποστέλλει ένα πακέτο στην αίτηση του χρήστη συμπεριλαμβάνοντας την τιμή της μεταβλητής χρονισμού για την εκτέλεση της πρώτης άνω ζεύξης.

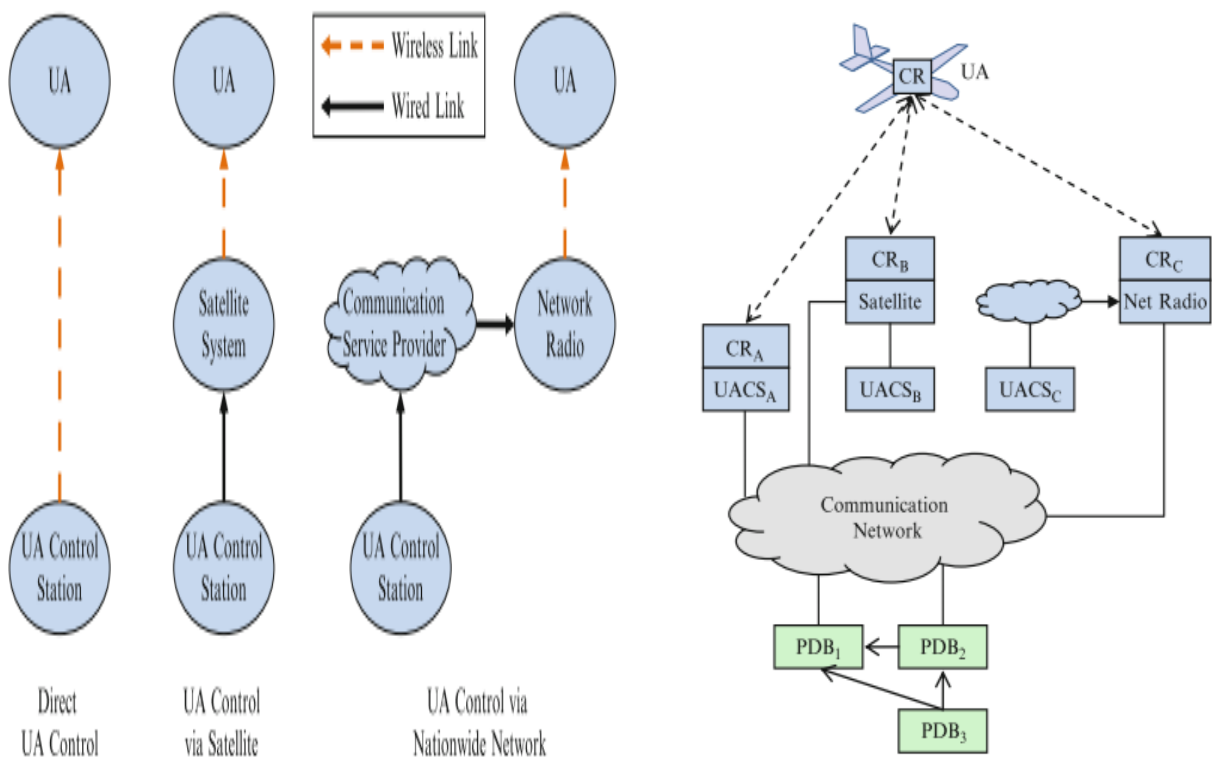
- Αποστολή RA Message: Ο χρήστης (UE) παρέχει στον σταθμό βάσης (eNB) την ταυτότητα του μέσω της αποστολής του πρώτου προγραμματισμένου μηνύματος εξαιτίας της μη μοναδικότητας και αυθεντικοποίησης του προηγούμενου μηνύματος.

- Ανάλυση συναγωνισμού: Μετά από τη λήψη του πρώτου RA μηνύματος η οποία περιγράφεται παραπάνω ο χρήστης έχει λάβει από τον σταθμό βάσης την εκχώρηση μίας μεταβλητής οπισθοχώρησης η τιμή της οποίας έχει αποφασιστεί από τον σταθμό βάσης.



Σχήμα 3. 79: Διαδικασία κατάληψης του μέσου

Η χρησιμοποίηση προτύπων παρόμοια με τα κυψελωτά συστήματα έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να υποστηρίξει οποιοδήποτε τρόπο επικοινωνίας είναι διαθέσιμος επιτρέποντας τόσο την κατακόρυφη όσο και την οριζόντια μεταπομπή επιλύοντας παράλληλα το πρόβλημα του διαθέσιμου φάσματος χρησιμοποιώντας το ήδη διαθέσιμο φάσμα καθώς επίσης και της μεθόδους εκπομπής και κάλυψης του ήδη διαθέσιμου εγκατεστημένου επίγειου δικτύου αλλά και την αυτόνομη ανάπτυξη παρόμοιων με αυτά συστημάτων για την κάλυψη διαβαθμισμένων εφαρμογών όπως το σύστημα CDL (Common Data Link).



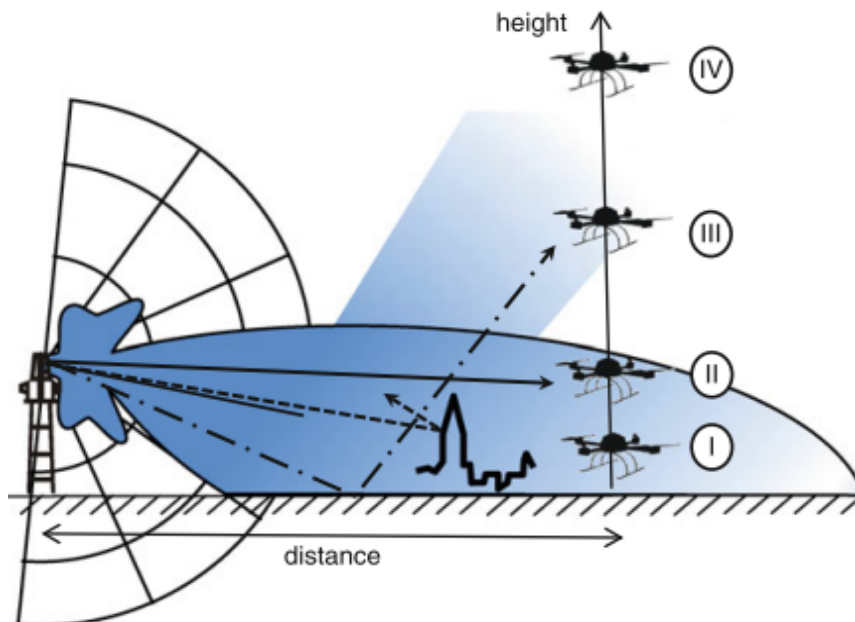
Σχήμα 3. 80: Επικοινωνία των ΜΕΑ με τη χρήση επίγειου δικτύου

3.3.2 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ Α/Φ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η χρησιμοποίηση του επίγειου δικτύου αναλόγως της χρήσης διακρίνεται σε συνδέσεις αέρος-αέρος και αέρος-εδάφους (A2A-A2G). Ο έλεγχος και η επικοινωνία των Α/Φ μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω απευθείας σύνδεσης στο δίκτυο κορμού για τον έλεγχο ενός Α/Φ είτε μέσω αναμεταδοτών οι οποίοι εκμεταλλεύονται το πρωτόκολλο 802.11 και επικοινωνούν μέσω της δημιουργίας Ad-Hoc δικτύων σε τοπολογία πλέγματος (mesh). Η δημιουργία ad-hoc δικτύων μεταξύ ΜΕΑ αποτελεί την αρχή για την δικτύωση μεταξύ σημανών ΜΕΑ και αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται επικοινωνία για ύψος έως 500 μέτρα χωρίς επιπρόσθετη

υποδομή λόγω περιορισμών στην κατεύθυνση εκπομπής του σήματος των επίγειων δικτύων. Αναλόγως της ισχύος του σήματος τα ύψη από 0 έως 500 μέτρα μπορούν να διαχωριστούν σε τέσσερις ζώνες οι οποίες παρέχουν σταδιακά μειωμένη κάλυψη και ισχύ σήματος[54] καθώς και παρεμβολές εξαιτίας των ανακλάσεων του σήματος στο έδαφος (Σχήμα 3.40).

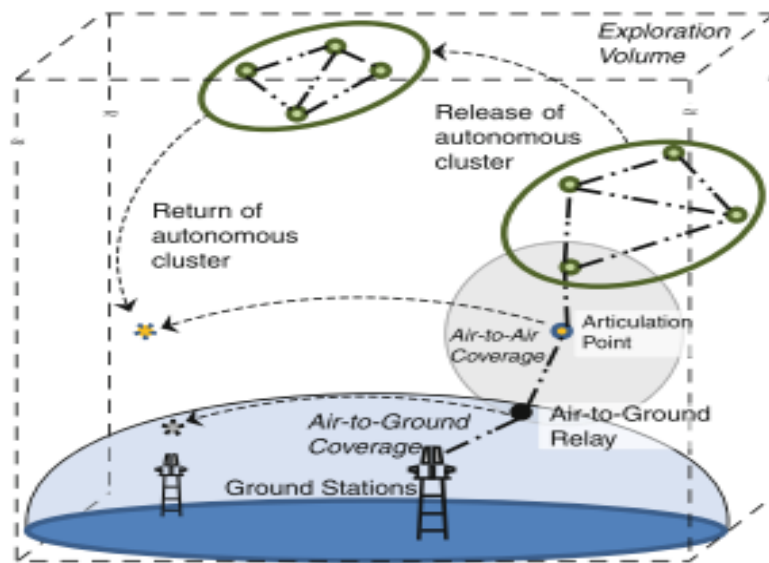
- Ζώνη I: Το MEA επιχειρεί σε ύψη 10-20 μέτρα όπου παρουσιάζονται φαινόμενα «σκίασης» (shadowing) του σήματος από τα εμπόδια που υπάρχουν όπως κτήρια, δέντρα και εγκαταστάσεις.
- Ζώνη II: Παρατηρούνται φαινόμενα παρεμβολών από την αντανάκλαση του σήματος στις οροφές των κτηρίων σε ύψη από 20 έως 50 μέτρα.
- Ζώνη III: Για ύψη πάνω από 50 μέτρα το MEA βγαίνει εκτός του κύριου λοβού εκπομπής της κεραίας του σταθμού εκπομπής βάσης και η επικοινωνία υλοποιείται από την αντανάκλαση του σήματος από το έδαφος.



Σχήμα 3. 81: Διαχωρισμός των εναερίων ζωνών αναλόγως της ποιότητας του σήματος

- Ζώνη IV: Για ύψη πάνω από 300 μέτρα τόσο η εκπομπή από τον κύριο λοβό της κεραίας όσο και οι αντανάκλασεις του σήματος εκμηδενίζονται με αποτέλεσμα την πολύ μικρή απόκριση σε τέτοια ύψη.

Για την επέκταση του επίγειου σήματος από τα επίγεια κυβελωτά συστήματα (UMTS- 3G) εκτός των ζωνών που περιγράψαμε παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν MEA αναμεταδότες και δικτύωση ad-hoc σύμφωνα με το πρότυπο 802.11 μεταξύ των MEA για την διάδοση του σήματος έως το επιθυμητό σημείο αποστολής με τη χρήση ισάριθμων MEA.



Σχήμα 3. 82: Επικοινωνία ΜΕΑ με τη χρήση επίγειου UMTS-3G δικτύου μέσω αναμεταδοτών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ. ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΚΑΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ

Η επικοινωνία μεταξύ των ΜΕΑ αποτελεί το κρίσιμότερο κομμάτι για την υλοποίηση συστημάτων UAS πολλαπλών ΜΕΑ[52]. Εάν τα ΜΕΑ επικοινωνούν απευθείας με το δίκτυο κορμού η δικτύωση μεταξύ τους μπορεί να επιτευχθεί μέσω του δικτύου σύνδεσης τους απαγορεύοντας όμως έτσι την αυτόνομη δικτύωση τους. Για να επιτευχθεί αυτόνομη δικτύωση μεταξύ των ΜΕΑ θα πρέπει να βασιστεί στην δημιουργία αυτόνομων άνευ προηγούμενης υποδομής δικτύων τα οποία θα βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11 (wi-fi) και σε εξοπλισμό COTS (Commercial Off The Shelf-Gov- Cots, Mil-COTS)[59-42]. Τα σενάρια υλοποίησης ενός τέτοιου multi hop δικτύου υλοποιούνται για μικρού βεληνεκούς ΜΕΑ λόγω των περιορισμών στο εύρος κάλυψης των ad-hoc δικτύων και συνοψίζονται σε α.) δικτύωση με το πρότυπο 802.11 στις συχνότητες 2,4 και σε 5 GHz, β.) δικτύωση με εκπομπή στα 900 MHz σύμφωνα με το πρότυπο 802.11 επεκτείνοντας το εύρος του δικτύου μέχρι τα 2000 μέτρα. Η χρησιμοποίηση MANET (Mobile Ad-hoc Networks) για την δικτύωση μεταξύ των ΜΕΑ έχει επικρατήσει ως FANET (Flying Ad-hoc Network) ξεχωρίζοντας ως προς τις παραμέτρους των κινούμενων κόμβων που υλοποιούν το δίκτυο. Η τοπολογία πλέγματος η οποία δημιουργείται από την ad-hoc δικτύωση μεταξύ των ΜΕΑ απαιτεί την επικοινωνία ενός ή περισσότερων ΜΕΑ κόμβων με τον σταθμό βάσης, με μία από τις μεθόδους που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3, αποτελώντας τις κεντρικές θύρες gateways για τα υπόλοιπα ΜΕΑ[52].

4.1 ΔΙΚΤΥΑ FANET

Η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη στη χρήση των ΜΕΑ έχει οδηγήσει στην μετάβαση από την χρήση ενός HALE ΜΕΑ στη χρήση πολλαπλών Micro ΜΕΑ η οποία ενώ εμπεριέχει αρκετά πλεονεκτήματα έχει και αρκετά μειονεκτήματα βασικότερο των οποίων αποτελεί η επικοινωνία και η δικτύωσή τους. Για να επιτευχθεί αυτό δημιουργήθηκαν τα FANET τα οποία αποτελούν ad-hoc δίκτυα μεταξύ των UAV's.

➤ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ FANET

Η υλοποίηση των δικτύων FANET εμπεριέχει αρκετές διαφοροποιήσεις και τα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα ad-hoc δίκτυα και σε σχέση με την χρησιμοποίηση ενός μεγάλου ΜΕΑ όπως τα HALE- MALE. Αρχικά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ενός συνόλου μικρών ΜΕΑ υπολείπεται κατά πολύ σε σχέση με τα μεγαλύτερους μεγέθους. Ακόμη η επεκτασιμότητα που επιτυγχάνεται από τη χρήση μικρότερων ΜΕΑ μέσω των πολλαπλών μεταπηδήσεων (multi hop) από ΜΕΑ σε ΜΕΑ είναι μεγαλύτερη από αυτή των μεγαλύτερων UAV. Επίσης η βιωσιμότητα στην εκπλήρωση της αποστολής ενός δικτύου πολλαπλών UAV εξασφαλίζεται ακόμη και στη περίπτωση που θα συμβεί πτώση ενός ή περισσότερων

UAV σε αντίθεση με τα MEA που επιχειρούν από μόνα τους στα οποία θα σήμαινε ματαίωση της αποστολής. Τέλος με την χρήση πολλαπλών UAV για την εκπλήρωση μίας αποστολής επιτυγχάνεται συγκριτικό πλεονέκτημα στην ταχύτερη υλοποίηση αυτής καθώς και στον εντοπισμό τους καθώς έχουν πολύ μικρότερο ίχνος από τα μεγαλύτερα MEA γεγονός που είναι κρίσιμο για τις στρατιωτικές εφαρμογές.

Παράλληλα λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των κόμβων που συνθέτουν ένα FANET, όπως η ακανόνιστη και ιδιαίτερα δυναμικά μεταβαλλόμενη τοπολογία τους λόγω της ταχύτερης κίνησης τους στον χώρο (pitch-roll-yaw), έχουν αρκετούς περιορισμούς σε σχέση με τα άλλα ad-hoc δίκτυα τα οποία εμφανίζουν πολύ μικρότερη κινητικότητα των κόμβων και αλλά και αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου. Για αυτό τον λόγο θα πρέπει να αναλύουν τις πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες των Α/Φ για την λήψη κατάλληλης επιλογής κύριου κόμβου (gateway) καθώς και για την τήρηση των MEA εντός της τοπολογίας και του βεληνεκού του δικτύου. Ακόμη οι αποστάσεις μεταξύ των Α/Φ στα FANET είναι πολύ μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα MANET και ως εκ τούτου απαιτούνται ειδικές RF συνδέσεις και εξοπλισμός για την ζεύξη μεταξύ των Α/Φ οι οποίες όμως είναι συνήθως εντός του LOS σε αντίθεση με τα MANET όπου συνήθως παρεμβάλλονται εμπόδια όπως τοίχοι, κατοικίες κτλ. Ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των FANET αποτελεί η εξάρτηση τους από την ενεργειακή αυτονομία η οποία περιορίζει την διάρκεια ζωής του δικτύου όπου θα πρέπει να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι επικοινωνίας, χαμηλής κατανάλωσης για την αύξηση της διάρκειας λειτουργίας των Α/Φ. Επίσης λόγω της διπλής λειτουργίας των MEA σαν τερματικά και σαν δρομολογητές θα πρέπει να διαθέτουν ισχυρή υπολογιστική ισχύ για να ανταπεξέρχονται στις ανάγκες του δυναμικά μεταβαλλόμενου δικτύου χωρίς να υπερβαίνουν μαζί με το ωφέλιμο φορτίο το όριο βάρους για την αξιοπλοΐα του MEA. Τέλος για να λειτουργήσει με αποδοτικό τρόπο ένα FANET θα πρέπει όλοι οι κόμβοι του να γνωρίζουν τις θέσεις όλων των υπόλοιπων με μία διαδικασία ενθυλακωμένων πακέτων τα οποία μετατρέπουν την παρούσα θέση του MEA σε πακέτα τα οποία αποστέλλονται συνεχώς μέσω της IMU (inertial measurement unit) έτσι ώστε να είναι δυνατή τόσο η λειτουργία προσαρμοστικών μοντέλων επικοινωνίας μέσω adaptive array κεραιών, όσο και την τοπογραφική συσχέτιση των κόμβων για την αποφυγή συγκρούσεων.

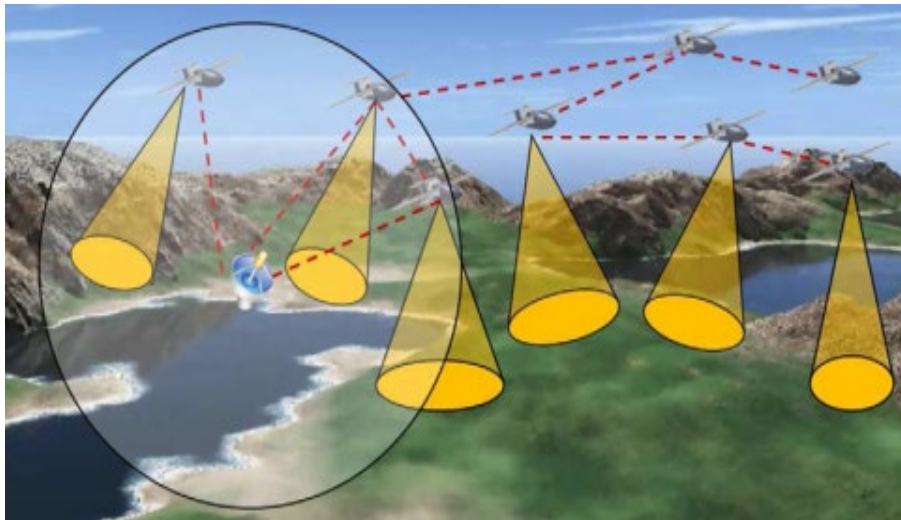
	MANET	VANET	FANET
Node mobility	Low	High	Very high
Mobility model	Random	Regular	Regular for predetermined paths, but special mobility models for autonomous multi-UAV systems
Node density	Low	High	Very low
Topology change	Slow	Fast	Fast
Radio propagation model	Close to ground, LoS is not available for all cases	Close to ground, LoS is not available for all cases	High above the ground, LoS is available for most of the cases
Power consumption and network lifetime	Energy efficient protocols	Not needed	Energy efficiency for mini UAVs, but not needed for small UAVs
Computational power	Limited	High	High
Localization	GPS	GPS, AGPS, DGPS	GPS, AGPS, DGPS, IMU

Σχήμα 4. 40: Διαφορές στα χαρακτηριστικά μεταξύ των ad-hoc δικτύων

➤ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ FANET

Οι κύριες περιπτώσεις χρήσης των δικτύων FANET περιλαμβάνουν:

- **Επέκταση της κλιμάκωσης της ακτίνας κάλυψης του δικτύου ΜΕΑ:** Σε αντίθεση με την περίπτωση χρήσης της επίγειας υποδομής για την επικοινωνία μεταξύ των ΜΕΑ όπου τίθενται γεωγραφικοί περιορισμοί ως προς τα όρια κάλυψης του δικτύου, στα FANET η επικοινωνία αποκαθίσταται ακόμη και αν χαθεί η επικοινωνία με τον σταθμό βάσης, αρκεί βέβαια ένα εκ των ΜΕΑ να επικοινωνεί με το επίγειο δίκτυο αναλαμβάνοντας τον ρόλο του δρομολογητή. Στα δίκτυα FANET μέσω των πολλαπλών αναπηδήσεων τα ΜΕΑ επεκτείνουν την επιχειρησιακή ακτίνα δράσης τους μέχρι το ανώτερο όριο του LOS που δύναται να τηρηθεί μεταξύ τους (Σχήμα 4.2).

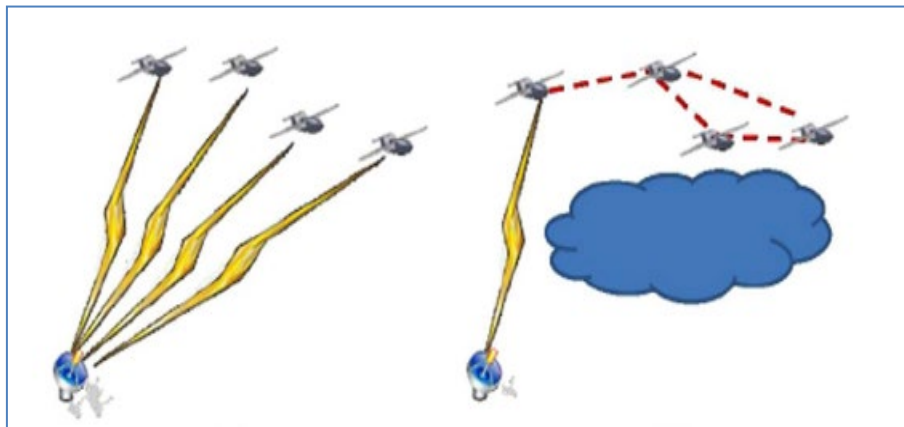


Σχήμα 4. 41: Επέκταση της ακτίνας κάλυψης με τη συνεργασία πολλαπλών ΜΕΑ

- **Εγκαθίδρυση αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ πολλαπλών ΜΕΑ:** Η επικοινωνία μεταξύ των ΜΕΑ η οποία επιτυγχάνεται μέσω επίγειας υποδομής αν και αποτελεί χρήσιμη μέθοδο για τον έλεγχο των μεγαλύτερων σε μέγεθος ΜΕΑ μπορεί όμως να αποδειχθεί μη αξιόπιστη όταν πρόκειται για την δικτύωση πολλαπλών Α/Φ. Οι δυναμικά μεταβαλλόμενη τοπολογία καθώς και οι αλλαγές στην κατάσταση του μέσου διάδοσης μπορεί να οδηγήσουν εκτός δικτύου Α/Φ τα οποία θα υποστούν αυτές τις μεταβολές. Ως εκ τούτου τα FANET αποτελούν αξιόπιστη μέθοδο δικτύωσης πολλαπλών Α/Φ καθώς δεν είναι αναγκαία η διασύνδεση του συνόλου των Α/Φ στο επίγειο δίκτυο μειώνοντας την απόσταση αλλά και τις επιδράσεις των μεταβολών τις οποίες προαναφέραμε (Σχήμα 4.2).

- **Υλοποίηση σμηνών ΜΕΑ:** Επειδή το μέγεθος των ΜΕΑ για την υλοποίηση σμηνών δεν επιτρέπει την ύπαρξη μεγάλου φόρτου ωφέλιμου φορτίου καθώς και επικοινωνιακού εξοπλισμού δεν υφίστανται μεγάλες δυνατότητες υλοποίησης ζεύξης σε μεγάλη απόσταση από το επίγειο δίκτυο κορμού. Οι ανάγκες διατήρησης δικτύωσης μεταξύ ΜΕΑ τα οποία αποτελούν σμήνος έχει μέγιστη σημασία

καθώς αυτά αναλαμβάνουν αποστολές, ως σύνολο, η υλοποίηση των οποίων προϋποθέτει διατήρηση της επικοινωνίας[60].



Σχήμα 4. 42: Δικτύωση μεταξύ ΜΕΑ

➤ **ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ FANET**

Παρόλο που τα FANET's έχουν αρκετές διαφορές και ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα MANET, έχουν και αρκετές ομοιότητες καθώς αποτελούν υποσύνολο αυτών. Αρχικά τα πρώτα FANET χρησιμοποιούσαν πολυκατευθυντικές κεραίες για την υλοποίηση του προτύπου CSMA-CA και του μηχανισμού κατανεμημένης λειτουργίας συντονισμού (DCF) για την πρόσβαση στο επίπεδο MAC σύμφωνα με το πρότυπο OSI. Λόγω των περιορισμών οι οποίοι τίθενται από τη χρήση παγκτευθυντικά ακτινοβολουσών κεραιών στη συνέχεια προτάθηκε η χρήση κατευθυντικών κεραιών με τροποποίηση του μηχανισμού εικονικής ανίχνευσης φέροντος RTS/ CTS ώστε να είναι δυνατή η ικανοποίηση των περιορισμών του δικτύου λόγω της μεγάλης κινητικότητας των κόμβων και της καθυστέρησης στην οποία υπόκεινται τα πακέτα (Adaptive Mac Protocol for UAV-AMUAV). Επίσης μέσω των προσαρμοσμένων MAC πρωτόκολλων είναι δυνατή η full duplex ζεύξη καθώς και η ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλαπλούς αποδέκτες (multi packet reception-MPR). Στο επίπεδο δικτύου αρχικά είχαν χρησιμοποιηθεί οι υπάρχοντες αλγόριθμοι δρομολόγησης για τα ad-hoc δίκτυα οι οποίοι χρησιμοποιούσαν πολυκατευθυντικές κεραίες. Αργότερα αναπτύχθηκαν πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία εκμεταλλεύονταν την χρήση κατευθυντικών κεραιών χρησιμοποιώντας το πρόθεμα D (directional) όπως το DOLSR (Directional Optimized Routing Protocol)[61] όπως επίσης και διαδραστικής αλληλεπίδρασης πρωτοκόλλα των οποίων τα στρώματα δεν λειτουργούν απομονωμένα αλλά αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους αυξάνοντας την απόδοση του δικτύου όσον αφορά την καθυστέρηση και τη ροή των πακέτων.

4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 802.11 ΣΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

OSI

Το **μοντέλο αναφοράς OSI[61]** είναι μια διαστρωματωμένη, αφηρημένη περιγραφή για τη σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών και δικτυακών πρωτοκόλλων. Είναι γνωστό και ως **μοντέλο των επτά επιπέδων** σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης ISO(πρότυπο ISO 7498-1). Για την υλοποίηση του χρησιμοποιεί μία κατακόρυφη στοιβα από επτά επίπεδα λειτουργιών για την καθεμιά από τις οποίες μπορεί να οριστεί ένα πρωτόκολλο λειτουργίας. Σε κάθε επίπεδο γίνεται αξιοποίηση των λειτουργιών του αμέσως κατώτερου επιπέδου και προετοιμάζει την λειτουργικότητα του αμέσως επόμενου επιπέδου. Τα επίπεδα αυτά είναι στενά διαχωρισμένα μεταξύ τους και οι λειτουργίες που το καθένα επιτελεί είναι άγνωστες μεταξύ τους διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο τη μελέτη της συμπεριφοράς των πρωτοκόλλων που επιτελούν τις λειτουργίες του καθενός επιπέδου καθώς επίσης και τη σχεδίαση νέων. Το πρότυπο αυτό ονομάζεται στοιβα πρωτοκόλλων τα οποία χωρίζονται σε υλικό και λογισμικό. Συνήθως στα κατώτερα υλοποιούνται το υλικό ενώ στα ανώτερα το λογισμικό. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την συνεργασία μεταξύ των διαφόρων στοιχείων ενός δικτύου στα διάφορα στρώματα υλοποίησης του , ανεξάρτητα από το ποιος είναι ο κατασκευαστής των στοιχείων αυτών. Ωστόσο το μοντέλο αυτό έχει επί της ουσίας παραμεριστεί και ένα μόνο μέρος χρησιμοποιείται λόγω της πολυπλοκότητας των προδιαγραφών του σε αντίθεση με το μοντέλο TCP/IP το οποίο χρησιμοποιεί ελαφρώς διαφορετική διαστρωμάτωση τεσσάρων επιπέδων. Στα παρακάτω σχήματα αναφέρονται τα επίπεδα διαστρωμάτωσης του καθενός επιπέδου καθώς και μία συνοπτική περιγραφή και λειτουργία τους (Σχήμα 4.3).

α.)

Μοντέλο OSI		Μονάδα δεδομένων	Επίπεδο	Λειτουργία
Λογισμικό	Δεδομένα	7. Εφαρμογών	Παρέχεται στις εφαρμογές πρόσβαση στο δίκτυο	
		6. Παρουσίας	Αναπαράσταση δεδομένων και κρυπτογράφηση	
		5. Συνόδου	Έλεγχος του διαλόγου μεταξύ των άκρων της επικοινωνίας	
	Τμήμα	4. Μεταφοράς	Αξιόπιστη επικοινωνία από άκρο σε άκρο	
Υλικό	Πακέτο	3. Δικτύου	Καθορισμός διαδρομών και λογικών διευθύνσεων των κόμβων στα πλαίσια ενός διαδικτύου	
	Πλαίσιο	2. Ζεύξης δεδομένων	Φυσική διευθυνσιοδότηση (MAC & LLC)	
	Bit	1. Φυσικό	Διαδική μετάδοση σήματος μέσω του φυσικού μέσου	

β.)

4	Εφαρμογής	π.χ. HTTP , FTP , DNS (Πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως το RIP , που βασίζονται στο πρωτόκολλο UDP μπορούν επίσης να καταχωρηθούν στο στρώμα Δικτύου)
3	Μεταφοράς	π.χ. TCP , UDP , RTP (Πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως το OSPF , που λειτουργούν πάνω από το IP, μπορούν επίσης να καταχωρηθούν στο στρώμα Δικτύου)
2	Δικτύου	Για το TCP/IP, χρησιμοποιείται μόνο το IP (Τα πρωτόκολλα ICMP και IGMP , παρ'όλο που βασίζονται πάνω στο IP για την λειτουργία τους, καταχωρούνται στο στρώμα Δικτύου. Το ARP αποτελεί μια από τις ολιγάριθμες εξαιρέσεις, εφόσον είναι ανεξάρτητο του IP)
1	Συνδέσμου	π.χ. Ethernet , Token Ring , κλπ.

Σχήμα 4. 43: α.) Το μοντέλο OSI, β.) Το μοντέλο TCP/IP

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου 802.11 αφορά το επίπεδο πρόσβασης στο μέσο (MAC Layer) του επιπέδου ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer) το οποίο υλοποιείται με το πρωτόκολλο CSMA/CA. Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων αποτελεί το δεύτερο από τα επτά επίπεδα του μοντέλου OSI και το πρώτο από τα τέσσερα επίπεδα του μοντέλου TCP/IP. Στόχος του είναι να παρέχει υπηρεσίες στο επίπεδο δικτύου, αξιοποιώντας τις υπηρεσίες του φυσικού επιπέδου. Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων ενός δικτύου καθορίζεται από πρωτόκολλα τα οποία ρυθμίζουν τη μετάδοση δεδομένων σε ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι αποτελούμενο από ένα μοναδικό φυσικό μέσο (π.χ. σε ενσύρματο τοπικό δίκτυο, όπου το κοινό φυσικό μέσο είναι ένα καλώδιο, σε ασύρματο τοπικό δίκτυο, όπου το κοινό φυσικό μέσο είναι ο ελεύθερος χώρος, ή σε σύνδεση από σημείο-σε-σημείο, όπου το φυσικό μέσο δεν είναι κοινό καθώς μπορεί να προσπελαστεί μόνο από τους κόμβους στα δύο άκρα επικοινωνίας). Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων ασχολείται με την τοπική παράδοση πλαισίων μεταξύ συσκευών στην διευθυνσιοδότηση και διαχείριση των μέσων στο ίδιο τοπικό δίκτυο. Μπορούμε ακόμη να παρομοιάσουμε το επίπεδο ζεύξης δεδομένων σαν κάποιο «τροχονόμο ο οποίος πασχίζει να διαμοιράσει το μέσο(δρόμο) στα διάφορα μέλη τα οποία αντιδικούν μεταξύ τους για να το χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα. Επίσης το επίπεδο ζεύξης δεδομένων είναι υπεύθυνο για να καθορίσει τον τρόπο με τον οποίο τα τερματικά ανιχνεύουν αποφεύγουν και ανανήπτουν μετά από συγκρούσεις οι οποίες συμβαίνουν στην προσπάθεια των κόμβων να διεκδικήσουν ταυτόχρονα το μέσο.

OSI Number	OSI Layer	TCP/IP Number	TCP/IP Layer
7	Application	4	Application
6	Presentation		
5	Session		
4	Transport	3	Transport
3	Network	2	Internet
2	Data Link	1	Network Access
1	Physical		

Σχήμα 4. 44: Αντιστοιχία διαστρωμάτωσης μεταξύ μοντέλων OSI και TCP/IP

➤ **ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 802.11**

Αποτελεί μία οικογένεια προτύπων της IEEE για ασύρματα δίκτυα (WLAN) τα οποία είχαν ως σκοπό να επεκτείνουν το πρότυπο 802.3 που χρησιμοποιείται στο Ethernet στα ενσύρματα δίκτυα. Είναι περισσότερο γνωστό με την ονομασία wi-fi και έχει διάφορες εκδόσεις όπως η 802.11 a/b/g/n/f εκπέμποντας σε συχνότητες 2,4 GHz και 5 GHz αναλόγως του μοντέλου. Με το πρότυπο 802.11 καθορίζονται οι παράμετροι για την κατάληψη του μέσου στο επίπεδο MAC καθώς και στο φυσικό. Αρχικά το πρότυπο σχεδιάστηκε για την υλοποίηση της εκχώρησης του καναλιού, την ενθυλάκωση καθώς και τον εντοπισμό λαθών στην αποστολή των πακέτων για λειτουργία με πολυκατευθυντικές κεραιές στη συνέχεια θα εξετάσουμε την υλοποίηση του προτύπου για την λειτουργία με κατευθυντικές κεραιές για την αύξηση της απόδοσης των δικτύων FANET. Το πρότυπο 802.11 υποστηρίζει και τους δύο τρόπους λειτουργίας του δικτύου:

- **Ομότιμα:** Όπου δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός σταθμός βάσης ή σημείο πρόσβασης, οι κόμβοι είναι ισότιμοι και η πρόσβαση στο μέσο γίνεται με τη χρήση κάποιου πρωτοκόλλου και με σημείο πρόσβασης στο δίκτυο έναν κεντρικό κόμβο του τοπικού δικτύου που είναι ενσύρματα συνδεδεμένος σε αυτό. Αυτός ο κόμβος ελέγχει την πρόσβαση στο μέσο και δρα σαν αμφίδρομος επαναλήπτης.

- **Δίκτυα Υποδομής ή Δομημένα (Infrastructure):** Στα οποία υπάρχει ένα ενσύρματο δίκτυο κορμού(DS), στο οποίο συνδέονται τα σημεία πρόσβασης (AP). Οι κόμβοι(**STA**) οι οποίοι συνδέονται ασύρματα σε ένα (AP) ονομάζονται **Βασικό Σύνολο Υπηρεσιών(BSS)** τα οποία συνδέονται μέσω του δικτύου (DS). Τα STA ενός BSS δεν είναι αναγκαίο να είναι στην εμβέλεια όλων μεταξύ τους, αρκεί να είναι στην εμβέλεια του σημείου πρόσβασης (AP).

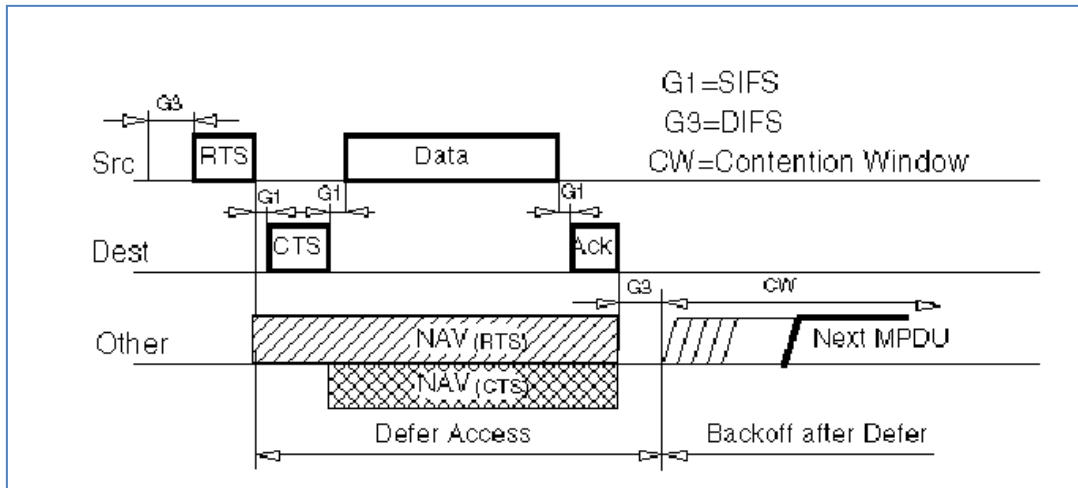
Όλα τα πρωτόκολλα 802.11x έχουν κοινό υποεπίπεδο MAC και διαφέρουν στο φυσικό μέσο. Το υποεπίπεδο LLC, που αναλαμβάνει τον έλεγχο ροής, τον έλεγχο σφαλμάτων και τη διασύνδεση προς το επίπεδο δικτύου, ταυτίζεται με το καθιερωμένο κοινό πρωτόκολλο 802.2 που χρησιμοποιείται και στο Ethernet και στα περισσότερα ενσύρματα τοπικά δίκτυα. Η λειτουργία του 802.11 στο επίπεδο MAC βασίζεται στην DCF (Distributed Coordination Function) με την οποία υλοποιείται η μέθοδος CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). . Μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί επικαλυπτικά και το πρωτόκολλο PCF (Point Coordination Function)

πάνω από το DCF, το οποίο ενεργοποιείται αυτόματα όταν το σημείο πρόσβασης κρίνει απαραίτητο έτσι ώστε να μεταδοθεί μία κρίσιμη πληροφορία άμεσα, χωρίς ανταγωνισμό.

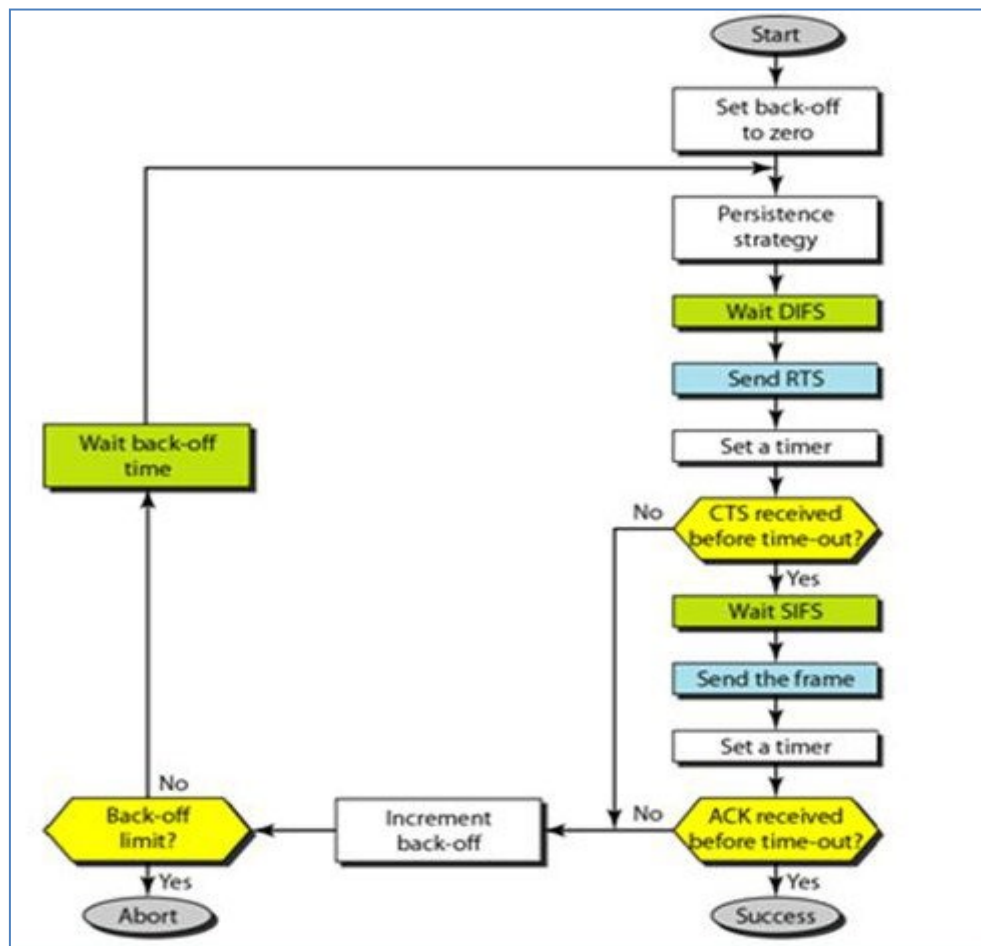
➤ **Η ΜΕΘΟΔΟΣ CSMA/CA ΣΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 802.11**

Το πρωτόκολλο CSMA/CA το οποίο αποτελεί την εφαρμογή του πρωτοκόλλου DCF και εφαρμόζεται στο πρότυπο IEEE 802.11 για ασύρματα δίκτυα, χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό φυσικού και έναν εικονικού τρόπου ανίχνευσης του μέσου για να καταλάβει εάν αυτό είναι απασχολημένο ή όχι. Για να εξάγει το επιδιωκόμενο συμπέρασμα για το αν το μέσο είναι κατειλημμένο ή όχι χρησιμοποιεί τις πληροφορίες οι οποίες προέρχονται από τον φυσικό τρόπο ανίχνευσης όσο και από τα πλαίσια που λαμβάνονται από κάθε σταθμό. Το πρωτόκολλο CSMA/CA αποτελεί έναν καταναμημένο τρόπο πρόσβασης στο μέσο, όπου δηλαδή δεν υπάρχει τερματικό το οποίο ελέγχει την πρόσβαση στο κοινό ασύρματο μέσο. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται ο παραπάνω μηχανισμός, οφείλεται στο γεγονός ότι, ένας ασύρματος σταθμός δεν έχει τη δυνατότητα να ακούσει το κανάλι και να διαπιστώσει κάποια σύγκρουση ενώ ταυτόχρονα μεταδίδει δεδομένα, σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα και το πρωτόκολλο CSMA/CD. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- **Γενικά:** Όταν κάποιο τερματικό το οποίο επιθυμεί πρόσβαση στο μέσο, διεκδικεί μία δυνατότητα εκπομπής αποφεύγοντας τις συγκρούσεις, εκτελώντας ακρόαση του μέσου διάδοσης με « **Φυσική και Εικονική Ανίχνευση Φέροντος**», οι οποίες δραστηριοποιούνται στο φυσικό επίπεδο (PHY) και στο υπόστρωμα MAC αντίστοιχα (Μοντέλο OSI) στην συνέχεια εάν αυτό είναι ελεύθερο για κάποιο χρονικό διάστημα DIFS (Distributed Coordination IFS) και για ένα ακόμη χρονικό διάστημα το οποίο καθορίζεται από την διαδικασία της εκθετικής αναβολής προσπάθειας αποστολής πακέτων (binary exponential back off time), καταλαμβάνει το μέσο και αποστέλλει το πακέτο του. Χρησιμοποιώντας πακέτα αίτησης αποστολής και επιβεβαίωσης αποστολής(RTS: Request to Send/CTS: Clear to Send) εξασφαλίζει την μη κατάληψη του μέσου από κάποιο άλλο τερματικό καθώς επίσης και την ειδοποίηση όλων των τερματικών που βρίσκονται εντός εμβέλειας τους ότι το μέσο είναι κατειλημμένο αυτήν τη χρονική στιγμή και ότι δεν θα πρέπει να εκπέμπουν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το οποίο εκχωρείται στον **δείκτη εικονικής ανίχνευσης του μέσου(Virtual Carrier Sense Indicator)** ή αλλιώς **διάνυσμα εκχώρησης δικτύου(NAV- Network Allocation Vector)** από τα πλαίσια RTS/CTS και ενεργοποιείται με την άφιξη στον αποστολέα του CTS οπότε και αρχίζει η αντίστροφη μέτρηση για την μετάδοση του πακέτου. Όταν η τιμή του **NAV γίνει μηδέν**, για να θεωρηθεί μία αποστολή πακέτου επιτυχής θα πρέπει να αποσταλεί στον αποστολέα κόμβο ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης ACK, διαφορετικά θεωρείται ότι συνέβη σύγκρουση με άλλο πακέτο και ο κόμβος αποστολέας διπλασιάζει τον χρόνο αναμονής και υποχωρεί σε εκθετική υποχώρηση αποστολής **exponential back off** μέχρις ότου ανακαταληφθεί το μέσο από αυτόν, οπότε και επανεκπέμπεται το πακέτο.



Σχήμα 4. 45: Μηχανισμός CSMA/CA με τη χρήση CTS/RTS και ACK



Σχήμα 4. 46: Μηχανισμός CSMA/CA

- **ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ(IFIS- Inter Frame**

Spaces)

Αναλόγως του επιθυμητού χρόνου αναμονής μεταξύ των διαδοχικών πλαισίων χρησιμοποιούνται τα παρακάτω χρονικά διαστήματα:

- SIFS (Short Inter Frame Space): Είναι το μικρότερο σε μέγεθος και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις αποστολής κάποιας άμεσης απάντησης, όπως ενός πλαισίου ή RTS/CTS ή ACK για την αποστολή του πακέτου δεδομένων αμέσως μετά την λήψη ενός έγκυρου CTS.

- PIFS (Point coordination function Inter Frame Space): Είναι το επόμενο σε μέγεθος και χρησιμοποιείται στην λειτουργία PCF για να καταληφθεί το κανάλι από το τερματικό που θα δίνει την άδεια χρήσης του καναλιού στα υπόλοιπα τερματικά.

- DIFS (Distributed coordination function Inter Frame Space): Είναι το αμέσως μεγαλύτερο σε μέγεθος χρονικό διάστημα, το οποίο εκφράζει και την μικρότερη δυνατή καθυστέρηση ανάμεσα στην εκπομπή δύο διαδοχικών πακέτων δεδομένων στην λειτουργία DCF.

- EIFS (Extended Inter Frame Space): Είναι το μεγαλύτερο σε μέγεθος και χρησιμοποιείται στην λειτουργία DCF όταν το φυσικό επίπεδο εντοπίζει ότι έγινε μία λάθος λήψη πλαισίου, και ενημερώνει για αυτό το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου. Μετά, όμως, από την λήψη ενός σωστού πλαισίου κατά την διάρκεια του EIFS, χρησιμοποιείται και πάλι το DIFS. Το EIFS χρησιμοποιείται γιατί δίνει την δυνατότητα στο τερματικό-πομπό του λάθους πλαισίου να καταλάβει ότι δεν έγινε σωστή λήψη.

- Slot Time: Αποτελεί ένα τμήμα κατανομής χρόνου (χρονοθυρίδα ή χρονοσχισμή) το οποίο χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των διαφόρων χρονικών διαστημάτων. Είναι σταθερό σε μέγεθος και η διάρκειά του καθορίζεται στο PHY (επίπεδο 1 του μοντέλου OSI) επίπεδο.

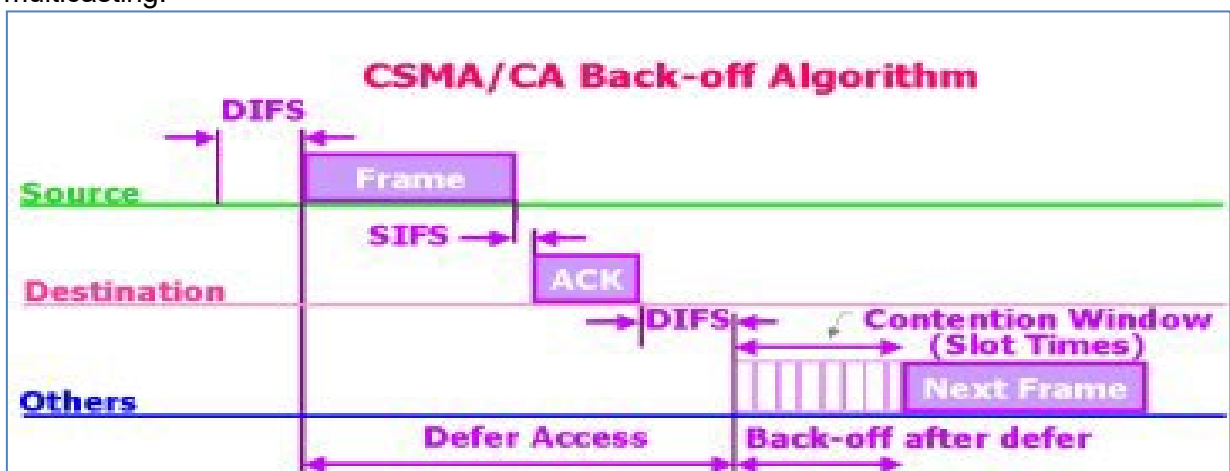
Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζεται σχηματικά η σχέσεις μεταξύ των χρονικών διαστημάτων IFS:

	←----- DIFS ----->		
	←----- PIFS ----->	← Slot time ----->	
← SIFS →	← Slot time ----->	← Slot time ----->	
	FHSS	DSSS	IR
Slot Time	50 μsec	20 μsec	8 μsec
SIFS	28 μsec	10 μsec	10 μsec
PIFS	78 μsec	30 μsec	18 μsec
DIFS	128 μsec	50 μsec	26 μsec
EIFS	1024 μsec	1088 μsec	953 μsec

Σχήμα 4. 47: Σχέσεις μεταξύ των διαστημάτων IFS

➤ **CSMA/CA ΜΕ ΦΥΣΙΚΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ**

Κατά την υλοποίηση αυτής της μεθόδου γίνεται ακρόαση του καναλιού μετάδοσης στην ασύρματη διεπαφή στο φυσικό επίπεδο για να ελεγχθεί εάν υπάρχει έγκυρο σήμα και συνεπώς η ύπαρξη άλλων πακέτων και να αποφευχθεί η σύγκρουση μεταξύ τους. Όταν ένας σταθμός επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο ενημερώνει το δεύτερο πεδίο του πλαισίου το οποίο θα αποσταλεί με την χρονική διάρκεια αποστολής του πακέτου και αναμένει για χρόνο DIFS συνεχίζοντας να ακούει το κανάλι. Εάν μετά την παρέλευση DIFS το κανάλι ελευθερωθεί, ο σταθμός περιμένει για έναν τυχαίο αριθμό χρονοθυρίδων (time slots), ο οποίος καθορίζεται από την διαδικασία του εκθετικού αλγόριθμου οπισθοχώρησης. Αν κατά την διάρκεια παρέλευσης μίας χρονοθυρίδας το κανάλι παραμένει κενό ο χρόνος αναβολής μειώνεται κατά μία χρονοθυρίδα μέχρις ότου μηδενιστεί οπότε και το τερματικό θα προσπαθήσει να καταλάβει το μέσο, εάν αυτό παραμένει κενό, και να εκπέμψει το πλαίσιο του. Εάν κατά την διάρκεια μίας χρονοθυρίδας το μέσο «ακουστεί» να είναι κατειλημμένο τότε οι υπόλοιποι σταθμοί σταματούν την διαδικασία κατάληψης του μέσου ενημερώνοντας το **Διάνυσμα Εκχώρησης Δικτύου (NAV- Network Allocation Vector)** από το πεδίο **2(διάρκεια)** του εκπεμπόμενου πλαισίου. Ο αριθμός των χρονοθυρίδων του χρόνου εκθετικής υποχώρησης «παγώνει» και ξεκινά πάλι την αντίστροφη μέτρηση, από την τιμή στην οποία είχε παγώσει όταν το κανάλι «ακροασθεί» και πάλι ελεύθερο, όταν δηλαδή μηδενισθεί το **NAV**. Μετά την επιτυχή αποστολή ακολουθεί χρόνος **SIFS** και στην συνέχεια ακολουθεί πακέτο επιβεβαίωσης **ACK** από τον παραλήπτη προς τον αποστολέα. Οι υπόλοιποι κόμβοι αφού μηδενισθεί ο χρόνος της εκθετικής τους οπισθοχώρησης αναμένουν ακόμη για χρόνο μεγαλύτερο από DIFS (χρόνος ο οποίος αντιστοιχεί ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πακέτα) και στην συνέχεια ξεκινάει νέα διαδικασία για να διεκδικήσουν το μέσο για την αποστολή των πλαισίων τους. Εάν δεν σταλεί πλαίσιο επιβεβαίωσης ο σταθμός εκπομπής θεωρεί ότι έγινε κάποιο λάθος στην αποστολή οπότε και προσπαθεί να ανακαταλάβει το μέσο, μέσω της παραπάνω διαδικασίας για να αποστείλει ξανά το πακέτο του. Επιπλέον όταν πραγματοποιείται ταυτόχρονη αποστολή πακέτου από ένα τερματικό προς μία ομάδα τερματικών (multicasting) οι παραλήπτες απαγορεύεται να αποστείλουν πλαίσια επιβεβαίωσης διότι αυτό θα δημιουργούσε συγκρούσεις μεταξύ των πλαισίων επιβεβαίωσης με αποτέλεσμα την μείωση της αξιοπιστίας της μεθόδου σε περιπτώσεις multicasting.



Σχήμα 4. 48: CSMA/CA με Φυσική Ανίχνευση Φέροντος

- **ΕΚΘΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΟΠΙΣΘΟΧΩΡΗΣΗΣ**

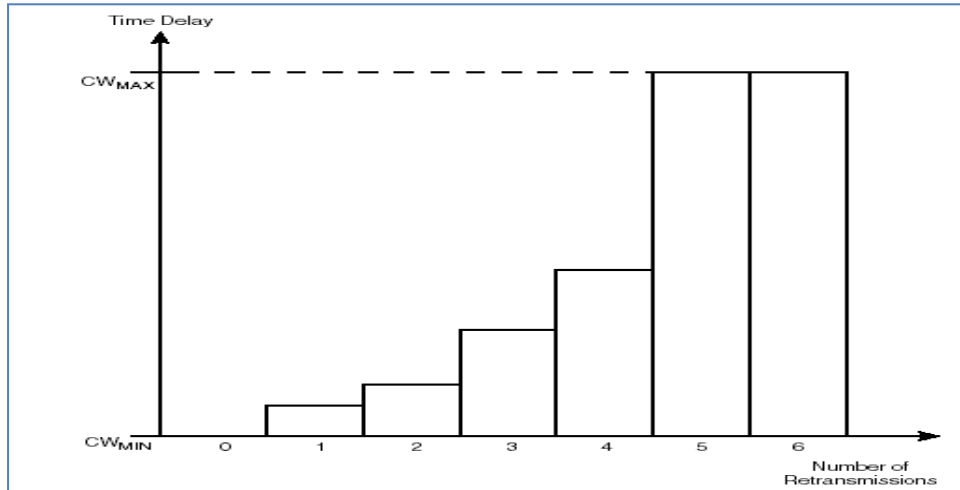
Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο για να εκπέμψει ένας σταθμός θα πρέπει πρώτα να ακροαστεί το κανάλι για ένα χρονικό διάστημα DIFS ή EIFS εάν έχει προηγηθεί λανθασμένη λήψη, συν ένα χρονικό διάστημα από χρονοθυρίδες ή χρονοσχισμές οι οποίες αποτελούν τον χρόνο οπισθοχώρησης (**back off**) και υπολογίζονται από τον **εκθετικό αλγόριθμο οπισθοχώρησης(exponential back off algorithm)**. Με αυτόν τον τρόπο ελαττώνεται η πιθανότητα συγκρούσεων μεταξύ των τερματικών Για τον υπολογισμό αυτού του χρόνου λαμβάνονται υπόψη τα κάτωθι:

- Ο εκθετικός αλγόριθμος οπισθοχώρησης χρησιμοποιείται εάν:
 - α. Ο σταθμός ανιχνεύσει το μέσο πριν από την πρώτη μετάδοση κατειλημμένο.
 - β. Μετά από κάθε αναμετάδοση.
 - γ. Μετά την πρώτη επιτυχή μετάδοση.
- Ο εκθετικός αλγόριθμος οπισθοχώρησης δεν χρησιμοποιείται: όταν ένας σταθμός αποφασίσει να στείλει ένα πακέτο, το μέσο είναι ανενεργό και έχει παρέλθει διάστημα μεγαλύτερο από DIFS.
- Ο υπολογισμός του χρόνου γίνεται με τον παρακάτω τύπο:
Back off time = Random () · Time Slot

Time Slot: Είναι η διάρκεια της χρονοσχισμής η οποία καθορίζεται στο φυσικό επίπεδο (PHY).

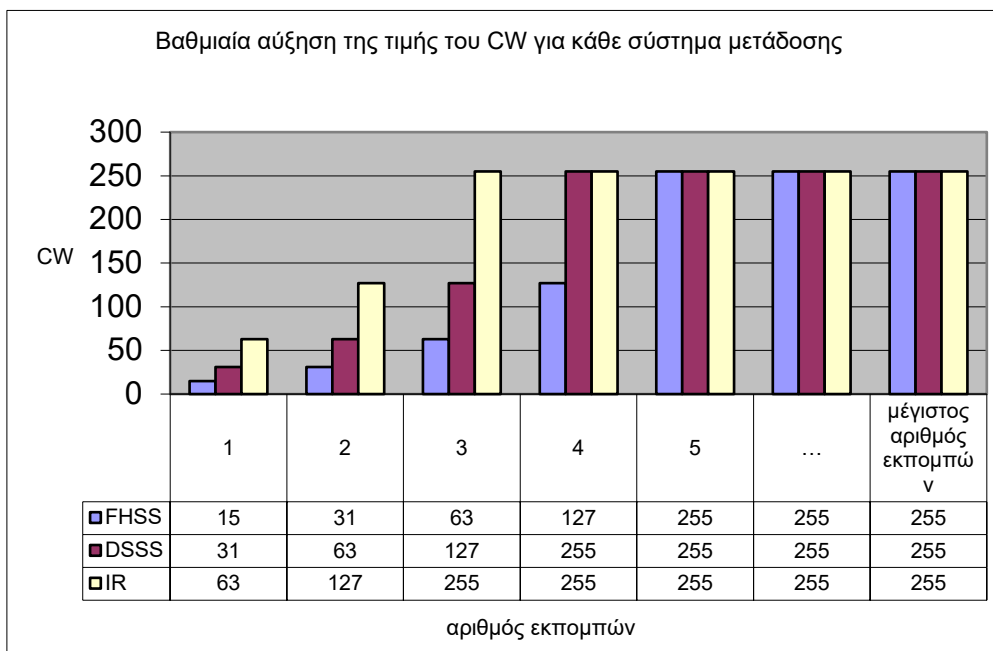
Random (): Είναι μία ψευδομεταβλητή η οποία παίρνει τυχαίες τιμές στο διάστημα [0-CW]. Το CW (contention window) είναι μία μεταβλητή η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τον βαθμό χρησιμοποίησης του μέσου. Άρα με αυτόν τον τρόπο το κανάλι κατανέμεται «δίκαια» ανάλογα με τον αριθμό των τερματικών, τις συγκρούσεις, τις αναμεταδόσεις και κυρίως ανάλογα με τον χρόνο αναμονής για πρόσβαση στο μέσο. Όταν ένα τερματικό δεν προλάβει να καταλάβει το μέσο, κρατά την τιμή του χρόνου αναβολής στην οποία σταμάτησε για την επόμενη φορά που θα προσπαθήσει να καταλάβει το μέσο. Έτσι, το τερματικό αυτό θα πρέπει να περιμένει στατιστικά μικρότερο χρονικό διάστημα αναβολής σε σχέση με ένα τερματικό που προσπαθεί για πρώτη φορά να καταλάβει το μέσο, και για αυτό έχει περισσότερες πιθανότητες να εκπέμψει. Επίσης, δικαιοσύνη ως προς την κατάληψη του μέσου εισάγει και το γεγονός ότι κάθε τερματικό καταλαμβάνει το μέσο για την εκπομπή ενός μόνο πλαισίου κάθε φορά, και για να εκπέμψει το επόμενο πλαίσιο πρέπει να μπει και πάλι στην διαδικασία ανταγωνισμού για την κατάληψη του μέσου. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα και σε άλλα τερματικά να εκπέμψουν ανάμεσα σε δύο διαδοχικές εκπομπές του ίδιου τερματικού. Η μεταβλητή CW παίρνει τιμές σύμφωνα με τον τύπο $CW=2^n-1$ όπου η ο αριθμός των αναμεταδόσεων με $CW \in [CW_{min} , CW_{max}]$. Αρχικά όταν χρησιμοποιείται η διαδικασία εκθετικής υποχώρησης η μεταβλητή CW παίρνει την ελάχιστη τιμή της CW_{min} . Κάθε φορά που θα γίνεται μία αποτυχημένη προσπάθεια εκπομπής η τιμή της CW θα αυξάνεται στην επόμενη τιμή τείνοντας να πάρει την

μέγιστη της τιμή μετά από το όριο του κατωφλίου των αποτυχημένων προσπαθειών στην οποία θα παραμείνει έως ότου ξαναρχίσει η διαδικασία back off. Η CW θα ξαναπάρει την ελάχιστη τιμή της CW_{min} μετά από μία επιτυχημένη προσπάθεια αποστολής πακέτου ή μετά από το κατώφλι του ορίου αποτυχημένων προσπαθειών εκπομπής. Η CW διαφέρει στο εύρος των τιμών της αναλόγως του συστήματος μετάδοσης.



Σχήμα 4. 49: Διάγραμμα Αύξησης του CW

Το παραπάνω σύστημα δουλεύει αρκετά γρήγορα σε δίκτυα με μικρό αριθμό τερματικών, όμως σε δίκτυα με περισσότερα τερματικά το πρωτόκολλο αναγκάζει τα τερματικά να αναμένουν αρκετό χρόνο για να αποφευχθεί η πιθανότητα συγκρούσεων και γι' αυτό τον λόγο αποφεύγεται η χρήση του πρωτοκόλλου CSMA/CA για εφαρμογές που απαιτούν μετάδοση σε πραγματικό χρόνο.

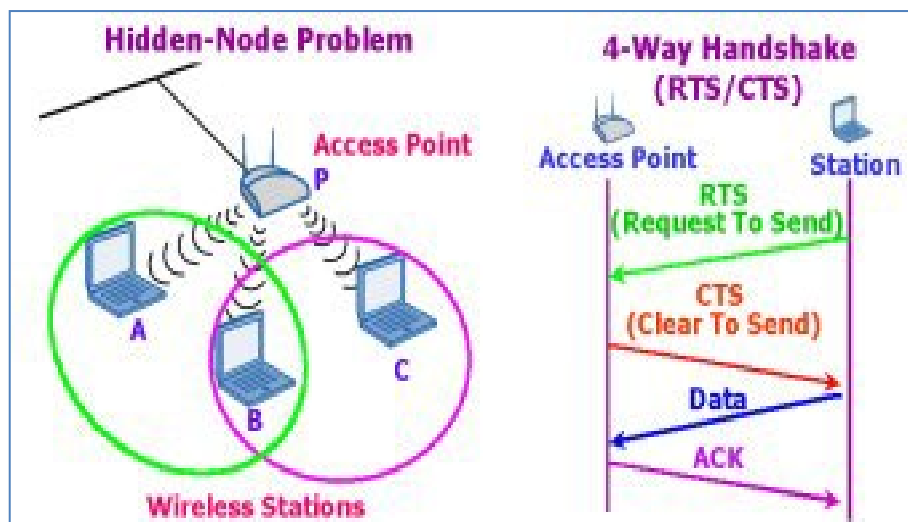


Σχήμα 4. 50: CW αναλόγως του συστήματος μετάδοσης

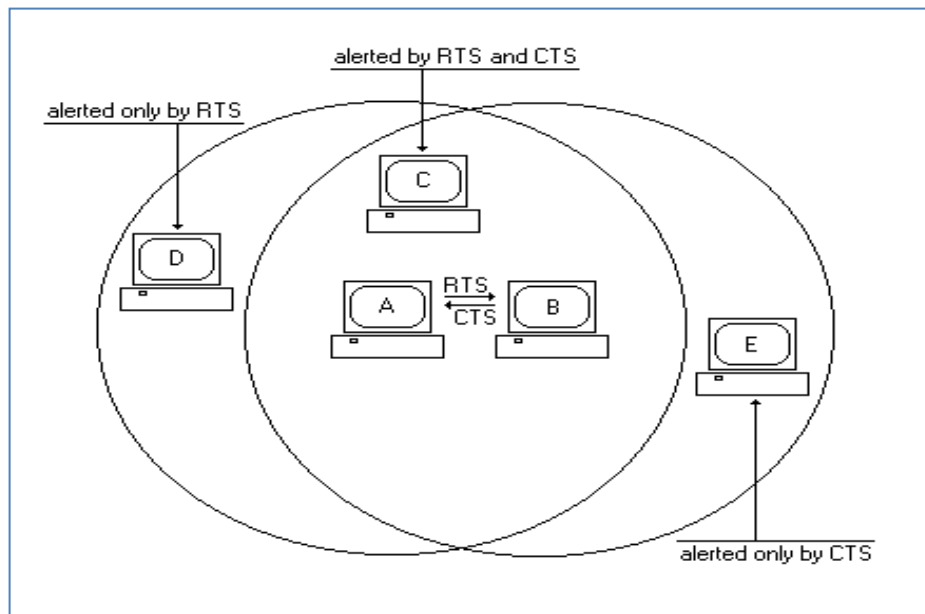
➤ **ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ**

Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει την κατάληψη ή όχι του μέσου από ένα άλλο τερματικό μέσω ενός συστήματος διανομής πληροφοριών προς όλα τα τερματικά τα οποία «ακούν» το σταθμό τον οποίο τα εκπέμπει. Αυτό το σύστημα επιτελείται μέσω πλαισίων «**αίτησης κατάληψης και αποδοχής αποστολής**» **RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send)**. Με αυτόν τον τρόπο ενημερώνονται όλα τα τερματικά για το ότι ο σταθμός αποστολέας και ο σταθμός παραλήπτης θα είναι κατειλημμένοι για όσο χρόνο αναφέρεται στα πλαίσια **RTS και CTS** στο πεδίο **(2) διάρκεια-Duration**. Αφού ένα τερματικό καταλάβει το μέσο με την διαδικασία της εκθετικής αναβολής κι αφού περιμένει επιπλέον για χρόνο DIFS, αντί να στείλει αμέσως το πακέτο του, στέλνει πρώτα τον παραλήπτη ένα πακέτο RTS. Το τερματικό παραλήπτης αφού λάβει το RTS αναμένει επιπλέον για χρόνο SIFS και απαντάει με ένα πακέτο CTS. Όταν ο δυνητικός αποστολέας λάβει το πακέτο CTS θα αναμένει και αυτός για τον μικρότερο προβλεπόμενο χρόνο αναμονής SIFS(Short Inter Frame Space-όχι μεγαλύτερο για να αποφευχθεί η αποστολή κάποιου άλλου πακέτου) και θα αποστείλει το πλαίσιο του. Στην περίπτωση που όμως δεν παραλάβει πλαίσιο επιβεβαίωσης αποστολής CTS θα χρειαστεί να ανακαταλάβει το μέσο υποχωρώντας εκθετικά για **Back off time= Random() · Time Slot** αυξάνοντας την τιμή του CW στην επόμενη τιμή της (μετά από μία ανεπιτυχή αποστολή) και να ξαναστείλει RTS.

Η πληροφορία για τον χρόνο κατάληψης του μέσου αφού «αναγνωσθεί» από όλα τα τερματικά καταχωρείται **στο Διάγραμμα Εκχώρησης Δικτύου(NAV)** και με αυτόν τον τρόπο ένα τερματικό γνωρίζει για πόσο χρόνο θα σταματήσει την αντίστροφη μέτρηση του χρόνου εκθετικής υποχώρησης(back off time). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του μηχανισμού είναι ότι με την από κοινού αποστολή μέσω των πακέτων RTS/CTS της διάρκειας κατάληψης του μέσου και από τους δύο κόμβους, ενημερώνονται και οι κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται εκτός εμβέλειας από έναν από δύο κόμβους. Έτσι αποφεύγονται οι συγκρούσεις κατά την αποστολή των πλαισίων RTS/CTS καθώς επίσης μειώνεται το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού (Hidden Station Problem).



Σχήμα 4. 51: Διαδικασία χειραψίας "handshake"



Σχήμα 4. 52: Το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού

Τέλος υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες ο μηχανισμός RTS/CTS δεν χρησιμοποιείται ή μπορεί να το απενεργοποιηθεί εντελώς, ή τουλάχιστον να μην χρησιμοποιείται για μικρές μεταδόσεις, λόγω της αύξησης του σχετικού όγκου των δεδομένων τα οποία μπορούν να αποσταλούν χωρίς την χρήση της χειραψίας RTS/CTS η οποία αυξάνει σημαντικά το κατώφλι όγκου δεδομένων για πολύ μικρά πακέτα, βελτιώνοντας έτσι την ταχύτητα μετάδοσης. Τα πλαίσια αυτά έχουν συνήθως μήκος 20-14 byte και η χρήση ή όχι του μηχανισμού RTS/CTS ενεργοποιείται από την μεταβλητή **RTS Threshold** όταν το μέγεθος του πακέτου υπερβεί την τιμή που εκχωρείται εξ αρχής σε αυτή την μεταβλητή. Η τιμή της κυμαίνεται από 0 έως 2347 και συνήθως τοποθετείται στα 2346 (πάνω από 1518 που σημαίνει ότι δεν θα χρησιμοποιηθεί σε άλλα πρωτόκολλα όπως το Ethernet από συσκευές οι οποίες υποστηρίζουν και τους δύο τύπους δικτύων) και πρακτικά σημαίνει ότι εάν ένα πακέτο δεν υπερβαίνει τα 2346 byte σε μέγεθος δεν θα χρησιμοποιηθεί ο μηχανισμός εικονικής ανίχνευσης RTS/CTS. Μία ακόμη περίπτωση απενεργοποίησης του μηχανισμού χειραψίας RTS/CTS είναι αυτή του multicasting λόγω του μεγάλου αριθμού των πλαισίων RTS/CTS για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των πακέτων και την αποσυμφόρηση του δικτύου.

4.3 MAC ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ FANET

Το ενδιαφέρον για την επίτευξη επικοινωνίας από μεγάλες αποστάσεις στα δίκτυα FANET έχει οδηγήσει στην χρήση κατευθυντικών κεραιών (μαζί με πολυκατευθυντικές) η χρήση των οποίων οδήγησε στην παραμετροποίηση του προτύπου 802.11 καθώς και του μηχανισμού φυσικής ανίχνευσης ώστε να επιτευχθεί αύξηση της απόδοσης μέσω της μείωσης των αναπηδήσεων, της καθυστέρησης και των σφαλμάτων. Από την άλλη πλευρά η χρήση τέτοιων προτύπων σε τόσο δυναμικά

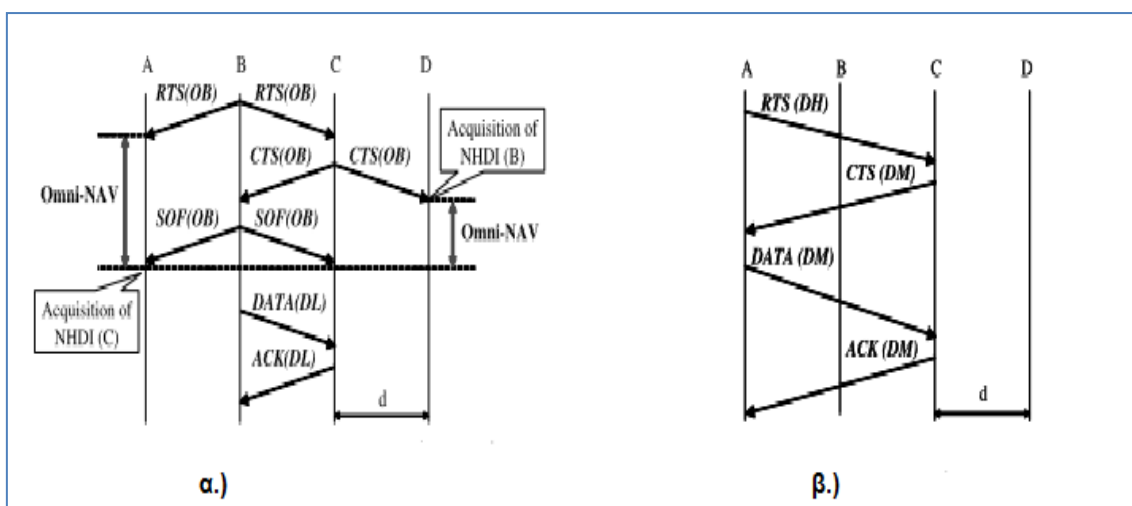
μεταβαλλόμενα δίκτυα απαιτεί την λεπτομερή σχεδίαση προτύπων τα οποία θα ανταπεξέρχονται σε τέτοιες μεταβαλλόμενες καταστάσεις όπου οι τρεις κρίσιμοι παράμετροι όσον αφορά την μεταβολή της θέσεως ως προς τους τρεις άξονες (pitch, roll and yaw) υποβαθμίζουν την ποιότητα ζεύξης και επιβάλουν περιορισμούς στην δικτύωση. Ως εκ τούτου ένα αποτελεσματικό MAC πρότυπο θα πρέπει να ελέγχει τις παραπάνω μεταβολές προσαρμόζοντας την έξυπνη κεραία (switched beam, phased array, directional) του προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Τα διάφορα πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιούν κατευθυντικές κεραίες έχουν ως αντικείμενο την παραμετροποίηση του μηχανισμού πρόσβασης στο μέσο και αναλύονται συνοπτικά όπως παρακάτω:

➤ Στο [64] και [81] παρουσιάζεται το πρότυπο NULLHOC το οποίο ενσωματώνει το φυσικό και το MAC επίπεδο σύμφωνα με τις πληροφορίες που λαμβάνει από τις συστοιχίες κατευθυντικών κεραιών και είναι σχεδιασμένο για επικοινωνία MIMO (Multiple Input Multiple Output) και χρησιμοποιεί πληροφορίες του μέσου για εξοικονόμηση ενέργειας και για την επαναχρησιμοποίηση του καναλιού μέσω τερματισμού των υπαρχόντων συνεδριών (sessions). Κάθε κόμβος για να στείλει προς ένα αποδέκτη υπολογίζει το διάνυσμα βάρους με σκοπό να εκμηδενίσει τις παρεμβαλλόμενες γειτονικές μεταδόσεις στο φάσμα και να αποκτήσει μοναδιαίο κέρδος ως προς τον αποδέκτη. Ο NULLHOC διαχωρίζει το διαθέσιμο φάσμα για το κάθε κόμβο σε δύο κανάλια χρησιμοποιώντας CDMA. Το DC (Data Channel) και το CC (Control Channel) τα οποία δίνουν την δυνατότητα εντοπισμού άλλων γειτονικών ζεύξεων οι οποίες τείνουν να παρεμβάλουν την μεταφορά δεδομένων στο DC. Τα μηνύματα ελέγχου RTS (Ready to send), CTS (Clear to Send), ACK (Acknowledgement), NACK (No Acknowledgement) και DS (Data Send) αποστέλλονται μέσω του CC χρησιμοποιώντας στην αρχή πολυκατευθυντική κεραία ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιείται η κατευθυντική.

➤ Στο [65] παρουσιάζεται ένα μοντέλο διαχωρισμού του φάσματος ανά ράδιο ζεύξη ώστε να επιτευχθεί ταυτόχρονη επικοινωνία μεταξύ πολλών χρηστών μέσω προσαρμοσμένης εκμηδένισης των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών εκπομπών ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου. Η διαφοροποίηση ως προς το MAC επίπεδο περιλαμβάνει αφενός την διαδραστική αλληλεπίδραση μεταξύ του φυσικού και του επιπέδου ζεύξης δεδομένων και αφετέρου την διαφοροποίηση του MAC επιπέδου έτσι ώστε να είναι δυνατή η ακρόαση του τομέα ώστε να καταστεί δυνατή η εκπομπή μέσω της χωρικής επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας. Η λειτουργία του περιλαμβάνει την χρήση παγκατευθυντικής ανταλλαγής πακέτων ελέγχου RTS και CTS με εμπεριεχόμενες τις πληροφορίες του δείκτη CSI (channel state information) και κατευθυντικών κεραιών για την αποστολή των δεδομένων και του πακέτου ελέγχου ACK. Ο δείκτης CSI χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κατάστασης του καναλιού και για την εύρεση του ζεύγους της βέλτιστης χωρικής χρησιμοποίησης της συχνότητας του πομπού με το δέκτη. Ακόμη χρειάζεται τροποποίηση του διανύσματος εκχώρησης δικτύου (NAV) για τα πακέτα που αποστέλλονται με πολυκατευθυντική κεραία ώστε να είναι δυνατή η φυσική και εικονική ακρόαση του μέσου από τους κόμβους που επιθυμούν να μεταδώσουν, με αναμονή χρονικού διαστήματος sifs+CTS όταν ακροαστούν ένα RTS πριν αποστείλουν ένα πακέτο ελέγχου, ώστε να επιτυγχάνεται ταχύτερη πρόσβαση στο δίκτυο.

➤ Στο [66] ομοίως υιοθετείται η τροποποίηση του NAV σε DNAV και η λειτουργία του 802.11 ως εξής: Η ακρόαση του μέσου γίνεται μέσω παγκατευθυντικής κεραίας λαμβάνοντας τα μηνύματα ελέγχου RTS και στρέφοντας στη συνέχεια στην κατευθυντική κεραία προς την κατεύθυνση στην οποία λαμβάνεται από το πεδίο 2 του πλαισίου RTS. Εάν το μέσο είναι ακροαστεί κενό τότε οι κόμβοι ελέγχουν την τιμή του DNAV[70] για την κατάληψη του μέσου. Ο δέκτης τηρεί στοιχεία DoA (Direction of Arrival) με τους κόμβους αποστολείς στον πίνακα DNAV TABLE ώστε να είναι δυνατή η κατάληψη του μέσου με ταυτόχρονη εκπομπή από την κατευθυντική κεραία στην κατεύθυνση του πομπού.

➤ Στο [67] προτείνεται η χρήση του πρωτοκόλλου SWAMP (Smart Antennas Based Wider-range Access MAC Protocol) όπου η πρόσβαση γίνεται με δύο μεθόδους πρόσβασης α.) την OC (Omnidirectional transmission range Communication Mode) και β.) την EC (Extended transmission range Communication mode). Η λειτουργία των δύο μεθόδων συνοψίζεται στο Σχήμα 4.13 .



Σχήμα 4. 53: Το πρωτόκολλο SWAMP α.) Πρόσβαση με την OC

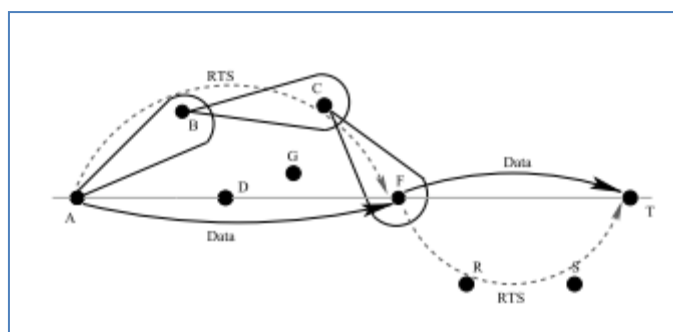
β.) Πρόσβαση με την EC

Η διαδικασία που ακολουθείται για την OC ξεκινά με την αποστολή RTS πακέτου από ένα κόμβο ο οποίος δεν γνωρίζει τα στοιχεία θέσης του παραλήπτη και βρίσκεται εντός της ζώνης απόκρισης της παγκατευθυντικής κεραίας. Με την διαδικασία «χειραψίας» γίνεται προσπάθεια κατάληψης του μέσου από τον κόμβο. Εάν βρεθεί κατειλημμένο τότε ενημερώνει το NAV και υποχωρεί εκθετικά σύμφωνα με τον αλγόριθμο οπισθοχώρησης. Ταυτόχρονα ενημερώνει και τον πίνακα NHDl (Next Hop Direction Information) ο οποίος περιλαμβάνει την διευθυνσιοδότηση όλων των γειτονικών κόμβων που βρίσκονται εντός εμβέλειας στην OC λειτουργία. Στη συνέχεια τα δεδομένα και η επιβεβαίωση ACK αποστέλλονται μέσω σύνδεσης από την κατευθυντική κεραία.

Όσον αφορά την EC λειτουργία, αυτή χρησιμοποιείται όταν ο κόμβος αποδέκτης βρίσκεται καταχωρημένος ήδη εντός του πίνακα NHDl οπότε τόσο τα πλαίσια ελέγχου όσο και τα δεδομένα με την επιβεβαίωση αποστέλλονται μέσω κατευθυντικής κεραίας.

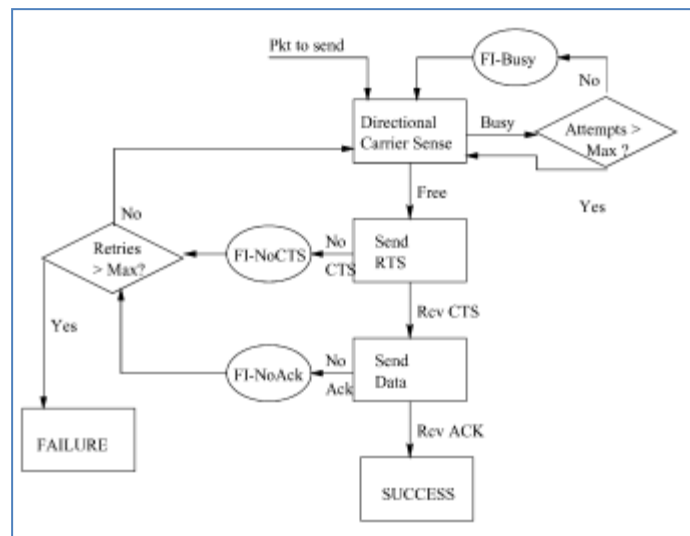
➤ Στο [68] προτείνεται η χρήση η χρήση ενός MAC πρωτοκόλλου το οποίο χρησιμοποιεί 4 κεραίες μεταβλητής δέσμης (switched beam) και επιτυγχάνει τετραπλάσια απόδοση από την χρήση παγκατευθυντικής κεραίας. Το κλειδί για την λειτουργία του αποτελεί η χρήση ενός μηχανισμού ο οποίος καθορίζει την διευθυνσιοδότηση των κόμβων σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Στο [69] προτείνεται το πρωτόκολλο ROMA (Receiver Oriented Multiple Access) το οποίο υλοποιείται με τη χρήση παγκατευθυντικής μεταβαλλόμενης δέσμης (multi beam) κεραίας και κάθε κόμβος στο δίκτυο διαθέτει ένα μοναδικό ID αριθμό. Επίσης χρησιμοποιεί ένα πίνακα διευθυνσιοδότησης $G=(V,E)$ μαζί με στοιχεία γωνιακής συσχέτισης μεταξύ των κόμβων, οποίος διαρκώς ενημερώνεται, όπου V το σύνολο των κόμβων και E το σύνολο των κόμβων οι οποίοι διατηρούν ικανότητα αποστολής μέσω κατευθυντικής κεραίας.

➤ Στο πρωτόκολλο MMAC (Multihop MAC)[71] χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός πολλαπλών αναπηδήσεων μαζί με τον το «κατευθυντικό διάνυσμα εκχώρησης δικτύου» DNAV(Directional Network Allocation Vector)[72], διαμορφώνοντας το βασικό μηχανισμό DMAC (Directional Medium Access Control) που προαναφέραμε, για την εγκαθίδρυση ζεύξης μεταξύ μεμακρυσμένων κόμβων. Σε αυτό το πρωτόκολλο ο κάθε κόμβος στέλνει πακέτα μόνο στους γειτονικούς κόμβους χρησιμοποιώντας και τα δύο είδη κεραίων (πολυκατευθυντικές και κατευθυντικές). Η φιλοσοφία αυτού του πρωτοκόλλου βασίζεται στην εκπομπή RTS μέσω παγκατευθυντικής κεραίας με διαδοχικές επανεκπομπές έως ότου το πακέτο φτάσει στον τελικό του προορισμό και χρησιμοποιώντας ένα διάνυσμα στο οποίο εκχωρείται η διαδρομή για την οποία προορίζεται το πακέτο. Έτσι ο πομπός διατηρεί δύο διανύσματα: το T_B όπου συμβολίζεται η πιο μεμακρυσμένη δυνατότητα αποστολής του κόμβου με τη χρήση κατευθυντικής κεραίας και T_F η δυνατότητα επικοινωνίας του πομπού με τον πιο μεμακρυσμένο κόμβο χρησιμοποιώντας παγκατευθυντική κεραία με διαδοχικές αναπηδήσεις. Σε κάθε αναπήδηση ο εκάστοτε κόμβος τηρεί τα δύο προφίλ αποστολής πακέτων ξεχωριστά τόσο για την παγκατευθυντική όσο και για την κατευθυντική μέθοδο αποστολής. Με την παραπάνω διαδικασία δεσμεύεται το κανάλι διαμέσου των κόμβων για την αποστολή πακέτων RTS, ώστε στη συνέχεια να αποσταλούν τα δεδομένα από τον κόμβο A στον κόμβο F μέσω κατευθυντικής κεραίας με τον τελευταίο να είναι δυνατόν να λάβει δεδομένα με αυτό τον τρόπο. Τα στοιχεία για την κατευθυντική σκόπευση του F προς τον A λαμβάνονται μέσω του RTS_A (Σχήμα 4.14).



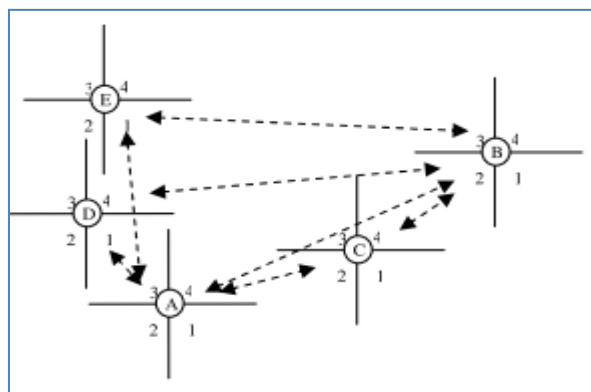
Σχήμα 4. 54: Μηχανισμός MMAC

Στο [73] επίσης χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός εικονικής και φυσικής ανίχνευσης φέροντος χρησιμοποιώντας είτε παγκατευθυντική είτε κατευθυντική κεραία χρησιμοποιώντας τρεις μεθόδους αποστολής και λήψης: α.) N-BF (χωρίς κατευθυντική κεραία), β.) T-BF (με χρήση κατευθυντικής μόνο για την μετάδοση) και γ.) TR-BF (με χρήση κατευθυντικής κεραίας τόσο κατά την μετάδοση όσο και κατά την ανταλλαγή πακέτων ελέγχου RTS-CTS. Σε αυτό το πρότυπο λαμβάνει χώρα εξερεύνηση των γειτονικών κόμβων μέσω παγκατευθυντικής αποστολής όπως και στο [71]. Η κατάσταση του μέσου διαχωρίζεται σε τρεις φάσεις: α.) ανενεργή λόγω αδράνειας, β.) ανενεργή λόγω κατάληψης και γ.) κατειλημμένη. Ο μηχανισμός λειτουργίας του πρωτοκόλλου MAC παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω (Σχήμα 4.15).



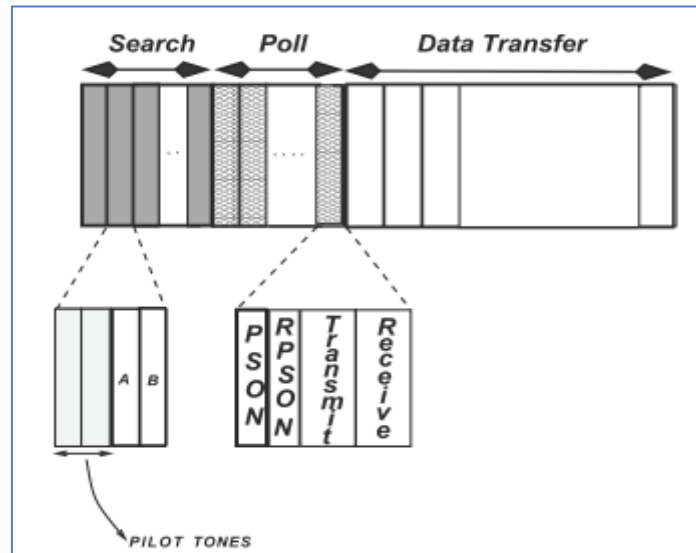
Σχήμα 4. 55: Μηχανισμός φυσικής και εικονικής ανίχνευσης φέροντος

➤ Παρά τη βελτίωση που επιτυγχάνεται από τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν κατευθυντική κεραία, η μεγάλη δυναμικότητα στην αλλαγή τοπολογίας που παρατηρείται στα δίκτυα FANET δημιούργησε την ανάγκη παραμετροποίησης του μηχανισμού ενημέρωσης του πίνακα διευθυνσιοδότησης κατά την κατευθυντική δημιουργία του διανύσματος εκχώρησης δικτύου D-NAV μέσω ενός μηχανισμού κυκλικής αποστολής RTS μηνυμάτων [74] (Σχήμα 4.16).



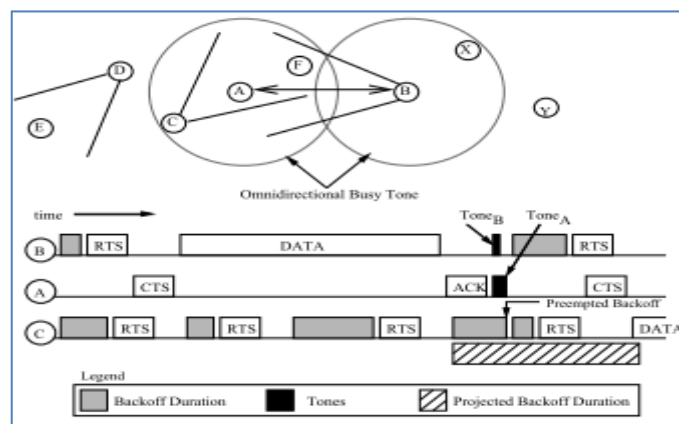
Σχήμα 4. 56: Μηχανισμός κυκλικής αποστολής RTS

Στο [75] το πρόβλημα της γειτονικής ανακάλυψης των κόμβων επιλύεται μέσω παρόμοιου μηχανισμού ο οποίος ονομάζεται (Polling based MAC) όπου χρησιμοποιούνται περιοδικές εκπομπές πακέτων αναζήτησης κόμβων οι οποίες εμπεριέχουν τη θέση του κόμβου χωρίς να μεταφέρουν δεδομένα. Ο κόμβος μπορεί να περιέρχεται σε τρεις καταστάσεις: α.) κατάσταση αναζήτησης γειτονικών κόμβων, β.) κατάσταση αποστολής με πακέτα «roll» της θέσεως του στο ήδη γνωστούς γειτονικούς κόμβους και γ.) κατάσταση μεταφοράς δεδομένων.



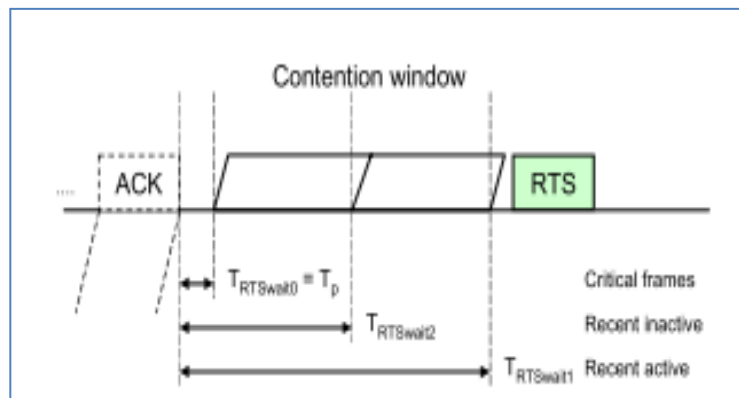
Σχήμα 4. 57: Polling Based MAC

➤ Στο [76] και [79] προτείνεται ένα πρωτόκολλο το οποίο επιλύει το πρόβλημα της «κώφωσης» (deafness) των κόμβων μέσω του συντονισμού «toned» τους με ημιτονοειδή σήματα τα οποία δεν μεταφέρουν δεδομένα και δεν χρειάζονται διαμόρφωση. Το κανάλι διαχωρίζεται σε δύο υποφορείς εκ των οποίων ο ένας μεταφέρει δεδομένα και ο άλλος πακέτα συντονισμού τα οποία αποστέλλονται από τον κόμβο ο οποίος είναι απασχολημένος, μετά τη λήψη DATA ACK, προς ενημέρωση των υπολοίπων και για την αποφυγή συγκρούσεων οι οποίες προκαλούν καθυστερήσεις στη μετάδοση. Ο κάθε κόμβος διαθέτει αναγνωριστικό κώδικα για την αναγνώριση του στο δίκτυο.



Σχήμα: 4. 58: Toned Based MAC

➤ Στο [80] παρουσιάζεται το πρωτόκολλο RACSS (Receiver Initiated Access Control with Sender Scheduling) το οποίο λόγω της σχεδίασης του, η οποία δίνει στους αποδέκτες την δυνατότητα να αποφασίσουν ποιος κόμβος θα εκπέμπει και για πόσο χρόνο, ταιριάζει περισσότερο για χρήση σε συστήματα Micro MEA. Λόγω των περιορισμών οι οποίοι τίθενται από το μέγεθος των MUAV χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό δυαδικής εκθετικής υποχώρησης (BEB- Binary Exponential Back Off) ο οποίος χρησιμοποιεί τα μικρού μεγέθους πακέτα RTS και RTR για την ανταλλαγή χειραψίας μεταξύ των κόμβων. Χρησιμοποιώντας μία τεχνική διαφοροποίησης του μεγέθους των πακέτων ελέγχου που ανταλλάσσονται εκχωρεί το μέσο στο χρήστη αναλόγως της κρισιμότητας. Η αναμονή εκπομπής (propagation delay T_p) παίρνει τιμές σε wait slots (T_w) που η μονάδα μέτρησης του είναι τα 10ms. Άρα $T_{RTS\ wait} = U(0, rtsWaitSlots) \times T_{slot}$. Εάν δεν καταστεί δυνατή η αποστολή εντός του παραπάνω χρόνου τότε αυτός μειώνεται κατά $\frac{1}{2}$, δίνοντας έτσι στους κόμβους οι οποίοι αναμένουν περισσότερο χρόνο γρηγορότερη ευκαιρία κατάληψης του μέσου.



Σχήμα 4. 59: Το πρωτόκολλο RACSS

➤ Τέλος στο [61] και [82] παρουσιάζεται το πρωτόκολλο AMAC_UAV (Adaptive MAC Protocol for UAV Node) στο οποίο γίνονται οι κάτωθι παραδοχές:

- Κάθε MEA διαθέτει τέσσερις κεραίες (δύο πολυκατευθυντικές και δύο κατευθυντικές) οι οποίες είναι σε συμπληρωματική διάταξη ως προς τους τομείς τους, έχοντας την δυνατότητα εκπομπής σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Κατά την διάρκεια της αδράνειας του κόμβου το MEA ακροάται μέσω της παγκτευθυντικής κεραίας ενώ όταν επιθυμεί να εκπέμψει πακέτα μπορεί να χρησιμοποιήσει και τις δύο, ανάλογα με την διαθεσιμότητα στην διευθυνσιοδότηση του κόμβου προορισμού η οποία επιτυγχάνεται μέσω της περιοδικής ενημέρωσης της θέσεως του κόμβου, ανά 1'' με μήνυμα χτύπου (heart beat) , σε ένα πίνακα με την λήψη πακέτων ελέγχου από τους κόμβους οι οποίοι είχαν συνεργαστεί με το MEA κατά την διάρκεια μίας εκπομπής και βρίσκονται εντός του εύρους απολαβής της κατευθυντικής κεραίας. Με την λήψη των παραπάνω πακέτων υπολογίζεται εκ νέου η γωνιακή διαφορά και η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη.

- Για να είναι δυνατή η εκπομπή με κατευθυντική κεραία, πρέπει ο κάθε κόμβος να έχει υπολογίσει το ποσοστό λάθους εκπομπής καθώς και να μετρά

αντίστροφα ώστε οι προσπάθειες επανεκπομπής πακέτων να είναι εντός του κατωφλίου επανεκπομπής (επτά για το κοινό 802.11). Διαφορετικά θα πρέπει να εκπέσει σε λειτουργία παγκατευθυντικής ακρόασης. Στο AMAC_UAV το κατώφλι των επανεκπομπών είναι πέντε.

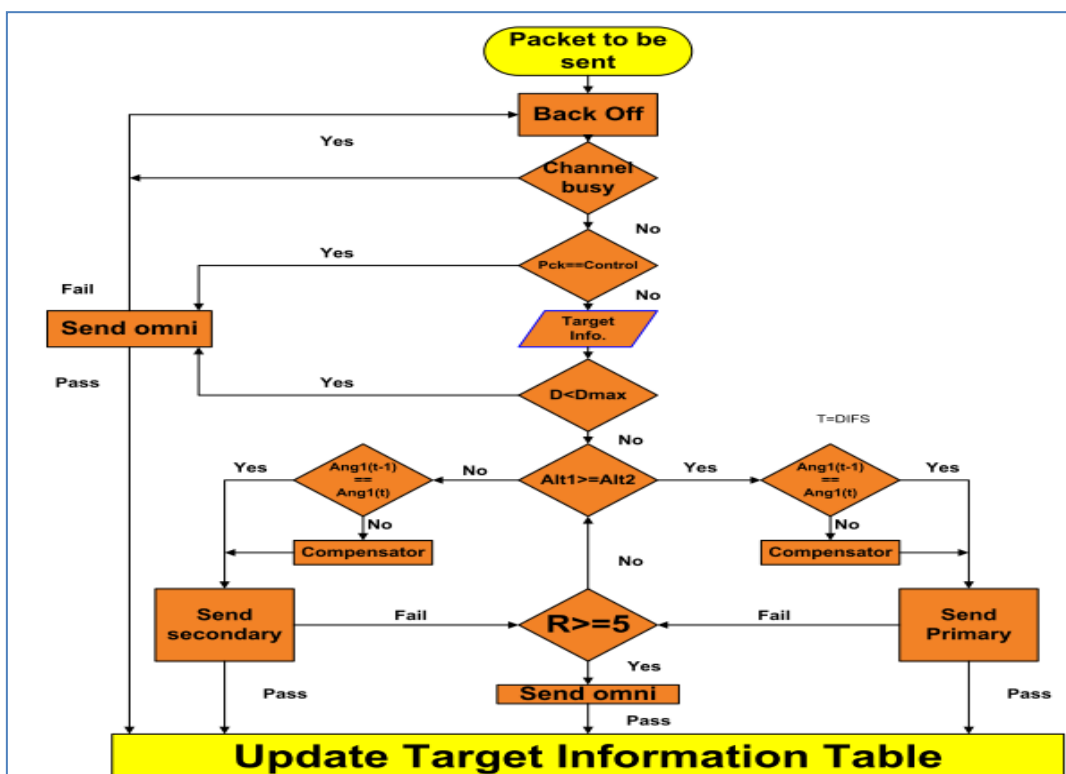
- Για να γίνει αλλαγή της χρήσης από το ένα είδος κεραίας στο άλλο ο απαιτούμενος χρόνος είναι μηδαμινός.
- Η κινητικότητα μεταξύ των κόμβων είναι τυχαία στους τρεις άξονες x,y,z (pitch, roll, yaw).

Σε αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιείται το DNAV το οποίο ενημερώνει τον πίνακα πληροφοριών στόχου (target information table-TIT, Σχήμα 4.20) βασισμένο στον μηχανισμό DCF (Distributed Coordination Function) και τους μηχανισμούς φυσικής και εικονικής ανίχνευσης φέροντος.

Target Information Table

Target ID	Latitude (Deg Min Sec)	Longitude (Deg Min Sec)	Altitude (Feet)	Direction (Deg)
1	43 16 32 N	85 38 46 W	500	90
2	43 16 32 N	85 38 36 W	450	90

Σχήμα 4. 60: Target Information Table



Σχήμα 4. 61: Μηχανισμός DCF στο πρωτόκολλο AMAC_UAV

Εφόσον ένας κόμβος επιθυμεί να εκπέμψει και έχει καταλάβει το μέσο θα αντλήσει στοιχεία από τον TIT ώστε να υπολογίσει εάν η απόσταση μέχρι τον

δέκτη είναι τέτοια ώστε να χρησιμοποιήσει είτε την πολυκατευθυντική είτε την κατευθυντική κεραία (κύριου ή συμπληρωματικού τομέα) ανάλογα με την απόσταση και την γωνία κάλυψης. Αφού γίνει η ανταλλαγή των πακέτων το πακέτο ACK θα αποσταλεί από τον δέκτη μέσω παγκατευθυντικής κεραίας (Σχήμα 4.21).

4.4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ FANET

Ένα από τα κύρια θέματα που επιζητούν επίλυση στα δίκτυα FANET, αποτελεί η δρομολόγηση των πακέτων η οποία γίνεται ακόμη πιο περίπλοκη όταν οι κόμβοι στους οποίους πρέπει να δρομολογηθεί το πακέτο είναι εκτός εμβέλειας. Η ευθύνη του επιπέδου δικτύου είναι να διαμοιράσει τα δεδομένα σε μικρά πακέτα και στη συνέχεια να προσθέσει τη διεύθυνση προορισμού καθορίζοντας παράλληλα και το δρομολόγιο που θα ακολουθηθεί για να φτάσουν τα πακέτα στον προορισμό τους μέσα από την ανάλυση του δικτύου (πίνακες δρομολόγησης), το οποίο διαφέρει από πρωτόκολλο σε πρωτόκολλο επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του MAC επιπέδου[61]. Για να καθορίσουμε τη συμπεριφορά των πρωτοκόλλων δρομολόγησης θα καθορίσουμε αρχικά τα είδη της συμπεριφοράς των αλγορίθμων διαχωρίζοντάς τους όπως παρακάτω:

4.4.1 ΕΙΔΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

- **Πρωτόκολλα κατάστασης σύνδεσης (Link State Protocols):**

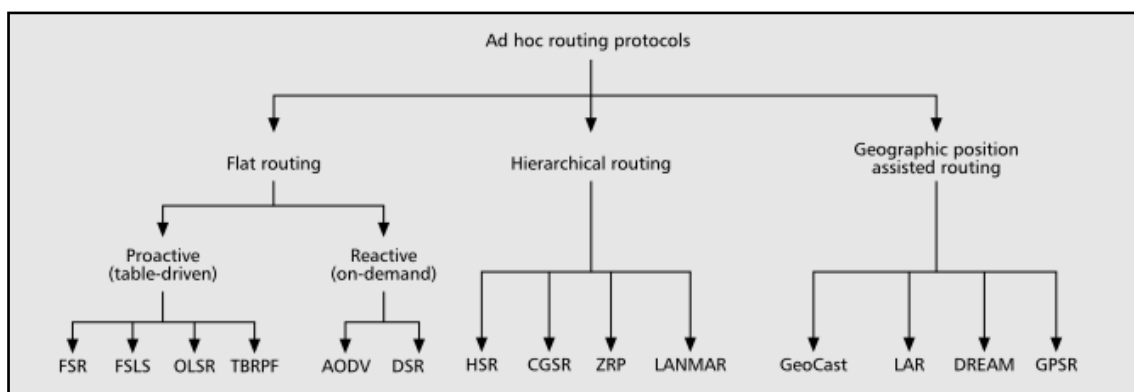
Ο κάθε κόμβος έχει συνολική αντίληψη της τοπολογίας του δικτύου[83] χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση κόστους- μονοπατιού και διαδοχής (blind search) [88] σχηματίζοντας δέντρα δυαδικής αναζήτησης. Οι πληροφορίες ανανεώνονται περιοδικά από όλους τους κόμβους προς τους γειτονικούς μέχρι η πληροφορία να φτάσει σε όλο το δίκτυο.

- **Πρωτόκολλα διανύσματος απόστασης (Distance Vector Protocols):** Σε αυτά τα πρωτόκολλα ο κάθε κόμβος υπολογίζει μέσω μίας ευρετικής συνάρτησης[89] το κόστος για κάθε σύνδεση με τον επόμενο κόμβο και εκπέμπει περιοδικά μία εκτίμηση για τον συντομότερο δρόμο προς κάθε κόμβο του δικτύου. Τα τερματικά που λαμβάνουν αυτές τις πληροφορίες τις χρησιμοποιούν για να επαναπροσδιορίσουν τους πίνακες δρομολόγησης τους. Πλεονέκτημα αυτού του είδους πρωτοκόλλων αποτελεί η ανάγκης μικρότερης υπολογιστικής ισχύος και μικρότερη μνήμη αλλά δύναται να δημιουργηθεί ατέρμων βρόγχος ο οποίος θα εγκλωβίζει τα πακέτα μέσα σε αυτόν.

- **Πρωτόκολλα πληροφορίας από την πηγή (Source routing):**

Σε αυτό το είδος αλγορίθμων δρομολόγησης το πακέτο φέρει την πληροφορία της διαδρομής που θα ακολουθήσει εκ των προτέρων καθοριζόμενη από τον αρχικό κόμβο. Με αυτό τον τρόπο αποτύπωσης του ίχνους αποφεύγονται οι βρόγχοι κατά την δρομολόγηση.

Τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα ad-hoc δίκτυα περιλαμβάνονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι α.) Επίπεδης δρομολόγησης (Flat routing), β.) Ιεραρχικά και γ.) Γεωγραφικά υποβοηθούμενα (Σχήμα 4.22).



Σχήμα 4. 62: Πρωτόκολλα δρομολόγησης για ad-hoc δίκτυα

4.4.2 ΕΙΔΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (FLAT ROUTING)

Σε αυτή την κατηγορία υπάρχουν δύο ειδών πρωτόκολλα δρομολόγησης: τα αντιδραστικά (reactive) και τα προ-δραστικά (proactive-table driven). Τα proactive πρωτόκολλα κάνουν συνεχείς εκτιμήσεις για τις διαδρομές μέσα στο δίκτυο ώστε όταν ένα πακέτο χρειαστεί να δρομολογηθεί προς τον προορισμό του να έχει ήδη γνωστή διαδρομή, ενώ τα reactive (on demand) προσπαθούν να βρουν τη βέλτιστη διαδρομή προς τον προορισμό όταν εμφανιστεί δραστηριότητα μεταξύ τους. Χαρακτηριστικό αυτών των πρωτοκόλλων είναι ότι δρομολογούν το πακέτο με την ελάχιστη καθυστέρηση αλλά χρειάζονται χρόνο για την ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης και των ευρετικών συναρτήσεων. Τα κυριότερα προ-δραστικά πρωτόκολλα για τα FANET παρουσιάζονται παρακάτω:

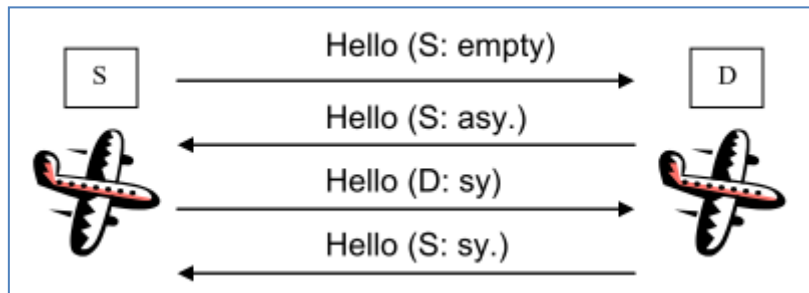
- **Fisheye State Routing (FSR) [86-87]:** Αποτελεί πρωτόκολλα κατάστασης σύνδεσης (link state) στο οποίο διατηρείται ένας γράφος δρομολόγησης σε κάθε κόμβο ο οποίος ανανεώνεται μέσω της διάδοσης μηνυμάτων ελέγχου. Αρχικά η πληροφορία για την δρομολόγηση των πακέτων διαδίδονται μόνο σε γειτονικούς κόμβους και στη συνέχεια περιοδικά οι πληροφορίες ανανεώνονται ανεξάρτητα από τις μεταβολές και τα γεγονότα τα οποία λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο πχ. αίτηση αποστολής. Επίσης η περιοδική διάδοση βελτιστοποιείται χρησιμοποιώντας χαμηλότερες συχνότητες για τους πιο μακρισμένους κόμβους. Ο FSR επιτυγχάνει την βέλτιστη διαδρομή για τους γειτονικούς κόμβους αλλά δεν είναι πλήρης για τους πιο απομακρυσμένους (δεν εγγυάται ότι θα βρει λύση).

- **Fuzzy Sighted Link State (FSLS) [87]:** Αποτελεί παρόμοιο πρωτόκολλο με το FSR με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί ένα αλγόριθμο βελτιστοποίησης, τον HSLS (Hazy Sighted Link State) ο οποίος στέλνει ενημερώσεις κατάστασης (Link State Updates- LSU). Και οι δύο αλγόριθμοι περιορίζουν την διάδοση της πληροφορίας ως προς την έκταση του χώρου και χρονικά ως προς την

περιοδικότητα.

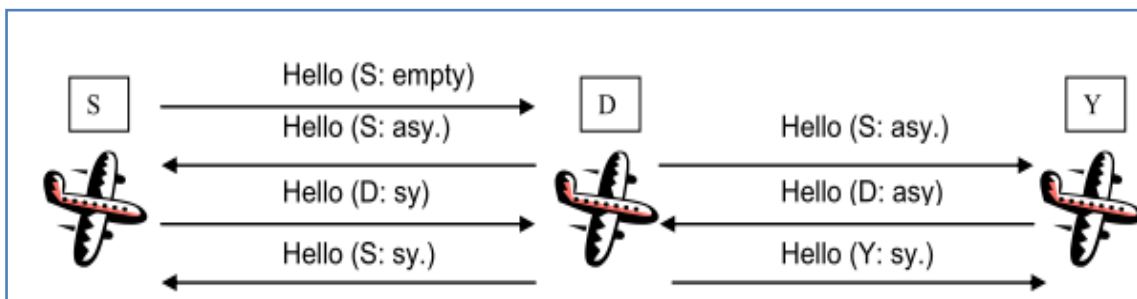
- **Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) [86-90]:**

Αποτελεί πρωτόκολλο κατάστασης σύνδεσης το οποίο αποστέλλει περιοδικά πληροφορίες, μέσω HELLO μηνυμάτων, με τη χρήση παγκατευθυντικής κεραίας, στους γειτονικούς κόμβους (one hop), της τοπολογίας του δικτύου χρησιμοποιώντας πολυσημειακούς αναμεταδότες (multipoint relays-MPRs) ώστε να μειωθεί η υπερπλήρωση από μηνύματα ελέγχου στους κόμβους που γειτνιάζουν μεταξύ τους, αλλά να καταμερίζονται οι ευθύνες ενημέρωσης από τους MPRs (Σχήμα 4.25). Όταν ένας κόμβος D δεχθεί για πρώτη φορά ένα Hello μήνυμα από κάποιον άγνωστο κόμβο S τότε τον καταχωρεί στην μνήμη του σαν νέο ασύμμετρο γειτονικό κόμβο. Αφού και ο S δεχθεί Hello μήνυμα από τον D, και εντοπίσει μέσα στο μήνυμα το αποτύπωμά του τότε τον καταχωρεί σαν συμμετρικό. Στη συνέχεια ο S επανεκπέμπει Hello στον D ο τελευταίος τον καταχωρεί σαν συμμετρικό αφού και αυτός αναγνωρίσει το αποτύπωμά του (Σχήμα 4.23).



Σχήμα 4. 63: Διαδικασία ανταλλαγής πακέτων HELLO

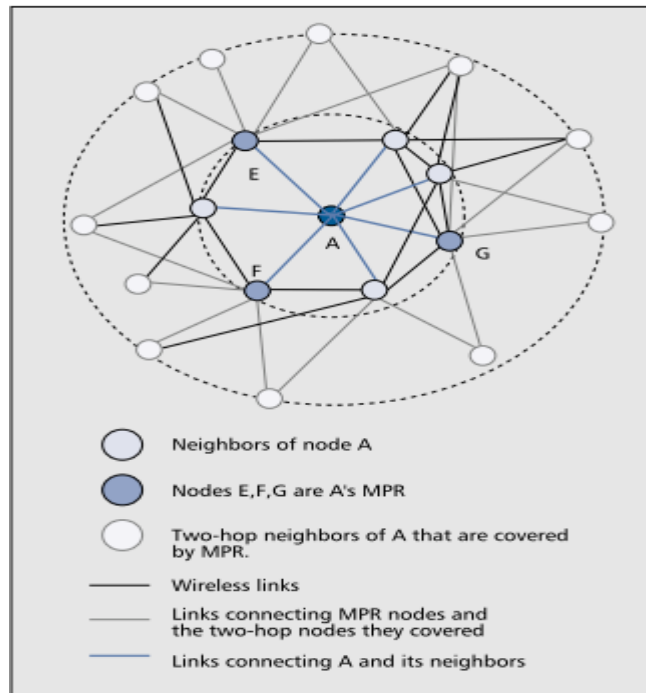
Η διαδικασία επιλογής των MPR's γίνεται ως εξής: όταν ένα MEA είναι εντός του εύρους εκπομπής με το S και το Y, ενώ τα τελευταία δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Όταν το D λαμβάνει Hello(S:empty) από το S απαντά με ασύμμετρο Hello(S:asy) το οποίο το λαμβάνει και ο Y ο οποίος γνωρίζει ότι ο D θα επικοινωνεί τόσο με τον S όσο και με τον Y. Στη συνέχεια ανταλλάσσονται μηνύματα Hello μεταξύ του Y και του D και έτσι ο D εκλέγεται ως ο MPR μεταξύ των S και Y (Σχήμα 4.24).



Σχήμα 4. 64: Διαδικασία εκλογής MPR

Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να αποστείλει ένα πακέτο σε ένα κόμβο οποίος απέχει παραπάνω από μία αναπήδηση, χρησιμοποιεί μία ευρετική συνάρτηση

υπολογισμού κόστους δρομολογίου ώστε να επιτύχει σίγουρα την λύση με το βέλτιστο αποτέλεσμα (λιγότερο κόστος διαδρομής).



Σχήμα 4. 65: Το πρωτόκολλο OLSR

- Topology Broadcast Based on Reverse Path Forwarding (TBRPF) [84-87]:** Αποτελεί ένα πρωτόκολλο κατάστασης σύνδεσης (LS) που περιλαμβάνει δύο λειτουργίες: α.) Η αναζήτηση γειτονικών κόμβων και β.) η δρομολόγηση. Η πρώτη λειτουργία επιτυγχάνεται με την περιοδική και έκτακτη (σε περίπτωση αλλαγής ή απώλειας του κόμβου) αποστολή HELLO πακέτων οι οποίες ανανεώνουν τους πίνακες δρομολόγησης και η δεύτερη η οποία επιτυγχάνεται μέσω της εκμετάλλευσης των χωρικά διαμορφούμενων πληροφοριών θέσης των κόμβων. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου βασίζεται σε μία συνάρτηση διαδοχής η οποία υπολογίζει την βέλτιστη διαδρομή μέσω των λιγότερων αναπηδήσεων για την αποστολή των πακέτων στον προορισμό τους. Οι χρησιμοποιούμενες πληροφορίες αποτελούν περιοδικές ενημερώσεις πινάκων δρομολόγησης οι οποίες αποστέλλονται μόνο προς την ρίζα του δέντρου αναζήτησης διαδρομών περιορίζοντας την «πλημμύρα» του δικτύου με περιττές πληροφορίες και με περιττή ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων.

- Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) [84-86]:** Σε αυτό το πρωτόκολλο ο κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα πίνακα δρομολόγησης στον οποίο αποθηκεύει για όλους τους κόμβους του δικτύου α.) τον αριθμό των αναπηδήσεων και β.) τον αριθμό ακολουθίας του κόμβου για αποφευχθεί η δημιουργία βρόγχων. Οι αριθμοί ακολουθίας παράγονται από τους κόμβους- προορισμούς και όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός ακολουθίας για μία διαδρομή τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ευρετικής συνάρτησης για την επιλογή αυτού του δρομολογίου. Τα

αντιδραστικά (on demand) πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα FANET συνοψίζονται παρακάτω:

- **Dynamic Source Routing (DSR) [87]:** Αποτελεί πρωτόκολλο στο οποίο η επικεφαλίδα (header) εμπεριέχει την συνολική διαδρομή από την ρίζα μέχρι το προορισμό. Οι ταυτότητες ID's των ενδιάμεσων κόμβων αντιγράφονται στην επικεφαλίδα του ερωτήματος το οποίο αποστέλλεται προς εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής. Στη συνέχεια το αποτύπωμα της διαδρομής επανεκπέμπεται στον πομπό όπου αφού επιλεγεί η καλύτερη λύση, προς επίτευξη ζεύξης από όλα τα queries, αποτυπώνεται στην επικεφαλίδα των πακέτων σαν «δρομολόγηση από την πηγή-source routing» στην εύρεση διαδρομής. Σε περίπτωση που ανιχνευθεί διακοπή της αλυσίδας δρομολόγησης, λόγω μετακίνησης ενός κόμβου, τότε ή επιλέγεται εναλλακτική διαδρομή ή επαναλαμβάνεται η διαδικασία αναζήτησης διαδρομής.

- **Ad-Hoc On Demand Broadcast Route Discovery (AODV) [84-87]:** Αυτό το πρωτόκολλο λειτουργεί παρόμοια με το DSR με μία διαφοροποίηση στην διατήρηση του πίνακα δρομολόγησης όπου για κάθε κόμβο μπορεί να αποθηκευθεί μόνο μία διαδρομή καθώς επίσης και σε κάθε κόμβο διατηρούνται τα στοιχεία των γειτονικών κόμβων. Το πρωτόκολλο AODV περιλαμβάνει τρεις φάσεις: α.) την αναζήτηση διαδρομής, β.) μετάδοση των δεδομένων και γ.) διατήρηση του πίνακα δρομολόγησης.

Υπάρχουν επίσης και υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης[84] τα οποία συνδυάζουν χαρακτηριστικά των proactive και reactive πρωτόκολλων για εφαρμογή σε μεγάλης επέκτασης δίκτυα:

- **Temporarily Ordered Routing Algorithm (TORA) [84-87]:** Αποτελεί πρωτόκολλο το οποίο διατηρεί στοιχεία μόνο για τους γειτονικούς δρομολογητές και χρησιμοποιεί κυρίως ένα αντιδραστικό (reactive) αλγόριθμο αλλά προ-δραστικούς κατά περιπτώσεις. Λειτουργεί διατηρώντας ένα γράφο «ακύκλου διευθυνσιοδότησης»- DAG (Directed Acyclic Graph) από τον κόμβο πηγή έως τον προορισμό όπου κάθε κόμβος έχει μία μοναδική τιμή η οποία είναι σε φθίνουσα σειρά προφυλάσσοντας την δρομολόγηση των πακέτων από τη δημιουργία βρόγχων. Ακόμη αυτό το πρωτόκολλο δε χρησιμοποιεί την λύση της πιο κοντινής διαδρομής, εξασφαλίζοντας πόρους και πρόληψη από καθυστερήσεις σε περίπτωση μεγάλης κινητικότητας, χρησιμοποιώντας εναλλακτικές μακρύτερες διαδρομές.

	FSR	OLSR	TBRPF	AODV	DSR
Routing philosophy	Proactive	Proactive	Proactive	On-demand	On-demand
Routing metric	Shortest path	Shortest path	Shortest path	Shortest path	Shortest path
Frequency of updates	Periodically	Periodically	Periodically, as needed (link changes)	As needed (data traffic)	As needed (data traffic)
Use sequence numbers	Yes	Yes	Yes (HELLO)	Yes	No
Loop-free	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Worst case exists	No	Yes (pure LS)	No	Yes (full flooding)	Yes (full flooding)
Multiple paths	Yes	No	No	No	Yes
Storage complexity	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(e)$	$O(e)$
Comm. complexity	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(2N)$	$O(2N)$

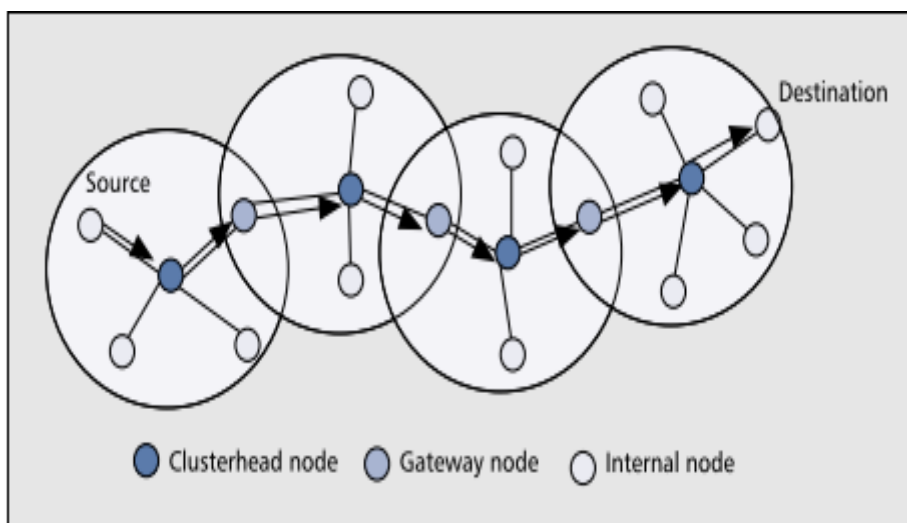
Σχήμα 4. 66: Σύγκριση πρωτοκόλλων επίπεδης δρομολόγησης

4.4.3 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΙΕΡΑΡΧΙΚΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (HIERARCHICAL)

Στην περίπτωση όπου το μέγεθος ενός δικτύου αυξάνεται, τα πρωτόκολλα επίπεδης δρομολόγησης δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις προκλήσεις του παρουσιάζοντας την ανάγκη για δημιουργία πρωτοκόλλων ιεραρχικής δομής. Η βασική ιδέα της ιεραρχικής δομής είναι η δημιουργία ομάδων κόμβων στις οποίες κάθε κόμβος θα έχει διαφορετικές ευθύνες για περαίωση λειτουργιών τόσο εντός όσο και εκτός της ομάδας. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος ομαδοποίησης των κόμβων σε ένα δίκτυο είναι η γεωγραφική όπου κάθε κόμβος τοποθετείται ανάλογα με την τοπογραφική του συσχέτιση. Η ιεραρχία μπορεί να είναι είτε φυσική είτε νοητή. Στην πρώτη περίπτωση η κάθε ομάδα διαθέτει ένα κόμβο αρχηγό (cluster head) με τους υφιστάμενους του κόμβους ενώ στην δεύτερη ο κάθε κόμβος έχει μία τοπική διάταξη ευθύνης με διαφορετικές μεθόδους δρομολόγησης εντός και εκτός της διάταξης. Τα κυριότερα γεωγραφικά πρωτόκολλα παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Cluster-head Gateway Switch Routing (CGSR) [84-87]:** Χρησιμοποιεί ένα αλγόριθμο ομαδοποίησης LCC (Least Cluster-head Change) ο οποίος διαχωρίζει το σύνολο των κόμβων του δικτύου σε ομάδες, εκλέγοντας ένα κόμβο σαν αρχηγό αυτής. Όταν ένας κόμβος ανήκει σε περισσότερες από μία ομάδες τότε λειτουργεί σαν δρομολογητής μεταξύ των δύο ομάδων. Τα πακέτα δρομολογούνται παίρνοντας την διεύθυνση των κόμβων-αρχηγών της ρίζας και του φύλλου (στο δέντρο αναζήτησης δρομολογίου). Ο CGSR χρησιμοποιεί ένα πίνακα στον οποίο διαφαίνονται οι κλάσεις και οι κόμβοι αρχηγοί των κόμβων τους εμπεριέχονται σε όλες τις κλάσεις, τον οποίο εκπέμπει περιοδικά στο δίκτυο. Οι κόμβοι αρχηγοί με τη λήψη ενός τέτοιου μηνύματος αναθεωρούν την κατάσταση των ομάδων τους. Επίσης χρησιμοποιεί και ένα πίνακα δρομολόγησης στον οποίο καταγράφονται μόνο τα μονοπάτια δια μέσου των ομάδων για τους κόμβους αρχηγούς, ανεξάρτητα από τους πόσους και ποιους κόμβους εμπεριέχει η κάθε ομάδα. Για την αποστολή ενός πακέτου

λαμβάνονται πληροφορίες από τον πρώτο πίνακα και στη συνέχεια δρομολογείται η αποστολή μέσω της διαδρομής που διαφαίνεται στο δεύτερο πίνακα μέχρι τον αρχηγό της ομάδας ο οποίος το δρομολογεί μέχρι τον προορισμό (Σχήμα 4.27).

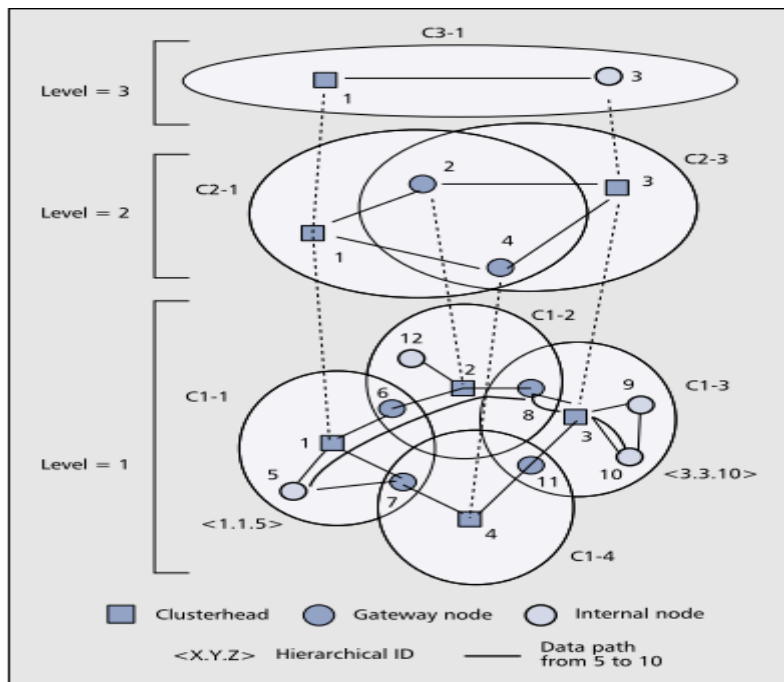


Σχήμα 4. 67: Αλγόριθμος δρομολόγησης CGSR

- **Hierarchical State Routing (HSR) [84-87]:** Αποτελεί ένα πρωτόκολλο κατάστασης σύνδεσης (LS) πολλαπλής κατανομής των κόμβων σε λογικά επίπεδα τα οποία σχηματίζουν ομάδες. Οι ιεραρχικά κατώτεροι κόμβοι-αρχηγοί των ομάδων αποτελούν τους κόμβους μέλη των ιεραρχικά ανώτερων επιπέδων. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η δρομολόγηση των πακέτων με μειωμένη φόρτιση των πληροφοριών που μεταφέρονται με τα πακέτα. Ο κάθε κόμβος αρχηγός γνωρίζει ποιους κόμβους έχει η ομάδα του και εκπέμπει αυτή την πληροφορία στους ανώτερους ιεραρχικά κόμβους οι οποίοι με τη σειρά τους την εκπέμπουν παραπάνω. Οι κόμβοι του δικτύου οι οποίοι εμπεριέχονται σε δύο κλάσεις αποτελούν τις πύλες επικοινωνίας (Gateways). Επίσης χρησιμοποιώντας ένα πίνακα HSR οποίος ενημερώνεται περιοδικά, και έχει καταγεγραμμένη την ταυτότητα του κάθε κόμβου (hierarchical ID), επιτυγχάνεται η δρομολόγηση μεταξύ των πακέτων (Σχήμα 4.).

- **Zone Routing Protocol (ZRP) [84-87]:** Αποτελεί ένα υβριδικό πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο βασίζεται στην διαμερισματοποίηση του δικτύου σε ζώνες καθεμία από τις οποίες ανατίθεται σε ένα κόμβο από τον οποίο η απόσταση των υπολοίπων είναι κατά ελάχιστον παραπάνω από μία καθορισμένη τιμή R δημιουργώντας έτσι αλληλεπικαλυπτόμενες ζώνες. Η δρομολόγηση εντός των ζωνών (intra routing) λαμβάνει χώρα μέσω προ-αντιδραστικών πρωτοκόλλων (Intrazone Routing protocol- IARP) ενώ εκτός ζωνών γίνεται με τη χρήση αντιδραστικών πρωτοκόλλων (Interzone Routing Protocol) με την ανταλλαγή πακέτων RPEQ (route query-route reply). Όταν γίνει αίτηση για αποστολή ενός πακέτου το IARP ελέγχει εάν ο προορισμός είναι εντός της ζώνης, διαφορετικά αιτείται από το BRP (Broadcast resolution Protocol) την αποστολή μηνυμάτων RREQ για την εξεύρεση του μονοπατιού

προς τον προορισμό μέσω των κόμβων που βρίσκονται κοντά στα σύνορα μεταξύ των ζωνών.



Σχήμα 4. 68: Zone routing Protocol

- Landmark Ad-hoc Routing Protocol (LANMAR) [87-91]: Είναι σχεδιασμένο για την υλοποίηση δικτύων στα οποία οι κόμβοι έχουν κοινά φυσικά χαρακτηριστικά ομαδοποίησης και είναι πιθανόν να μετακινούνται σαν ομάδες πχ. σμήνη MEA. Χρησιμοποιεί ένα χαρακτηριστικό ID του σμήνους και ένα του κόμβου σαν ID κόμβου :D Σμήνους, ID Κόμβου> για την διευθυνσιοδότηση. Το κάθε σμήνος εκλέγει ένα αρχηγό σαν Land-Mark και για την δρομολόγηση μεταξύ των Land-Mark χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο διανύσματος απόστασης DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) το οποίο διαδίδει την πληροφορία όλων των κόμβων land-mark σε όλο το δίκτυο. Επιπλέον το πρωτόκολλο LANMAR μπορεί να λειτουργήσει και σε επίπεδη λειτουργία χρησιμοποιώντας το FSR (Fisheye State Routing) για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του ίδιου σμήνους.

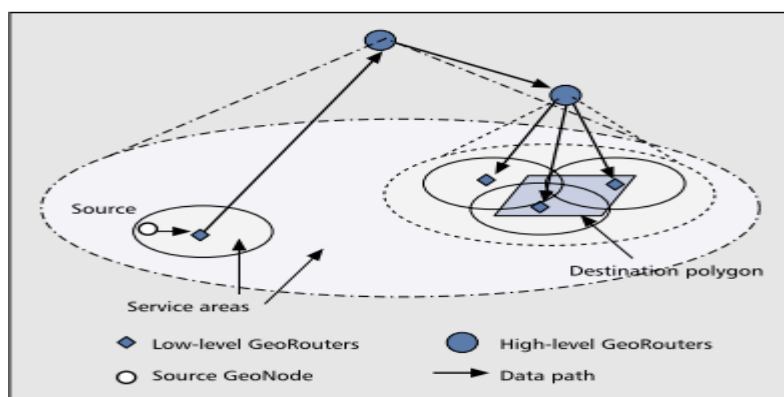
	CGSR	HSR	ZRP	LANMAR
Hierarchy	Explicit two levels	Explicit multiple levels	Implicit two levels	Implicit two levels
Routing philosophy	Proactive, distance vector	Proactive, link state	Hybrid, DV and LS	Proactive, DV and LS
Loop-free	Yes	Yes	Yes	Yes
Routing metric	Via critical nodes	Via critical nodes	Local shortest path	Local shortest path
Critical nodes	Yes (clusterhead)	Yes (clusterhead)	No	Yes (landmark)
Storage complexity	$O(N/M)$	$O(M^*H)$	$O(L) + O(e)$	$O(L) + O(G)$
Comm. complexity	$O(N)$	$O(M^*H)$	$O(N)$	$O(N)$

Σχήμα 4. 69: Σύγκριση πρωτοκόλλων ιεραρχικής δρομολόγησης

4.4.4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΘΕΣΕΩΣ (GPS ASSISTED)

Τα πρωτόκολλα αυτά λειτουργούν χρησιμοποιώντας πληροφορίες γεωγραφικής θέσης των κόμβων που απαρτίζουν το δίκτυο με την χρήση συστημάτων εντοπισμού θέσης (GPS- Galileo). Τα κυριότερα πρωτόκολλα αυτού του είδους συνοψίζονται παρακάτω:

- **Geographic Addressing and Routing (GEOCAST) [87]:** Χρησιμοποιεί το σύστημα συντεταγμένων (LAT-LONG) για την απεικόνιση των κόμβων στο δίκτυο και με την χρήση των Geo-Router υπολογίζει την περιοχή που απευθύνονται τα μηνύματα. Η περιοχή η οποία ορίζεται από ένα σύνολο ζευγών συντεταγμένων απεικονίζεται σαν ένα πολύγωνο με ακμές τα ζεύγη των συντεταγμένων ή σαν ένας κύκλος με κέντρο τις δοθέν ζεύγος. Για την επιτυχή δρομολόγηση των πακέτων σε όλο το δίκτυο τα Geo-Router ανταλλάσσουν πληροφορίες θέσεως των κόμβων μεταξύ τους με την ανταλλαγή μηνυμάτων. Το κάθε τερματικό (Geo-Host) αποστέλλει το πακέτο προς δρομολόγηση σε ένα κόμβο του δικτύου (Geo-Node), ο οποίος στη συνέχεια το προωθεί προς τον τοπικό Geo-Router. Αυτός αφού ελέγξει εάν ο προορισμός του πακέτο εντοπίζεται εντός του τοπικού δικτύου εξυπηρέτησης, είτε προωθεί το πακέτο προς τον τελικό προορισμό, είτε το προωθεί προς τον κεντρικό GEO-ROUTER (Σχήμα 4.30).



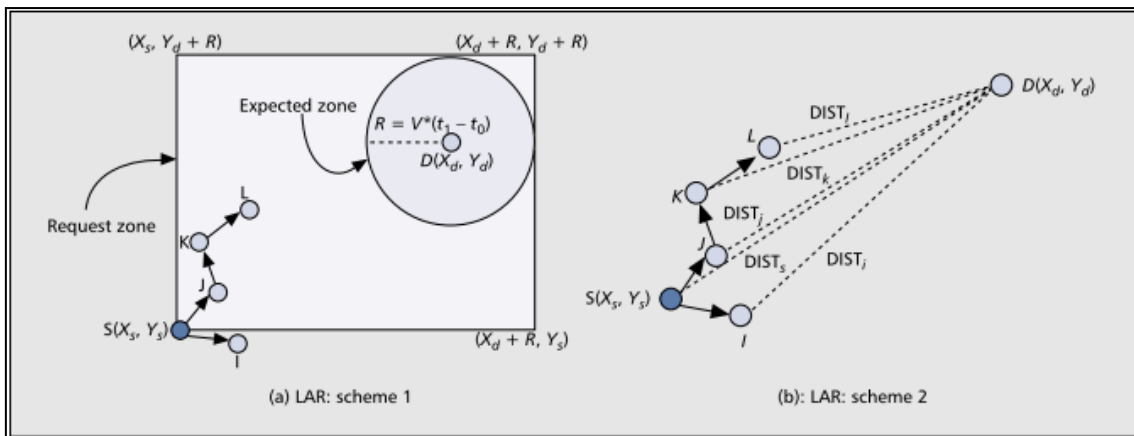
Σχήμα 4. 70: Πρωτόκολλο GEOCAST

- **Location Aided Routing (LAR) [87-92-93]:** Αποτελεί αντιδραστικό (on demand) πρωτόκολλο το οποίο βασίζεται στην δρομολόγηση από την πηγή (source routing) παρόμοια με την λειτουργία του DSR (Dynamic Source Routing). Χρησιμοποιώντας δεδομένα θέσεως και τοπολογίας προσπαθεί να δημιουργήσει μικρότερες ζώνες εντοπισμού μονοπατιών (request zone) με αποτέλεσμα την μείωση του φόρτου μηνυμάτων (limited flooding) σε συγκεκριμένη ζώνη (request zone) με τους κόμβους που βρίσκονται εντός της ζώνης να προωθούν πακέτα αίτησης δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο αυτό λειτουργεί σε δύο συνδυασμούς όπως παρακάτω:

α.) 1^{ος} Συνδυασμός: Ο πομπός υπολογίζει μία κυκλική περιοχή στην οποία αναμένεται ότι θα εμπεριέχεται ο κόμβος παραλήπτης, βασιζόμενος σε προηγούμενες αναζητήσεις και εντοπισμούς του κόμβου και στο μέσο διάνυσμα της

ταχύτητας του. Η περιοχή που εμπεριέχεται από το πολύγωνο περιέχει τόσο την κυκλική περιοχή όσο και την περιοχή του πομπού και ονομάζεται περιοχή αίτησης (request zone) και τα ζεύγη των συντεταγμένων που την ορίζουν επισυνάπτονται της αίτησης προς τον κόμβο προορισμό. Κατά την διάρκεια της αιτήσεως δρομολόγησης μόνο κόμβοι που εντοπίζονται εντός της περιοχής αίτησης θα προωθούν τα πακέτα αίτησης δρομολόγησης μειώνοντας την φόρτιση του δικτύου με μηνύματα.

β.) 2^{ος} Συνδυασμός: Ο κόμβος αποστολέας υπολογίζει την θέση του στόχου βασιζόμενος σε προορισμούς ήδη γνωστούς σε αυτόν, οι οποίοι αποτελούν γειτονικούς κόμβους του κόμβου προορισμού. Όταν κάποιος γειτονικός κόμβος λάβει την αίτηση δρομολόγησης από την πηγή, η οποία εμπεριέχει τις πληροφορίες του στόχου και την υπολογιζόμενη απόσταση, υπολογίζει την απόσταση για τον προορισμό μόνο εάν η απόσταση του από τον κόμβο είναι ίση ή μικρότερη από την απόσταση που απεστάλει από την αίτηση δρομολόγησης μέσω του δικού του διανύσματος υπολογισμού και αναμεταδίδει την αίτηση ώστε να φτάσει στον τελικό προορισμό.



Σχήμα 4. 71: Πρωτόκολλο Location Aided Routing

- **Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)[87-92-94]:**

Αποτελεί ένα προδραστικό (proactive) πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο εξασφαλίζει άκυκλους γράφους δρομολόγησης χρησιμοποιώντας πληροφορίες τοποθεσίας. Διατηρεί ένα πίνακα δρομολόγησης των κόμβων και χρησιμοποιεί δύο βασικές παραμέτρους υπολογισμού της συχνότητας ανανέωσης του πίνακα ενημέρωσης. Αυτές είναι α.) η επίδραση της απόστασης και β.) ο βαθμός κινητικότητας. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ δύο κόμβων τόσο σχετικά μικρότερη είναι η μεταβολή της θέσεως του ενός σε σχέση με τον άλλο και όσο γρηγορότερα κινείται ένας κόμβος τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της θέσεως του σε σχέση με κάποιον άλλο. Κάθε κόμβος εκπέμπει την θέση του σε όλο το δίκτυο περιοδικά ενημερώνοντας αυτούς που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση γρηγορότερα από αυτούς που βρίσκονται σχετικά πιο μακριά ενημερώνοντας τον πίνακα δρομολόγησης τους. Κατά την αποστολή δεδομένων τα πακέτα εκπέμπονται μόνο προς τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται στην κατεύθυνση του προορισμού. Εάν δεν υπάρχει καταγεγραμμένη τοποθεσία του κόμβου προορισμού τότε τα πακέτα

εκπέμπονται προς όλο το δίκτυο. Όταν αποστέλλεται ένα πακέτο καταγράφεται στην επικεφαλίδα του (header) το ίχνος των κόμβων που θα ακολουθήσει μέχρι τον προορισμό του. Όταν ένα πακέτο φτάνει σε ένα κόμβο τότε αυτός διενεργεί την ίδια διαδικασία υπολογίζοντας την διαδρομή από αυτόν μέχρι τον προορισμό μορφοποιώντας το ίχνος που αναγράφεται στην επικεφαλίδα μέχρι τον προορισμό. Όταν το πακέτο φτάσει στον προορισμό του τότε αυτός απαντά με ACK τηρώντας την αντίστροφη πορεία εκτός της περίπτωσης που τα πακέτα διαχέονται σε όλο το δίκτυο για την εύρεση δρομολογίου.

- **Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [87-95]:**

Χρησιμοποιεί ένα άπληστο αλγόριθμο εύρεσης διαδρομής χρησιμοποιώντας πληροφορίες μόνο ως προς τους γειτονικούς κόμβους και εκπέμποντας αίτηση ως προς τον κοντινότερο κόμβο. Ο κάθε κόμβος παίρνει αποφάσεις αποστολής πακέτων σύμφωνα κάθε φορά με τους γειτονικούς του κόμβους και σύμφωνα με τις πληροφορίες του κόμβου στόχου. Χρησιμοποιεί δύο συνδυασμούς λειτουργίας:

α. Άπληστη δρομολόγηση χρησιμοποιείται ως η κύρια μέθοδος δρομολόγησης κατά την οποία τα πακέτα εκπέμπονται πρώτα στον κοντινότερο κόμβο.

β. Περιμετρική δρομολόγηση η οποία λαμβάνει χώρα όταν η πρώτη φτάσει σε αδιέξοδο ή σε βρόγχο. Πριν ακόμη δρομολογηθεί ένα πακέτο με την άπληστη μέθοδο ο κόμβος αποστολέας υπολογίζει ένα γράφο σχετικής γειτνίασης (RNG- Relative Neighborhood Graph) των κόμβων το οποίο αποτελεί μία ευρετική συνάρτηση εύρεσης του κόστους διαδρομής για τον κάθε κόμβο του δικτύου περιμετρικά του αποστολέα. Εάν το RNG κατά την διάδοσή του εξακριβώσει διαδρομή με μικρότερο κόστος από την τιμή του άπληστου αλγόριθμου μορφοποιεί την τιμή αυτή εξασφαλίζοντας καλύτερα αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρωτόκολλο αυτό δεν εξασφαλίζει ούτε την βέλτιστη αλλά ούτε εγγυάται πως θα βρει λύση.

	GeoCast	LAR	DREAM	GPSR
Support location propagation	Yes	Yes	Yes	No
Data forwarding by location	Yes	No	Yes	Yes
Routing philosophy	Proactive	On-demand	Proactive	Proactive (beacons only)
Sensitive to mobility	No	Yes	No	No
Routing metric	Shortest path	Shortest path	Shortest path	Closest distance
Loop-free	Yes	Yes	Yes	No
Worst case exists	No	Yes (full flooding)	No	Yes (loops and longer paths)
Multiple receivers	Yes	No	No	No
Storage complexity	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(M)$
Comm. complexity	$O(N)$	$O(e)$	$O(N)$	$O(M)$

Σχήμα 4. 72: Σύγκριση πρωτοκόλλων GPS assisted

4.4.5 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ (AERONAUTICAL ENVIRONMENT)

Πολλές φορές λόγω της ταχύτητας των κόμβων που απαρτίζουν ένα δίκτυο Α/Φ, τα οποία μπορεί να κινούνται με ταχύτητες που φθάνουν τα 3,5 Mach (1200 μ/δευτ), τα πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν πετυχαίνουν καλή απόδοση σε τόσο ακραία περιβάλλοντα. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί κάποια πρωτόκολλα τα οποία είναι σχεδιασμένα να ανταποκρίνονται ακόμη και σε τόσο δυναμικά μεταβαλλόμενες τοπολογίες. Κάποια από αυτά συνοψίζονται παρακάτω:

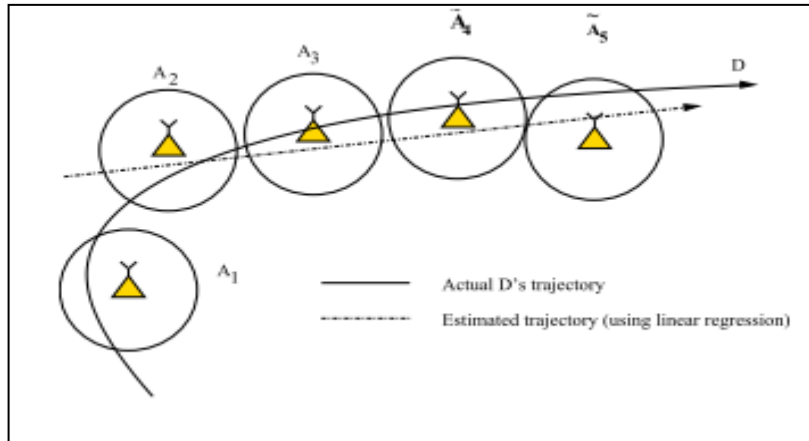
- **Aero Rp [92]:** Χρησιμοποιεί μία ευρετική συνάρτηση η οποία βασίζεται στο διάνυσμα της ταχύτητας των γειτονικών κόμβων του κόμβου αποστολέα. Διεξάγει τόσο αναζήτηση γειτονικών κόμβων όσο και μεταφορά πακέτων συλλέγοντας στοιχεία από τα πακέτα HELLO που αποστέλλονται από όλους τους κόμβους προς τους γειτονικούς τους για να υπολογίσουν τόσο τον δείκτη TTI (time to Intercept) όσο και για την ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης. Ο δείκτης TTI απεικονίζει το χρονικό διάστημα στο οποίο ο κάθε γειτονικός κόμβος θα είναι εντός του εύρους εκπομπής του κόμβου προορισμού. Ο κάθε κόμβος που λαμβάνει το πακέτο διεξάγει διερεύνηση δρομολόγησης του πακέτου εκπέμποντας στη συνέχεια με τη σειρά του πακέτα στους δικούς του γειτονικούς κόμβους. Εάν ένας κόμβος έχει την καλύτερη τιμή TTI για ένα ενδιαμέσο ή τελικό κόμβο προορισμού και αυτός δεν είναι ακόμη εντός του εύρους εκπομπής του τότε μπορεί να αναμένει για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα και να εκπεμφθεί από αυτόν.

- **Ad-Hoc Routing Protocols for Aeronautical Mobile Ad-hoc Networks (ARPAM) [96]:** Αποτελεί πρωτόκολλο το οποίο βασίζεται στο AODV (Ad-Hoc On Demand Distance Vector) και χρησιμοποιεί προ-αντιδραστικές λειτουργίες σε ειδικές περιπτώσεις. Όταν ένα MEA θέλει να εκπέμψει σε ένα άλλο MEA τότε αποστέλλονται RREQ μηνύματα όπως και στο πρωτόκολλο AODV δια μέσου της παγκατευθυντικής κεραίας εμπεριέχοντας πληροφορίες (Lat-Long) τις οποίες τις αντλεί από το δέκτη GPS που διαθέτει. Στη συνέχεια αναθεωρείται ο πίνακας εντοπισμού θέσης των γειτονικών κόμβων και αποφασίζεται εάν είναι η δυνατή ή απευθείας αποστολή του μηνύματος στον γειτονικό κόμβο λόγω μεταβολής της θέσεως του. Όταν το πακέτο RREQ φθάσει στον προορισμό του αποφασίζεται ποια διαδρομή θα ακολουθηθεί και διαμέσου ποιας κεραίας σύμφωνα με το πεδίο LRF (Link Request Field) και με τις διαθέσιμες γεωγραφικές πληροφορίες.

- **Multipath Doppler Routing Algorithm (MUDOR)[97]:** Αποτελεί ένα αντιδραστικό πρωτόκολλο (on demand) το οποίο λαμβάνοντας υπόψη την κινητικότητα των κόμβων υπολογίζει το ίχνος του δρομολογίου που θα ακολουθηθεί χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Doppler για τον υπολογισμό της σχετικής κινητικότητας μεταξύ των κόμβων και για την δρομολόγηση μεταξύ ήδη γνωστών κόμβων, ενώ προβαίνει σε αναζήτηση νέας διαδρομής με την εκπομπή πακέτων RREQ σε περίπτωση που ο δεν είναι γνωστή η διαδρομή προς τον κόμβο παραλήπτη.

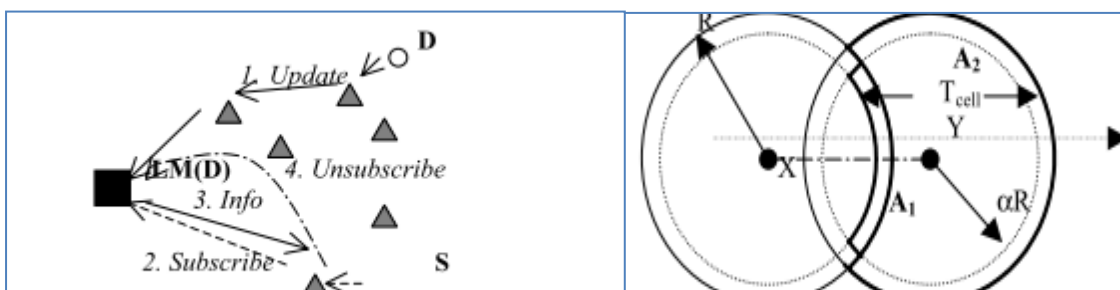
- **Anticipatory Routing [98]:** Αποτελεί ένα πρωτόκολλο το οποίο αφορά τη χρήση κυψελωτών συστημάτων και προνοεί την ύπαρξη των κόμβων προορισμών για συγκεκριμένο χρόνο και προωθεί τα πακέτα απευθείας στον κόμβο τη

συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό εντοπισμού της θέσεως των κόμβων αποστέλλοντας μηνύματα LSU (Link State Update) LU (Location Update) και LI (Location Information) στα οποία προστίθενται οι πληροφορίες θέσεως μέσω GPS. Ο μηχανισμός που χρησιμοποιεί για τον εντοπισμό της τοποθεσίας είναι παρόμοιος με αυτόν που περιγράφεται παρακάτω στο πρωτόκολλο spray-routing.



Σχήμα 4. 73: Πρωτόκολλο Anticipatory Routing

- Spray Routing [99]:** Το πρωτόκολλο αυτό αποτελεί ένα επίπεδης δρομολόγησης, κατάστασης γραμμής βασισμένο σε κυψελωτά συστήματα το οποίο ελέγχει, εκπέμποντας πακέτα δρομολόγησης για ένα κόμβο προορισμό, εγγύς της τελευταίας τοποθεσίας στην οποία είχε καταγραφεί η παρουσία του. Για το διαχωρισμό του χώρου χρησιμοποιεί κυψέλες για καθεμία από τις οποίες υπεύθυνος είναι ένας κόμβος-μεταγωγός για τη δρομολόγηση των πακέτων και τερματικά (endpoints) τα οποία αποτελούν τους τελικούς αποδέκτες ή τους αποστολείς των πακέτων και είναι συνδεδεμένοι με κάποιον μεταγωγό. Ο εντοπισμός της τοποθεσίας των κόμβων βασίζεται σε ένα μηχανισμό ο οποίος εντοπίζει εντός ποιας κυψέλης βρίσκεται το τερματικό και λειτουργεί ως εξής: Οι μεταγωγείς λειτουργούν σαν διαχειριστές LM (Location Managers) μίας βάσης δεδομένων τοποθεσίας στην οποία καταγράφεται οποιοσδήποτε κόμβος διέλθει μέσα από την περιοχή ευθύνης του LM (κυψέλη) τόσο για την είσοδο όσο και για την έξοδο του ανεξάρτητα από το αν είναι ακόμη εντός της κυψέλης. Όταν ένα τερματικό S θέλει στείλει πακέτα σε ένα κόμβο D ο οποίος βρίσκεται εντός της κυψέλης του LM θα πρέπει να αποστείλει μήνυμα (location subscribe) στον μεταγωγέα του D – LM(D) και ο LM(D) να στείλει μήνυμα (location subscribe) στον μεταγωγέα του S- LM(S) για να μπορέσει να δρομολογηθεί το πακέτο στον προορισμό του. Εάν συμβεί κάποια μεταπομπή (handoff) κόμβου ενώ η δρομολόγηση βρίσκεται σε εξέλιξη θα ενημερωθεί τόσο το LM του ενός κόμβου όσο και του άλλου με την αποστολή μηνύματος πληροφοριών τοποθεσίας (Location Information Message) αφού το τερματικό που μεταπέμπεται αποστέλλει μήνυμα διαγραφής από την κυψέλη (Location Unsubscription Message).

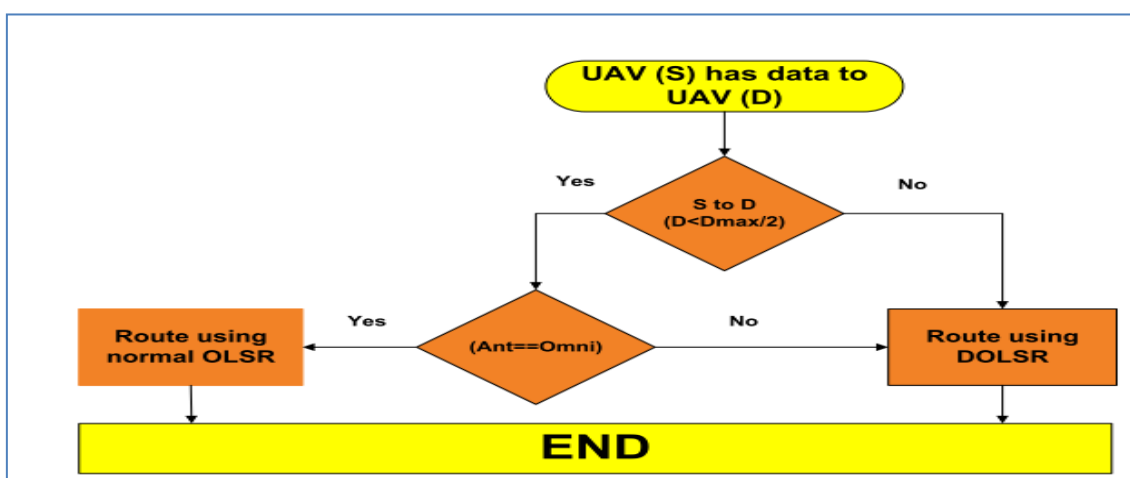


Σχήμα 4. 74: Πρωτόκολλο Spray Routing

Η φιλοσοφία αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι για εντοπιστεί ένας κόμβος του οποίου η παρουσία δεν είναι βέβαιη, αρκεί να «ψεκάσουμε» (spray) το χώρο γύρω από την τελευταία καταγραφή του με πακέτα αιτήσεων δρομολόγησης, διότι κάπου εκεί γύρω θα έχει κατευθυνθεί. Η περιοχή την οποία θα ψεκάσουμε εξαρτάται από την κινητικότητα του κόμβου προορισμού σε σχέση με τον αποστολέα. Για τον καθορισμό του «ψεκάσματος» χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι: α.) το πλάτος το οποίο καθορίζει τον αριθμό των κυψελών στις οποίες θα εκπνευθούν μηνύματα ελέγχου ανάλογα με την κινητικότητα του κόμβου και β.) το βάθος το οποίο καθορίζει τον αριθμό των διαδοχικών κυψελών από τις οποίες ξεκινά η αποστολή μηνυμάτων κίνησης μέχρι τον κόμβο προορισμό.

- **Directional Optimized Link State Routing Protocol (DOLSR)**

[61]: Αποτελεί παρόμοιο πρωτόκολλο με το OLSR αλλά διαφέρει στην επιλογή των MPR's (Multipoint Relays) ώστε να είναι κατάλληλο για δίκτυα FANET. Όπως και από το διάγραμμα οντοτήτων (block diagram) το DOLSR λειτουργεί ως εξής (Σχήμα 4.35): Για κάθε πακέτο που θα πρέπει να αποσταλεί υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των κόμβων. Εάν μεν η απόσταση του κόμβου προορισμού είναι μικρότερη από μία συγκεκριμένη τιμή D_{max} τότε θα χρησιμοποιηθεί το OLSR χρησιμοποιώντας την παγκατευθυντική κεραία. Εάν δε η υπολογιζόμενη απόσταση υπερβαίνει το όριο ή η παγκατευθυντική κεραία είναι απασχολημένη, τότε θα χρησιμοποιηθεί το DOLSR με τη χρήση κατευθυντικής κεραίας.



Σχήμα 4. 75: Πρωτόκολλο DOLSR

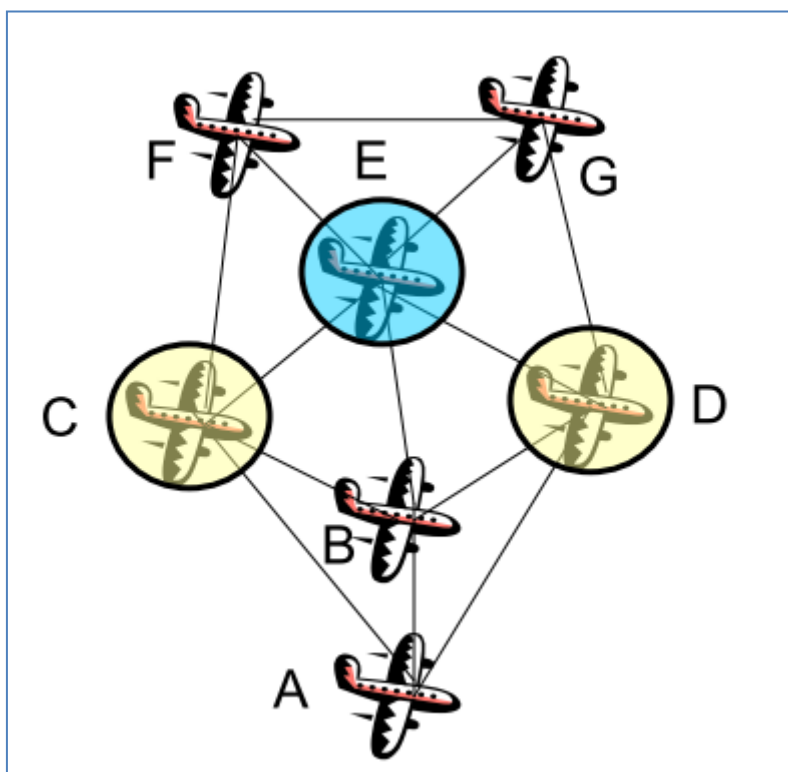
Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά οι βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου:

➤ **Διαδικασία αναζήτησης γειτονικών κόμβων:** Εκπέμπονται περιοδικά όπως και στο πρωτόκολλο OLSR, Hello μηνύματα στους γειτονικούς κόμβους, μέσω παγκατευθυντικής κεραίας και με αυτό τον τρόπο αναγνωρίζονται οι γειτονικοί κόμβοι μεταξύ τους καθώς και οι κόμβοι οι οποίοι απέχουν κατά δύο ακτίνες εκπομπής της παγκατευθυντικής κεραίας. Οποιοσδήποτε άλλος κόμβος είναι εκτός αυτών των ορίων θεωρείται μεμακρυσμένος και δεν λογίζεται εντός του εύρους του MPR.

➤ **Διαδικασία επιλογής των MPR's στο DOLSR:** Η βασική ιδέα επιλογής των MPR στο DOLSR είναι να επωφεληθούμε από την χρήση της κατευθυντικής κεραίας ώστε να μειωθεί ο αριθμός των MPR's για την αποφόρτιση του δικτύου με μηνύματα ελέγχου. Έστω ότι έχουμε την τοπολογία που φαίνεται στο σχήμα 4. . Η επιλογή των MPR's, σύμφωνα με τους πίνακες δρομολόγησης, για την επικοινωνία του κόμβου A , σύμφωνα με το OLSR θα ήταν ο C και ο D ενώ για τον F θα ήταν ο C και ο G. Το DOLSR καθορίζει πως ο κόμβος ο οποίος απέχει κατά μία αναπήδηση (one hop) και είναι ο πιο μεμακρυσμένος, θα αποτελεί τον MPR για το DOLSR (Σχήμα 4.36-4.37).

Node	2-Hop Neighbors	MPR(s) in OLSR	MPR(s) in DOLSR
A	E, F, G	C, D	E
F	A, B, D	C, G	B

Σχήμα 4. 76: Πίνακας επιλογής MPR κατά το OLSR και κατά το DOLSR



Σχήμα 4. 77: Διαδικασία επιλογής MPR's κατά το DOLSR

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ OSI (CROSS LAYER ARCHITECTURE)

Η διαστρωμάτωση του κοινού προτύπου OSI (Open System Interconnection), είναι μη ευέλικτη για την υποστήριξη των δικτύων FANET καθώς όλα τα στρώματα επικοινωνούν με αυστηρούς περιορισμούς μεταξύ αποτρέποντας την αλληλεπίδραση τους, γεγονός το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για την υλοποίηση δικτύων ΜΕΑ. Αυτό συμβαίνει διότι τα κοινά πρότυπα έχουν σχεδιαστεί για ενσύρματα δίκτυα τα οποία έχουν ευρωστία πόρων και λιγότερους περιορισμούς από τα FANET. Για την αποτελεσματική λειτουργία αυτών των δικτύων είναι αναγκαία η παρατήρηση του δικτύου δια μέσου όλων των επιπέδων- στρωμάτων και η λειτουργία του πρωτοκόλλου σύμφωνα με τις ανάγκες και περιορισμούς τους οποίους ανιχνεύει για κάθε στρώμα του πρωτοκόλλου ξεχωριστά. Επίσης θα πρέπει να επιτρέπεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των στρωμάτων, επιτρέποντας τις παραμέτρους του ενός στρώματος να περάσουν στο άλλο στρώμα, μειώνοντας έτσι τον φόρτο του δικτύου, τις καθυστερήσεις στην επικοινωνία, τις απώλειες πακέτων καθώς και την εξοικονόμηση ενέργειας βελτιστοποιώντας έτσι την συνολική απόδοση του συστήματος. Τα cross layer πρωτόκολλα διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το που αντλούν τις απαραίτητες πληροφορίες για την αλληλεπίδραση μεταξύ των στρωμάτων: α.) αυτά που τις αντλούν από το πρωτόκολλο του κόμβου, β.) αυτά που τις αντλούν από συνολικές πληροφορίες του δικτύου οι οποίες διακινούνται σε αυτό και γ.) συνδυασμός και των δύο. Για την υλοποίηση ενός μοντέλου διαδραστικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των στρωμάτων (από εδώ θα αναφέρεται σαν «cross layer») χρειάζεται να επιτευχθούν ορισμένοι αντικειμενικοί σκοποί:

1. Σχεδιασμός του κυρίως προτύπου εμπεριέχοντας τους περιορισμούς και τις συνθήκες για τον καθορισμό των παραγόντων και παραμέτρων οι οποίες θα πρέπει να αλληλεπιδρούν μεταξύ των στρωμάτων για την βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος.

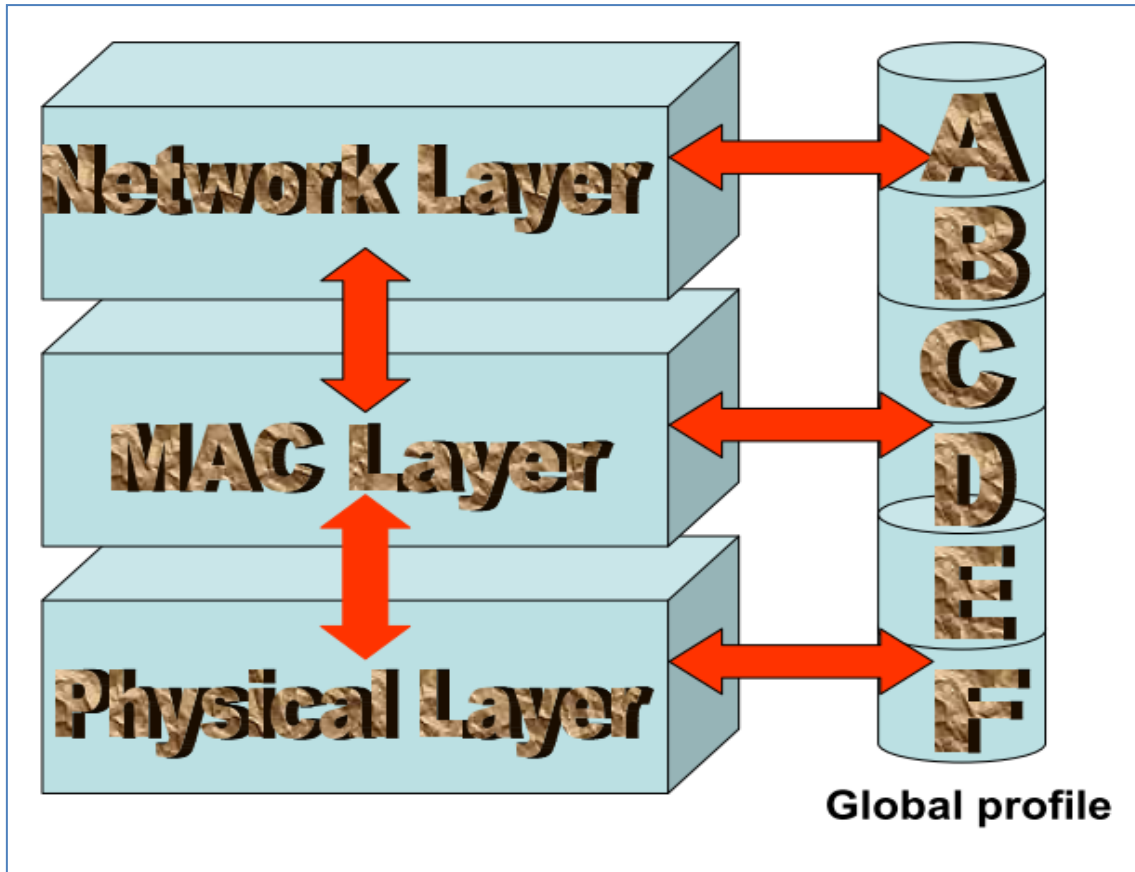
2. Σχεδιασμός ενός ενιαίου επιπέδου ζεύξης δεδομένων το οποίο θα λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές της θέσης και της κινητικότητας των κόμβων σε όλους τους άξονες για την έγκαιρη σχεδίαση μεθόδων κωδικοποίησης, πολυπλεξίας και κεραιών οι οποίες θα ικανοποιούν τόσο τις μεταβολές του μέσου (ατμόσφαιρα) όσο και της γωνίας εκπομπής.

3. Σχεδιασμός ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης (μπορεί να παραμετροποιηθεί και ένα ήδη υπάρχον όπως αυτά που προαναφέραμε) το οποίο θα λαμβάνει υπόψη όλα τα παραπάνω δεδομένα καθορίζοντας την φιλοσοφία και το είδος του αλγορίθμου δρομολόγησης.

Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα cross layer σχεδιασμού (Target Source Based Architecture)[61] το οποίο βασίζεται σε πληροφορίες τις οποίες αντλεί από το δίκτυο για την συνεργασία μεταξύ των στρωμάτων. Οι παράμετροι οι οποίοι τίθενται είναι:

- A. Το ποσοστό λάθους BER (Bit Error Rate).
- B. Το υψόμετρο του ΜΕΑ.

- C. Οι συντεταγμένες των MEA.
- D. Το κατώφλι προσπαθειών για κατάληψη του μέσου.
- E. Οι συντεταγμένες των MPR's.
- F. Είδος χρησιμοποιούμενης κεραίας για τη μετάδοση.



Σχήμα 4. 78: Cross Layer Architecture

Τα βέλη τα οποία συνδέουν τόσο τα στρώματα μεταξύ τους όσο και με τις παραμέτρους από τα δεδομένα του δικτύου, δείχνουν ότι υπάρχει αλληλεπίδραση τόσο μεταξύ των στρωμάτων του προτύπου όσο και μεταξύ του κάθε στρώματος ξεχωριστά με τις πληροφορίες που χρειάζεται τις οποίες αντλεί από τις παραμέτρους τις οποίες αναφέραμε παραπάνω.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Nuclear Threat Initiative (NTI)/Country Profiles/North Korea/Jan 2016.
2. International Civil Aviation Organization/Circular 328 AN/190/Unmanned Aircraft Systems (UAS)/2011.
3. The Centre of Excellence In Emergency Preparedness/CBRN Sheet/Ontario/Canada/2015.
4. International Civil Aviation Organization/ Chicago Convention/ Chicago/ 07 Dec 1944.
5. Official journal of the European Union/European Parliament and European Council/ Regulation (EC) No 216-2008/Common Rules in the field of civil aviation and establishing a European Aviation safety Agency/20 Feb 2008.
6. The Regulation of Unmanned Aircraft in International Law/Dr. George D. Kyriakopoulos / National and Kapodistrian University of Athens.
7. Applications for Navy Unmanned Aircraft Systems/ALKIRE, KALLIMANI, WILSON, MOORE/National Defense Research Institute/2010.
8. Unmanned Air Systems UAV Design, Development and Deployment/Reg. Austin/Wiley/2010.
9. <http://www3.nd.edu/~swarm06/SwarmFest2014/AMadeySwarmFest2014UAVs.pdf>
10. Πανεπιστήμιο Πατρών/Πολυτεχνική Σχολή/Σχεδιασμός και ανάπτυξη εργαλείων και αλγορίθμων κα εργαλείων για peer to peer δίκτυα/Γιώργος Παπαλουκόπουλος/ Μάρτης 2010/ Πάτρα.
11. International Standards and Recommended Practices and Procedures for Air Navigation Services/Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation/Aeronautical Telecommunications/Volume II Communication Procedures including those with PANS status.
12. IEEE Communications Magazine/ Oct 2009/ Communications Middleware for Tactical Environments: Observations, Experiences, and Lessons Learned/Tortonesi / Stefanelli/ Kovach/ Hanna/ Suri/ Benvegnù.
13. Frank T. Johnsen-Trude Hafsrøe-Magnus Skjægstad/Norwegian Defence Research Establishment (FFI)- University of Oslo/"Web Services and Service Discovery in Military Networks"/ 14th_icrts/2009/Norway.
14. Dynamic Routing for Flying Ad Hoc Networks/ Rosati- Kru'zelecki- Heitz- Floreano- Rimoldi/IEEE/18 Mar 2015.
15. Cross -Layer Design for mobile Ad-Hoc UAV Communication Networks/ Abdel Ilah Nour Alshbatat/PhD/Western University of Michigan/ 2010.
16. Monash University/CTIE/ Remote Piloted Aerial Vehicles: An Anthology.
17. Kendra L. B. Cook/The Silent Force Multiplier: The History and Role of UAVs in Warfare/US Air Force/ 2007.

18. Hastings, Michael/ "The rise of the killer drones: How America goes to war in secret."/ Rolling Stone 16 /(2012).
19. Chaim Herzog/Οι Αραβοϊσραηλινοί Πόλεμοι/Εκδόσεις Λιναίος/2011.
20. Jesse Russell, Ronald Cohn/Operation Mole Cricket 19/Book On Demand/2013.
21. Spencer C. Tucker/ The Persian Gulf War Encyclopedia- A Political, Social and Military History/ABC-CLIO Publications/2014.
22. Ulike Esther Franke/Civilian Drones: Fixing an Image Problem/ International Relations and Security Network/Zurich/26 Jan 2015.
23. ΕΕ 9-3 Μη Επανδρωμένα Αεροοχήματα στο Στρατό Ξηράς/ΓΕΣ/ΤΥΕΣ/Απρ 2003.
24. USA/DoD/Unmanned Aircraft Systems/ Roadmap Final 2005-2030.
25. E-E 151-1/ Πληροφορίες Μάχης/ΓΕΣ/ΤΥΕΣ/Αθήνα/Φεβ 1999.
26. Cutrona L.J./Synthetic Aperture Radar/Radar Handbook 2/1990:2333-2346.
27. Kreitmair, Thomas/ "A short overview on imagery interpretability rating scales."/ Communications (COMM)/ 2014 10th International Conference on. IEEE, 2014.
28. Σαράντης Κυρίτσης/ Πολυτεχνείο Κρήτης/ Ανάπτυξη Εφαρμογής σε Ενσωματωμένα Συστήματα για Εναέρια Μη Επανδρωμένα Οχήματα/Χανιά/ Δεκέμβριος 2014.
29. Global Security.Org/Intelligence Menu/Systems/Common Data Link (CDL).
30. Yochim, Jaysen A./The Vulnerabilities of Unmanned Aircraft System Common Data Links to Electronic Attack./Diss. Weber State University/ 2010.
31. Gertler, Jeremiah. "US unmanned aerial systems. /" LIBRARY OF CONGRESS WASHINGTON DC CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE/ 2012.
32. Asheghian, Laila, and J. Kudva./"Development of Bio-Mimetic Morphing Skins for Micro-UAVs."/Proc. of the 11th Pan-American Congress of Applied Mechanics/ Fox do Iguacu/ Brazil/ 2010.
33. McMasters, John H "The biomechanics of flight: many possible solutions looking for problems."/ International Journal of Engineering Education 20.3 (2004): 398-404.
34. Wilson, J. R. "sneaks into UCAVs." AEROSPACE AMERICA 51.6 (2013): 29-34.
35. M.L Cummings, S. Bruni, S. Mercier, PJ Mitchell/ Automation Architecture for Single Operator, Multiple UAV Command and Control/ C2 Journal / MIT/ Massachusetts 2007.
36. L. Cary- J. Coyne/Edition /ICAO-Unmanned Aircraft Systems/ Circular 328 /Blyenburgh&Co /June 2011.
37. UAS Spectrum Position Paper for European Aeronautical Spectrum Frequency Consultation Group (ASFCG)/ European Aeronautical Common Policy/ World Radio Communications Conference 2012.

38. Wenzhun, H. U. A. N. G., W. A. N. G. Yongsheng, and Y. E. Xiangyang. "Studies on novel anti-jamming technique of unmanned aerial vehicle data link." *Chinese Journal of Aeronautics* 21.2 (2008): 141-148.
39. ITU/ World Radio Communication Conference 2015 (WRC-2015)/ Agenda and Relevant Evolutions.
40. Hansen, Robert C. *Phased array antennas*. Vol. 213. John Wiley & Sons, 2009.
41. Χ. Καψάλης και Π. Κωπτής, "Κεραίες – Ασύρματες ζεύξεις", Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003.
42. Valavanis, Kimon P., and George J. Vachtsevanos. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2014.
43. International Civil Aviation Organization/ Aeronautical Telecommunications/ Annex 10/ Volume II: Communication Procedures Including Those with PANS Status/ 6th Edition/ October 2001.
44. ITU/ World Radio Communication Conference 2007 (WRC-2007)/ Final Acts/ Geneva 2007.
45. ICAO/ Manual for the Universal Access Transceiver (UAT)/ 2000.
46. RTCA Special Committee 203/ Unmanned Aircraft Systems (UAS)/ October 19, 2004.
47. «Δορυφορικές Επικοινωνίες», Τ. Pratt, C.W. Bostian, J. E. Allnutt, 2^η Έκδοση, 2009, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
48. Komljenovic, Tin. "Lens Antennas—Analysis and Synthesis at mm-waves."
49. W. Williams, C. Burton/ *Lightweight Agile Beam Antennas for UAVs*/ EMS Technologies, Inc/ Norcross GA/ 2006.
50. Hansen, Robert C. *Phased array antennas*. Vol. 213. John Wiley & Sons, 2009.
51. Howard, Courtney. "UAV command, control & communications." Retrieved from *Military & Aerospace Electronics*: [http://www. Militaryaerospace. Com/ articles/print 24](http://www.Militaryaerospace.Com/articles/print/24) (2013).
52. Ilker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, Samil Temel/ *Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey*/ Elsevier/ 08 Jan 2013.
53. David Astély, Erik Dahlman, Anders Furuskär, Ylva Jading, Magnus Lindström, and Stefan Parkvall/ *LTE: The Evolution of Mobile Broadband*/ Ericsson Research/ *IEEE Communications Magazine*/ April 2009.
54. Niklas Goddemeier, Kai Daniel, and Christian Wietfeld/ *Role-Based Connectivity Management with Realistic Air-to-Ground Channels for Cooperative UAVs*/ *IEEE Journal*/ Vol. 30, No. 5, June 2012.

- 55.** Strykhalyuk, B. M., et al. Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems/ Lviv Polytechnic National University, 4 (2014) 125-132.
- 56.** Saarelainen, Tapio. "Towards Tactical Military Software Defined Radio with the Assistance of Unmanned Aircraft Systems." *Sensors & Transducers* 185.2 (2015): 7.
- 57.** Stefan Parkvall, Erik Dahlman, Anders Furuskär, Ylva Jading, Magnus Olsson, Stefan Wänstedt, Kambiz Zangi/ LTE-Advanced – Evolving LTE towards IMT-Advanced/ Ericsson Research/ Stockholm, Sweden/ IEEE/ 2008.
- 58.** Larmo, Anna, et al/ The LTE link-layer design/ *Communications Magazine*, IEEE 47.4 (2009) 52-59.
- 59.** Hague, Dan, H. T. Kung, and Bruce Suter/ Field experimentation of cots-based UAV networking/ *Military Communications Conference*, 2006. MILCOM 2006. IEEE/ IEEE 2006.
- 60.** A. Alshbatat, Q. Alsafasfeh/ Cooperative decision making using a 1327 collection of autonomous quad rotor unmanned aerial vehicle 1328 interconnected by a wireless communication network/ in: *Proc. Of 1329 2nd Word Conference on Information Technology/ WCIT-2011*, 1330 2011.
- 61.** Abdel Ilah Nour Alshbatat/ *Cross- Layer Design for Mobile Ad-hoc Unmanned Aerial Vehicle Communications Networks/ Western Michigan University/ Kalamazoo/ Michigan/ June 2010*.
- 62.** Δίκτυα Υπολογιστών, Andrew S. Tanenbaum- David J. Wetherall, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 5^η Έκδοση, Αθήνα, 2011.
- 63.** Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών Επικοινωνιών, Μ.Ε. Θεολόγου, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2007.
- 64.** Mundarath, J. C., Parameswaran Ramanathan, and Barry D. Van Veen. "NULLHOC: a MAC protocol for adaptive antenna array based wireless ad hoc networks in multipath environments." *Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE*. Vol. 5. IEEE, 2004.
- 65.** Singh, A., P. Ramanathan, and B. Van Veen. "Spatial reuse through adaptive interference cancellation in multi-antenna wireless networks." *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM'05. IEEE*. Vol. 5. IEEE, 2005.
- 66.** Choudhury, Romit Roy, et al. "On designing MAC protocols for wireless networks using directional antennas." *Mobile Computing, IEEE Transactions on* 5.5 (2006): 477-491.

67. Takata, Masanori, Masaki Bandai, and Takashi Watanabe. "Performance analysis of a directional MAC protocol for location information staleness in MANETs." *Information and Media Technologies* 1.1 (2006): 652-661.
68. Nasipuri, Asis, et al. "A MAC protocol for mobile ad hoc networks using directional antennas." *Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. 2000 IEEE*. Vol. 3. IEEE, 2000.
69. Bao, Lichun, and J. J. Garcia-Luna-Aceves. "Transmission scheduling in ad hoc networks with directional antennas." *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2002.
70. Takai, Mineo, et al. "Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks." *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*. ACM, 2002.
71. Choudhury, Romit Roy, et al. "Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks." *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2002.
72. Choudhury, Romit Roy, et al. "Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks." *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2002.
73. Ramanathan, Ram, et al. "Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution." *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 23.3 (2005): 496-506.
74. Korakis, Thanasis, Gentian Jakllari, and Leandros Tassiulas. "A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks." *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*. ACM, 2003.
75. Jakllari, Gentian, Wenjie Luo, and Srikanth V. Krishnamurthy. "An integrated neighbor discovery and Mac protocol for ad hoc networks using directional antennas." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 6.3 (2007): 1114-1024.
76. Choudhury, Romit Roy, and Nitin H. Vaidya. "Deafness: A MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas." *Network Protocols, 2004. ICNP 2004. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on*. IEEE, 2004.
77. Nasipuri, Asis, et al. "A MAC protocol for mobile ad hoc networks using directional antennas." *Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. 2000 IEEE*. Vol. 3. IEEE, 2000.

78. Yang, Jun, Jiandong Li, and Min Sheng. "MAC protocol for mobile ad hoc network with smart antennas." *Electronics Letters* 39.6 (2003): 555-557.
79. Singh, Harkirat, and Suresh Singh. "Tone based MAC protocol for use with adaptive array antennas." *Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*. Vol. 2. IEEE, 2004.
80. Cardei, Ionut, and Sabera Kazi. "MAC layer QoS support for wireless networks of unmanned air vehicles." *System Sciences, 2004. Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on*. IEEE, 2004.
81. Mundarath, J. C., Parameswaran Ramanathan, and Barry D. Van Veen. "A cross layer scheme for adaptive antenna array based wireless ad hoc networks in multipath environments." *Wireless Networks* 13.5 (2007): 597-615.
82. Alshbatat, Abdel Ilah, and Liang Dong. "Performance analysis of mobile ad hoc unmanned aerial vehicle communication networks with directional antennas." *International Journal of Aerospace Engineering* 2010 (2011).
83. Λούγγος, Βασίλειος. "Τεχνικές μετάδοσης σε ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών: το πρωτόκολλο 802.11 a, ανάλυση και προσομοίωση." (2003).
84. Hasan Tareque, Md, Md Shohrab Hossain and Mohammed Atiquzzaman. "On the routing in Flying Ad Hoc Networks." *Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2015 Federated Conference on*. IEEE, 2015.
85. 85. Simulation Based Performance Evaluation of Mobile, Ad-Hoc Network Routing Protocols, Samir R.- Castaneda R.- Jiangtao T, Division of Computer Science- University of Texas, San Antonio- USA, 1998.
86. Hong, Xiaoyan, et al. "Scalable ad hoc routing in large, dense wireless networks using clustering and landmarks." *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*. Vol. 5. IEEE, 2002.
87. Hong, Xiaoyan, Kaixin Xu, and Mario Gerla. "Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks." *Network, IEEE* 16.4 (2002): 11-21.
88. Ευστάθιος Σταματάτος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου/ Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων/ Τμήμα Μεταπτυχιακών Σπουδών- Κατεύθυνση 5^η, Σημειώσεις μαθήματος «Ευφυή Συστήματα»- Τυφλή Αναζήτηση (Blind Search), 2015.
89. Ευστάθιος Σταματάτος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου/ Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων/ Τμήμα Μεταπτυχιακών Σπουδών- Κατεύθυνση 5^η, Σημειώσεις μαθήματος «Ευφυή Συστήματα»- Ευρετική Αναζήτηση (Heuristic Search), 2015.

90. Clausen, Thomas, et al. "Optimized link state routing protocol (OLSR)." (2003).
91. Pei, Guangyu, Mario Gerla, and Xiaoyan Hong. "LANMAR: landmark routing for large scale wireless ad hoc networks with group mobility." *Proceedings of the 1st ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*. IEEE Press, 2000.
92. Peters, Kevin, et al. "A geographical routing protocol for highly-dynamic aeronautical networks." *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2011 IEEE*. IEEE, 2011.
93. Ko, Young-Bae, and Nitin H. Vaidya. "Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks." *Wireless networks* 6.4 (2000): 307-321.
94. Basagni, Stefano, et al. "A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)." *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 1998.
95. Karp, Brad, and Hsiang-Tsung Kung. "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks." *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2000.
96. Iordanakis, Michael, et al. "Ad-hoc routing protocol for aeronautical mobile ad-hoc networks." *Fifth International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. 2006.
97. Sakhaee, Ehssan, Abbas Jamalipour, and Nei Kato. "Aeronautical ad hoc networks." *Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE*. Vol. 1. IEEE, 2006.
98. Tchakountio, Fabrice, and Ram Ramanathan. "Anticipatory routing for highly mobile endpoints." *Mobile Computing Systems and Applications, 2004. WMCSA 2004. Sixth IEEE Workshop on*. IEEE, 2004.
99. Tchakountio, Fabrice, and Ram Ramanathan. "Tracking highly mobile endpoints." *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia*. ACM, 2001.
100. Mahajan, Rahul. *Cross layer optimization: system design and simulation methodologies*. Diss. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.