

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ ΚΑΙ  
ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΠΜΣ: «Ευφυή Συστήματα»



Τίτλος Εργασίας:

«Εφαρμογές Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών στον Ηλεκτρονικό Πόλεμο –  
Επικοινωνία μεταξύ Σμήνους Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών και εντοπισμός  
Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών»

Αλέξανδρος Μπιτζής

Τριμελής Επιτροπή

Επιβλέπων Καθηγητής :Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΣΕ κ. Μιχαήλ Γαργαλάκος

Καθηγήτρια ΣΣΕ κ. Ειρήνη Καρανάσιου

Επίκουρος Καθηγητής ΜΠΔ κ. Ελευθέριος Δοϊτσίδης

Αθήνα, Ιούνιος 2022



Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Αλέξανδρου Μπιτζή, εγκρίνεται:

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Επιβλέπων Καθηγητής :**

**Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΣΕ κ. Μιχαήλ Γαργαλάκος**

**Καθηγήτρια ΣΣΕ κ. Ειρήνη Καρανάσιου**

**Επίκουρος Καθηγητής ΜΠΔ κ. Ελευθέριος Δοϊτσίδης**



Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων και Πολυτεχνείου Κρήτης.

Copyright © Αλέξανδρος Μπιτζής, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



## Περιεχόμενα

Πίνακας Εικόνων .....	6
Εισαγωγή.....	7
Abstract.....	9
Σκοπός.....	11
1. Μορφές Ηλεκτρονικού Πολέμου σε συνδυασμό με Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα .....	13
1.1. Τι είναι ο Ηλεκτρονικός Πόλεμος.....	13
1.2. Σύντομη Ιστορική Αναδρομή Επιχειρήσεων Ηλεκτρονικού Πολέμου .....	14
1.3. Μορφές Ηλεκτρονικού Πολέμου .....	16
1.3.1. Ηλεκτρονικά Μέτρα Υποστήριξης (Electronic Support Measures, ESM).....	17
1.3.2. Ηλεκτρονικά Αντίμετρα (Electronic Countermeasures, ECM) .....	18
1.3.3. Ηλεκτρονικά Μέτρα Προστασίας (Electronic protection measures, EPM) .....	21
1.4. Σύστημα Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (UAS) .....	23
1.4.1. Κατηγοριοποίηση ΣμηΕΑ .....	23
1.4.2. Αποστολές ΣμηΕΑ.....	25
1.4.3. Βασικά Μέρη Συστήματος Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....	26
1.4.4. ΣμηΕΑ στο σήμερα .....	33
2. Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης και Εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων.....	37
2.1. Τι είναι το Direction Finding .....	37
2.2. Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης Εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων.....	38
2.2.1. Angle Of Arrival (AOA) .....	39
2.2.2. Time of Arrival (TOA).....	40
2.2.3. Time Difference Of Arrival (TDOA).....	41
2.2.4. Frequency Difference Of Arrival (FDOA) .....	42
2.2.5. Received Signal Strength (RSS) .....	43
2.3. Κεραίες Εντοπισμού Θέσης .....	44
2.3.1. Κεραία Δίπολο .....	45
2.3.2. Κεραία Bow-Tie .....	46
2.3.3. Κεραία Πλαισίου (Βρόγχου).....	47
2.3.4. Κεραίες Φασικής Σύνθεσης .....	48
2.3.5. Κεραία Doppler .....	48
2.4. Εντοπισμός Θέσης μέσω ΜΕΑ .....	50
2.4.1 Δομή ενός ΜΕΑ με Συστήματα Εντοπισμού Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών .....	50



2.4.2 Εντοπισμός Εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων Μέσω Δικτύου Ασύρματων Αισθητήρων σε Σμήνος ΜΕΑ .....	52
3 Σύστημα Σμήνους Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....	57
3.1. Ανάλυση δομής Ευφυούς Συστήματος Σμήνους .....	57
3.2. Επικοινωνία μεταξύ Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων σε ένα Σμήνος.....	60
3.2.1 Αρχιτεκτονική σμήνους βασισμένη σε υποδομές .....	61
3.2.2 Αρχιτεκτονική σμήνους σε ad-hoc δίκτυο .....	62
3.2.3. Υλοποίηση ad-hoc αρχιτεκτονικής σμήνους με υποστήριξη επίγειων υποδομών .....	64
3.2.4. Αξιόπιστα οπτικά ασύρματα δίκτυα σε σμήνη UAV.....	66
3.2.5. Εντοπισμός θέσης με χρήση ηχητικών τεχνολογιών .....	69
3.2.5.1. Παθητικό ηχητικό σύστημα .....	70
3.2.5.2. Ενεργητικό ηχητικό σύστημα.....	73
3.3. Ασφάλεια Επικοινωνίας Σμήνους.....	74
3.4. Ερευνητικές Τάσεις και Μελλοντικοί Τομείς Έρευνας .....	75
4. Case Studies: Εφαρμογές Ευφυών Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....	77
4.1. Εντοπισμός ηλεκτρομαγνητικών πηγών εδάφους μέσω ενός ή περισσότερων Drone (Σμήνος Drone) .....	77
4.2. Αναχαίτιση Drones με άλλα Drones μέσω των RF εκπομπών τους .....	80
4.3. Μέτρηση διαγράμματος Ραντάρ από ΣμηΕΑ .....	83
4.4. Αποστολές Έρευνας και Διάσωσης (Search & Rescue – S&R) με Σμήνος ΜΕΑ .....	85
4.4.1. Εφαρμογή Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Σμήνους ΜΕΑ .....	85
4.4.2. Drone με έξυπνες κεραίες για εντοπισμό θυμάτων σε πληγμένες από καταστροφές περιοχές .....	86
Επίλογος.....	89
Βιβλιογραφία .....	90
Άλλες Πηγές .....	94



## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1. Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα [1].....	14
Εικόνα 1.2. Δραστηριότητες Ηλεκτρονικού Πολέμου [3].....	15
Εικόνα 1.3. Ρώσικος σταθμός SPN-30 θορύβου αντι-ραντάρ [3].....	17
Εικόνα 1.4. Blighter Surveillance Systems, 2015, Anti-UAV Defence System (AUDS) Unveiled by Trio of British Technology Companies [4].....	18
Εικόνα 1.5. Φωτοβολίδες από C-130 [3].....	18
Εικόνα 1.6. Συρόμενο Δόλωμα [3].....	18
Εικόνα 1.7. Chinese Mi-17 IR παρεμβολέας [3].....	18
Εικόνα 1.8. Κατηγοριοποίηση MEA [5].....	22
Εικόνα 1.9. Σύστημα UAV – Δομή λειτουργίας [6].....	25
Εικόνα 1.10. EuroHawk [7].....	32
Εικόνα 1.11. The Mucke electronic countermeasures (ECM) UAV[8].....	32
Εικόνα 1.12. Εικόνα 1.12. Elbit Systems Hermes 450 [9].....	32
Εικόνα 1.13. IAI Heron (Machatz-1) [10].....	33
Εικόνα 1.14. Predator MQ9-1B[11].....	33
Εικόνα 1.15. Πήγασος II [12].....	34
Εικόνα 2.1 Εντοπισμός θέσης με προσέγγιση νοητών γραμμών [16].....	37
Εικόνα 2.2. Εντοπισμός θέσης με μέθοδο TOA [20].....	38
Εικόνα 2.3. Εκτίμηση θέσης με μέθοδο TDOA [15].....	39
Εικόνα 2.4. Εκτίμηση θέσης με μέθοδο FDOA [15].....	40
Εικόνα 2.5 Ισχύς λαμβανόμενου Σήματος σε διάφορες αποστάσεις από τον πομπό [15].....	41
Εικόνα 2.6. i) Τρεις βρόγχοι και τρία δίπολα που έχουν συσχετιστεί μεταξύ τους ii) Τρεις κατανεμημένοι βρόχους και τρία κατανεμημένα δίπολα.[13].....	42
Εικόνα 2.7. Κεραία Διπόλου [21].....	44
Εικόνα 2.8 Κεραία Bow Tie [21].....	45
Εικόνα 2.9 Κεραίες πλαισίου [21].....	46
Εικόνα 2.10. Εύρεση Κατεύθυνσης μέσω Doppler [15].....	47
Εικόνα 2.11 Λειτουργική Δομή Αυτόματου Πιλότου ενός MEA [35].....	49
Εικόνα 2.12 Τροποποιημένος Κόμβος - Αισθητήρας για βελτιωμένες πολυκατευθυντικές μετρήσεις RSS [36].....	51
Εικόνα 2.13 Αισθητήρες - Δέκτες σε σχηματισμό "Διαμάντι" γύρω από τον Πομπό [36].....	52
Εικόνα 2.14 Σχηματισμός Δεκτών Αισθητήρων [36].....	53
Εικόνα 2.15 Εντοπισμός Πομπού με συνεργασία επίγειων και εναέριου αισθητήρα [36].....	54
Εικόνα 3.1. Οι σχέσεις μεταξύ των επιπέδων [32].....	586
Εικόνα 3.2. Διάγραμμα hardware και ελέγχου ενός MEA [22].....	58
Εικόνα 3.3. Infrastructure based swarm architecture [22].....	60
Εικόνα 3.4. Flying ad-hoc network (FANET) architecture [22].....	61
Εικόνα 3.5. Ad-hoc network realized through infrastructure support architecture [22].....	63
Εικόνα 3.6. Ανταλλαγή δεδομένων σμήνους με UAV με σταθμό επιτήρησης [24].....	64
Εικόνα 3.7. Σχηματισμοί Σμήνους MEA [24].....	65
Εικόνα 3.8. Σχηματικό διάγραμμα παθητικού συστήματος μέτρησης ήχου (αριστερά) και drone με συστοιχία μικροφώνων (δεξιά) [25].....	68
Εικόνα 3.9. Σχηματικό διάγραμμα ενεργητικού συστήματος μέτρησης ήχου [25].....	71
Εικόνα 4.1. Συστοιχία κεραιών σε MEA για την εύρεση κατεύθυνσης σήματος [26].....	76
Εικόνα 4.2. Κεραία drone-στόχου (αριστερά). Μια από τις δύο κεραίες του drone-ανιχνευτή υπό κατασκευή (δεξιά).[27].....	79
Εικόνα 4.3. Τετρακόπτρο σε πτήση κατά την διάρκεια APM.[28].....	82
Εικόνα 4.4. Αρχιτεκτονική επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης Ανθρώπου - Drone [29].....	83
Εικόνα 4.5. Διαδικασία έρευνας και εντοπισμού θυμάτων σε μία περιοχή που έχει υποστεί καταστροφή [30].....	86



## Εισαγωγή

Τα Μη Επανδρωμένα Οχήματα (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) η αλλιώς Μη Επανδρωμένα Εναέρια Συστήματα (Unmanned Aerial Systems - UAS) έχουν παρουσιάσει ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια καθώς εγείρουν το ενδιαφέρον για διάφορα ερευνητικά προγράμματα. Η πληθώρα συστημάτων που φέρουν, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών όπως μηχανική μάθηση, τεχνολογίες υπολογιστικής νοημοσύνης, η ασαφής λογική, τα νευρωνικά δίκτυα και γενικότερα τα συστήματα αυτόματου ελέγχου έχουν καταστήσει τα μη επανδρωμένα συστήματα ευφυή. Γι' αυτό το λόγο η ανάπτυξη των εφαρμογών τους σε κάθε τομέα, τόσο πολιτικό όσο και στρατιωτικό στην ζωή του ανθρώπου είναι ραγδαία καθώς μας δίνει την δυνατότητα να εκτελέσουμε διάφορες αποστολές με ελάχιστη ή ακόμα και χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα.

Όπως εύκολα μπορεί να αντιληφθεί κανείς η ανάπτυξη και η χρήση τέτοιου είδους ευφυών συστημάτων στο σύγχρονο στρατιωτικό περιβάλλον θεωρείται κάτι περισσότερο από αναγκαία καθώς η σύγχρονη μορφή πολέμου έχει αλλάξει άρδην τον τελευταίο αιώνα ακολουθώντας την ροή των τεχνολογικών εξελίξεων. Ο ολοκληρωτικός αγώνας που βασίζεται στην πλήρη καταστροφή του αντιπάλου έχει δώσει την θέση του στον δικτυοκεντρικό πόλεμο στον οποίο εξέχοντα θέση έχουν οι πληροφοριακές επιχειρήσεις και η προσβολή του συστήματος διοίκησης και ελέγχου του αντιπάλου με σκοπό την αποδιοργάνωση του και την προσβολή στόχων ζωτικής σημασίας. Με την χρήση μη επανδρωμένων συστημάτων σε συνδυασμό με διάφορες εφαρμογές ηλεκτρονικού πολέμου ή διαφόρων οπλικών συστημάτων μειώνεται τόσο το κόστος σε ανθρώπινες ζωές όσο και το οικονομικό κόστος καθώς η κατασκευή τους είναι σαφώς φθηνότερη από ένα επανδρωμένο μαχητικό αεροσκάφος ή ένα επίγειο μέσο Ηλεκτρονικού Πολέμου ή Ηλεκτρονικής Επιτήρησης.

Μια συγκεκριμένη τεχνολογία που προορίζεται να κλιμακώσει αυτό το έντονο ενδιαφέρον στον ερευνητικό τομέα είναι το σμήνος UAV (Drone Swarms). Το σμήνος UAV έχει τη δυνατότητα να διανέμει εργασίες και να συντονίζει τη λειτουργία πολλών UAV με ελάχιστη ή καθόλου παρέμβαση χειριστή. Οι δυνατότητες αυτών των συστημάτων στις στρατιωτικές εφαρμογές έχουν γίνει ήδη φανερές καθώς έχουν



εφαρμοστεί σε τακτικό επίπεδο με μεγάλη επιτυχία. Όπως αναφέρει ο MAJ Andrew William Sanders τον Ιούλιο του 2014, οι Ρώσοι χρησιμοποίησαν πολλά drone για να επιτηρήσουν δύο Ουκρανικά μηχανοκίνητα τάγματα, επιτρέποντας τους να τα στοχοποιήσουν με πυροβολικό μεγάλης εμβέλειας καθιστώντας και τα δύο αυτά τάγματα αναποτελεσματικά σε μόλις τρία λεπτά. Τον Μάρτιο του 2015, το Defense Advanced Research Project's Agency (DARPA) ανακοίνωσε την ανάπτυξη μιας προσέγγισης «του συστήματος των συστημάτων» που χρησιμοποιεί πολλά αεροσκάφη χαμηλού κόστους για να καταστρέψει τον εχθρό. Τον Αύγουστο του 2015, το Advanced Robotic Systems Engineering Laboratory (ARSENL) εκτόξευσε με επιτυχία ένα σμήνος πενήντα drone που ελεγχόταν από έναν χειριστή. Τον Οκτώβριο του 2016, το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ εκτόξευσε 103 αυτόνομα drone που δημιούργησαν ένα σμήνος ικανό για λήψη αποφάσεων, προσαρμογή και αυτόνομη προστασία. Το ναυτικό των ΗΠΑ έχει δοκιμάσει την τεχνολογία Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle Technology (LOCUST) ικανή να εκτοξεύσει τριάντα αυτόνομα αεροσκάφη που έχουν προγραμματιστεί για να επικοινωνούν μεταξύ τους και να επιτίθενται στον αντίπαλο, παραλύοντας έτσι την άμυνα του. Παρόμοια προγράμματα έχει και η Πολεμική Αεροπορία και ο Στρατός των ΗΠΑ.





## Abstract

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) or Unmanned Aerial Systems (UAS) have shown rapid technological development in recent years as the interest has been increased in various research projects. The variety of systems combined with the development of new technologies such as machine learning, computational intelligence, fuzzy logic, neural networks and automatic control systems have made the unmanned systems intelligent. That is why the development of their applications in every field, both political and military is rapid and allows us to perform various missions with minimal or even without the intervention of the human factor.

The development and the usage of the intelligent systems in the modern military environment is considered more than necessary as the modern form of war has changed dramatically in the last century following the flow of technological developments. The war based on the complete destruction of the enemy has been converted to the net-centric war in which the informational operations and the attack on the command and control system of the enemy in order to disorganize him are very crucial. The use of unmanned systems in combination with various electronic warfare applications or various weapons systems reduces both the losses of human life and the financial cost as their construction is significantly cheaper than a manned fighter aircraft or a ground system of Electronic Warfare or Electronic Surveillance.

A specific technology with increasing interest in the research field is the UAV Swarms (Drone Swarms). The UAV Swarms has the ability to distribute tasks and coordinate the operation of many UAVs with little or no operator intervention. The capabilities of these systems in military applications have already become obvious as they have been used on a regular basis with great success.

According to MAJ Andrew William Sanders in July 2014, the Russians used several drones to spy two Ukrainian motorized battalions, allowing the Russians to target them with long-range artillery, rendering both Ukrainian battalions ineffective in just three minutes. In March 2015, the Defense Advanced Research Project's Agency



(DARPA) announced the development of a “system of systems” that uses many low-cost aircraft to destroy the enemy. In August 2015, the Advanced Robotic Systems Engineering Laboratory (ARSENL) successfully launched a swarm of fifty drone controlled by a pilot. In October 2016, the US Department of Defence launched 103 autonomous drones that created a swarm capable of decision-making, adaptation and autonomous protection. The U.S. Navy has tested Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle Technology (LOCUST) capable of launching thirty autonomous aircraft designed to communicate with each other and attack the enemy with a swarm of cheap, disposable drones, paralyzing his defence. The US Air Force and the Army have similar programs.



## Σκοπός

Σκοπός την παρούσας εργασίας είναι η έρευνα και η μελέτη των διαφόρων εφαρμογών που μπορούν να αναπτυχθούν με αυτόνομα μη επανδρωμένα συστήματα ή σμήνη μη επανδρωμένων συστημάτων και συγκεκριμένα εφαρμογών ηλεκτρονικού πολέμου που αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την επίτευξη πολλών πλεονεκτημάτων στον δικτυοκεντρικό πόλεμο. Ακόμα θα μελετηθεί εκτενέστερα ο εντοπισμός ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, που μπορεί να αποτελέσει πολλαπλασιαστή ισχύος μίας δύναμης καθώς μπορεί να φανερώσει την ηλεκτρομαγνητική διάταξη του αντιπάλου στοχοποιώντας την.

Για να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με εφαρμογές Ηλεκτρονικού Πολέμου σε ΣμηΕΑ και κατ' επέκταση σε Σμήνος ΣμηΕΑ θα πρέπει να μελετηθούν ξεχωριστά τα διάφορα υποσυστήματα του συστήματος. Αν μπορούσαμε να τα χωρίσουμε νοητά σε τρεις μεγάλες κατηγορίες ,θα ήταν οι εξής. α) Ο Ηλεκτρονικός Πόλεμος και τα μέσα που απαιτούνται για να επιτευχθεί, β) το ΣμηΕΑ που θα φέρει το ωφέλιμο φορτίο μέσω του οποίου θα επιτευχθούν οι αποστολές του Ηλεκτρονικού Πολέμου και τέλος ,σε περίπτωση σμήνους ,γ) η επικοινωνία μεταξύ των αεροσκαφών του σμήνους. Έτσι στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας θα γίνει αναφορά στον Ηλεκτρονικό Πόλεμο αναλύοντας τις διάφορες πτυχές του μέσα από ενέργειες και μέσα Ηλεκτρονικού Πολέμου. Ακόμα θα μελετηθούν τα ΣμηΕΑ. Θα αναλυθούν τα επιμέρους υποσυστήματα που αποτελούν ένα ΣμηΕΑ και θα γίνει μία σύντομη αναφορά στα σύγχρονα ΣμηΕΑ. Το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο πραγματεύεται τον εντοπισμό Εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων (Direction Finding). Γι' αυτό τον λόγο γίνεται μελέτη των διαφόρων μεθόδων με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί αυτό καθώς και των διάφορων κεραιών που απαιτούνται μιας και το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου που μπορεί να φέρει ένα ΣμηΕΑ για τον Εντοπισμό Εκπομπής Ραδιοσυχνοτήτων είναι περιορισμένο. Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μελέτη των διαφόρων τρόπων επικοινωνίας μεταξύ των ΣμηΕΑ ενός σμήνους καθώς αυτό αποτελεί νευραλγικό παράγοντα για την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ τους ιδιαίτερα σε ένα στρατιωτικό θέατρο επιχειρήσεων καθώς στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον θα είναι πολύ επιβαρυνόμενο. Τέλος στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο



γίνεται αναφορά σε κάποιες «ευφυείς» εφαρμογές ΣμηΕΑ που έχουν αναπτυχθεί (όπως έρευνα σχετικά με τον εντοπισμό ηλεκτρομαγνητικών πηγών εδάφους από ΣμηΕΑ, εντοπισμός και αναχαίτιση drone από άλλο drone, αποστολές έρευνας και διάσωσης , εντοπισμός ραντάρ μέσω μέτρησης του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας με ΣμηΕΑ.) που μπορούν να αποτελέσουν εφαλτήριο και πηγή έμπνευσης για περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα πάνω στα συστήματα αυτά προσφέροντας πολλά πλεονεκτήματα στον τομέα των ΣμηΕΑ και των εφαρμογών Ηλεκτρονικού Πολέμου.

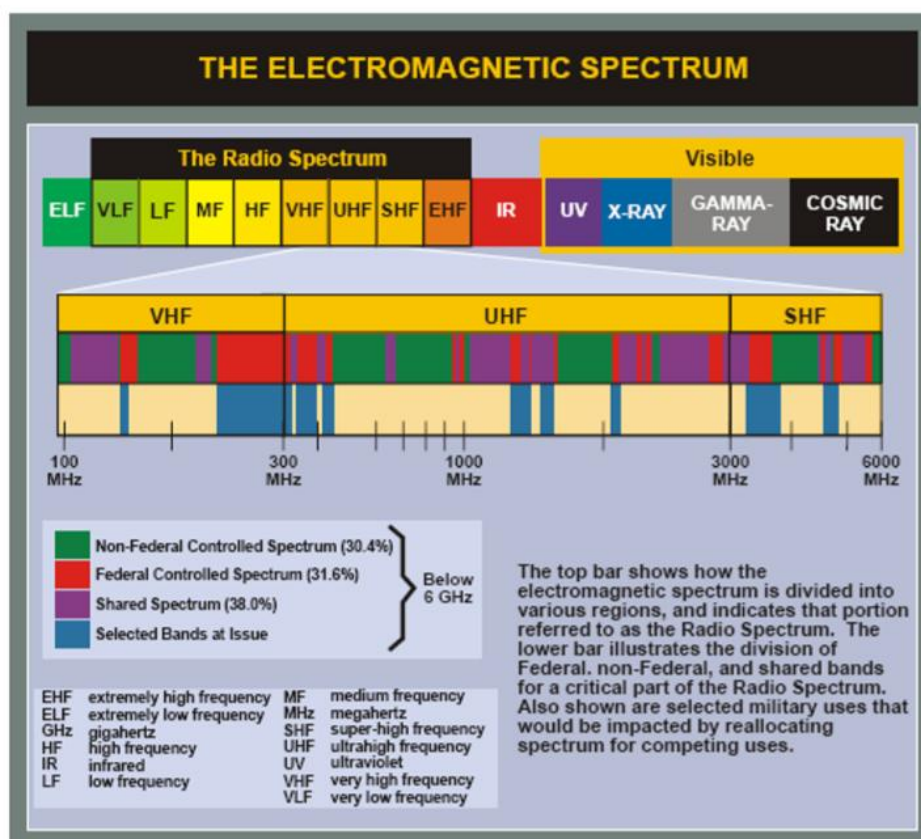


## 1. Μορφές Ηλεκτρονικού Πολέμου σε συνδυασμό με Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα

### 1.1. Τι είναι ο Ηλεκτρονικός Πόλεμος

Με τον όρο Ηλεκτρονικός Πόλεμος (ΗΠ) εννοούμε την παρεμπόδιση της χρήσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από τον εχθρό και την εξασφάλιση της ανεμπόδιστης χρήση μέρους του από τις φίλιες δυνάμεις με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών. Διεξάγεται από αέρα, στεριά, θάλασσα και διάστημα με επανδρωμένα ή μη επανδρωμένα συστήματα. Χρησιμοποιούνται επιθετικές ή αμυντικές τακτικές σε επιχειρήσεις που περιλαμβάνουν αναγνώριση, άρνηση, εξαπάτηση, παρεμβολή, υποβάθμιση, προστασία και καταστροφή.[1] Πλέον το σημερινό πεδίο μάχης είναι ηλεκτρονικά πιο περίπλοκο και απαιτεί περισσότερες ηλεκτρονικές δυνατότητες από την απλή ανίχνευση εχθρικών εκπομπών. Οι στρατιωτικές επιχειρήσεις προγραμματίζονται και εκτελούνται σε ένα έντονα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για στρατιωτικούς όσο και για πολιτικούς σκοπούς όπως πλοήγηση, επικοινωνία, αποθήκευση και επεξεργασία πληροφοριών καθώς και ανίχνευση αυτών. Η χρήση και η εκμετάλλευση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος έχει καταστεί ζωτικής σημασίας για τις στρατιωτικές μονάδες καθώς ο Ηλεκτρονικός πόλεμος αποτελεί σημαντικό πυλώνα των πληροφοριακών επιχειρήσεων.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα:



Εικόνα 1.1. Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα [1]

## 1.2. Σύνοψη Ιστορική Αναδρομή Επιχειρήσεων Ηλεκτρονικού Πολέμου

Η ιστορία του Ηλεκτρονικού Πολέμου ξεκινά από το 1861 στον εμφύλιο πόλεμο των ΗΠΑ. Μετά την εφεύρεση του τηλεγράφου από τον Samuel F.B. Μορς το 1837, η τηλεγραφία έγινε το κύριο μέσο επικοινωνίας. Τα καλώδια χερσαίας μετάδοσης εξαπλώθηκαν. Με την έλευση του εμφυλίου πολέμου το 1861, επομένως, τα καλώδια τηλεγραφίας έγιναν ένας από τους σημαντικότερους στόχους για το ιππικό. Το ομοσπονδιακό ιππικό άλλαξε τη στρατιωτική τηλεγραφική κίνηση σε λάθος προορισμούς, έστειλε ψευδείς παραγγελίες σε διοικητές της Ένωσης και



έκοψε τα καλώδια για να αρνηθούν πληροφορίες στις δυνάμεις της Ένωσης [2]. Το ιππικό και των δύο πλευρών προσπάθησε να διαταράξει την ικανότητα της άλλης πλευράς να χρησιμοποιεί αποτελεσματική επικοινωνία. Αυτές οι τακτικές είναι τα πρώτα παραδείγματα μέτρων ΗΠ αν και δεν είναι ακριβή παραδείγματα ΗΠ καθώς ο τηλεγράφος δεν εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Παρ'όλα αυτά αποτελούν σημαντικές τακτικές που σχετίζονται με τις σύγχρονες τακτικές ΗΠ.

Το 1906, το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ εγκατέστησε τον πρώτο εντοπιστή κατεύθυνσης (DF) σε ένα πλοίο για δοκιμή αλλά η δεδομένη συσκευή είχε περιορισμένη ικανότητα . Στον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, πολλά έθνη χρησιμοποίησαν ραδιοφωνικές παρεμβολές. Στις αρχές του 1915, το Βασιλικό Ναυτικό έχτισε μια αλυσίδα σταθμών DF κατά μήκος της ανατολικής ακτής της Αγγλίας με σκοπό τον εντοπισμό πλοίων ή αεροσκαφών με τα στίγμα τους [2].

Η πρώτη αποστολή ηλεκτρονικής συλλογής πληροφοριών (ELINT, -electronic intelligence) πραγματοποιήθηκε το 1939. Ο Γερμανός Graf Zeppelin πραγματοποίησε αποστολή ELINT ενώ πετούσε πάνω από την ανατολική ακτή της Αγγλίας. Παρακολούθησε, κατέγραψε και αξιολόγησε την πιθανή απειλή ακτινοβολίας για τη Γερμανική Πολεμική Αεροπορία.

Το ξέσπασμα του Β 'Παγκοσμίου Πολέμου βρήκε τις ΗΠΑ να πειραματίζονται και να αναπτύσσουν νέο εξοπλισμό: ραντάρ, συστήματα εύρεσης κατεύθυνσης υψηλής συχνότητας (HFDF) και συσκευές κατά της παρεμβολής ( η μάχη των ακτίνων όπως ανέφερε ο Τσώρτσιλ)

Κατά τον Πόλεμος των 6 ημερών (Αραβο-Ισραηλινός πόλεμος) γίνονται εύκολα κατανοητά τα πλεονεκτήματα του Ηλεκτρονικού Πολέμου με την ηλεκτρονική επίθεση των Ισραηλινών σε radar Αιγυπτίων πριν την έναρξη των επιχειρήσεων καθώς και με την παραπλάνηση Αιγυπτίων πιλότων από Ισραηλινούς που μίλαγαν αραβικά. Λίγα χρόνια αργότερα ο πόλεμος στον Περσικό κόλπο χαρακτηρίστηκε ως ο 1ος Ηλεκτρονικός πόλεμος λόγω της εκτεταμένης χρήσης τεχνικών ΗΠ.

Τέλος κατά την επίθεση στην Σερβία από το NATO χρησιμοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα μέσα ΗΠ. Ταυτόχρονα και οι Σέρβοι χρησιμοποίησαν επιτυχημένα τεχνικές θερμικής παραπλάνησης.



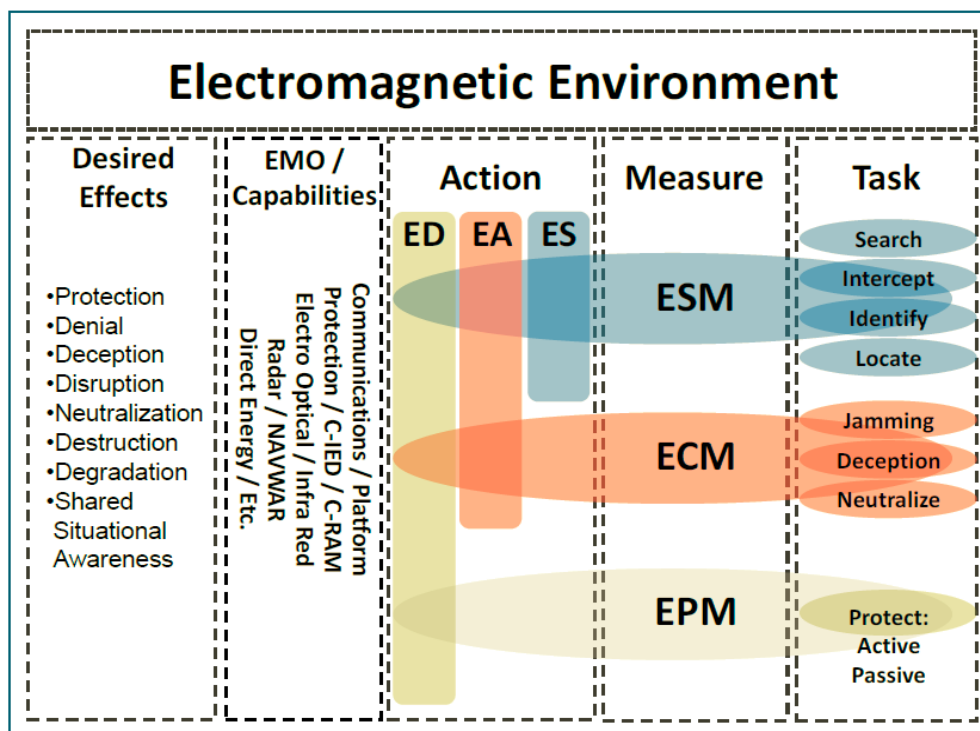
Τα παραπάνω αποτελούν μερικά από τα παραδείγματα εφαρμογών Ηλεκτρονικού Πολέμου κατά το ρου της Ιστορίας παρουσιάζοντας την μεγάλη και νευραλγική σημασία τους .Στην συνέχεια θα αναλυθούν οι σύγχρονες μορφές που έχει πάρει ο Ηλεκτρονικός Πόλεμος και διάφορα μέτρα για την επίτευξη του.

### 1.3. Μορφές Ηλεκτρονικού Πολέμου

Ο Ηλεκτρονικός Πόλεμος διακρίνεται σε τρεις κύριες υποκατηγορίες δραστηριοτήτων οι οποίες θα αναλυθούν εν συντομία στην συνέχεια[2]:

1. **Η ηλεκτρονική επίθεση (EA)** χρησιμοποιείται για να υποβαθμίσει/ αδρανοποιήσει/ παραπλανήσει ή και καταστρέψει τις δυνατότητες διοίκησης και ελέγχου του αντιπάλου (C2=Command and Control) και να μην του επιτρέψει να αξιοποιήσει το επιχειρησιακό περιβάλλον.
2. **Η ηλεκτρονική άμυνα (ED)** κυρίως χρησιμοποιείται για την προστασία του προσωπικού, των σχηματισμών, των συστημάτων και των περιοχών όταν διεξάγει αντίστοιχη επίθεση ο αντίπαλος. Η ηλεκτρονική άμυνα πρωτίστως διασφαλίζει την προστασία των στρατευμάτων, αλλά και του αντίστοιχου τεχνολογικού τους εξοπλισμού έναντι ηλεκτρονικής παρακολούθησης, εκούσιων και ακούσιων παρεμβολών και πυραυλικών επιθέσεων του αντιπάλου (πύραυλοι κατευθυνόμενοι είτε από ραντάρ είτε από IR είτε από LASER).
3. **Η ηλεκτρονική επιτήρηση (ES)** εστιάζεται στην παροχή άμεσης εικόνας για την τακτική κατάσταση στο πεδίο της μάχης (π.χ. μέσω της χρήσης των κατάλληλων αισθητήρων επιτηρείται η επιχειρησιακή δραστηριότητα του εχθρού).





Εικόνα 1.2. Δραστηριότητες Ηλεκτρονικού Πολέμου [3]

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα οι δραστηριότητες Ηλεκτρονικού Πολέμου επιτυγχάνονται με συγκεκριμένα μέτρα Ηλεκτρονικού πολέμου[1,2,3].

### 1.3.1. Ηλεκτρονικά Μέτρα Υποστήριξης (Electronic Support Measures, ESM)

**Τα Ηλεκτρονικά μέτρα υποστήριξης (ESM)** είναι εκείνος ο κλάδος του ΗΠ που εμπλέκεται στην αναζήτηση, παρακολούθηση, υποκλοπή και ταυτοποίηση των Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών και στην προσπάθεια εντοπισμού των πηγών τους προκειμένου να αναγνωριστούν άμεσα οι οποιεσδήποτε απειλές. Τα μέτρα ηλεκτρονικής υποστήριξης παρέχουν μια σειρά πληροφοριών που επιτρέπουν την άμεση λήψη αποφάσεων για εφαρμογή ηλεκτρονικών αντιμέτρων, ηλεκτρονικών μέτρων προστασίας και άλλων τακτικών ενεργειών. Σκανάρουν όλο το φάσμα και αναλύουν οποιαδήποτε πιθανή Η/Μ εκπομπή του εχθρού εντοπίζοντας διάφορες παραμέτρους των οπλικών συστημάτων του εχθρού (π.χ. συχνότητα, ο τύπος



διαμόρφωσης η τοποθεσία του πομπού). Παράλληλα μπορεί και να υποκλέψουν πληροφορίες από επικοινωνίες του εχθρού.

Τελικός στόχος είναι:

- Η λήψη ηλεκτρονικών αντιμέτρων έναντι εχθρικών απειλών ή να αναληφθεί μία ηλεκτρονική επίθεση.
- Η λήψη ηλεκτρονικών μέτρων αυτοπροστασίας.
- Η δημιουργία μιας βάση πληροφοριών μάχης που θα ανανεώνεται συνεχώς.
- Η επιβεβαίωση πληροφοριών που έχουν ληφθεί από άλλες πηγές.
- Η υποστήριξη επιχειρήσεων λήψης περαιτέρω πληροφοριών.
- Η παροχή πληροφοριών στόχευσης σε διάφορα συστήματα μάχης (συστοιχίες πυροβολικού, συστοιχίες αεράμυνας, μαχητικά καταστολής εχθρικής αεράμυνας κλπ.)

Ο προειδοποιητικός δέκτης ραντάρ (RWR-Radar-Warning-Receiver) είναι το καλύτερο παράδειγμα συσκευής ESM. Παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τα συστήματα ραντάρ του εχθρού, τα οποία είναι δυνητικά θανατηφόρα για τις φιλικές δυνάμεις και επιτρέπει στον πιλότο να αναλάβει άμεση δράση ενάντια στην εισερχόμενη απειλή.

Η πιο βασική λειτουργία που επιτελούν οι συσκευές ESM είναι της εύρεσης κατεύθυνσης (DF-direction finding). Θα γίνει ευρύτερη ανάλυση αυτής της διαδικασίας σε επόμενο κεφάλαιο καθώς η εφαρμογή αυτών των διαδικασιών μέσω MEA η σμήνους MEA μπορεί να μας αποφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

### 1.3.2. Ηλεκτρονικά Αντίμετρα (Electronic Countermeasures, ECM)

Τα **Ηλεκτρονικά Αντίμετρα (Electronic countermeasures, ECM)** είναι η πραγματοποίηση εκείνων των ενεργειών στο Η/Μ φάσμα που δεν θα επιτρέψουν ή θα μειώσουν την ικανότητα του εχθρού να χρησιμοποιήσει τα διαθέσιμα ηλεκτρονικά μέσα του για έλεγχο και διοίκηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με παρεμβολή



(jamming), δηλαδή την σκόπιμη εκπομπή ακτινοβολίας, ή επανακτινοβολία ή ανάκλαση Η/Μ κύματος με συχνότητα ίδια με αυτή που λαμβάνει ο δέκτης του αντιπάλου. Στόχος η παρεμπόδιση της χρήσης των ηλεκτρονικών, συσκευών, του εξοπλισμού και συστημάτων που χρησιμοποιεί ο αντίπαλος. Οι κατηγορίες των Ηλεκτρονικών Αντιμέτρων είναι οι εξής:

1. **Άρνηση υπηρεσιών.** Επιτυγχάνεται κυρίως με την παρεμβολή και ενδεχομένως τη φυσική επίθεση σε όλους τους στόχους ηλεκτρομαγνητικής εκπομπής. Η παρεμβολή επιτυγχάνεται είτε με την παρεμπόδιση του εκπεμπόμενου σήματος είτε με την εκπομπή αντι-σήματος ισχυρής ενέργειας στην περιοχή εμβέλειας του στόχου – πομπού.

2. **Παραπλάνηση.** Περιλαμβάνει εκείνες τις ενέργειες που σκοπό έχουν την παραπλάνηση του εχθρού ή των ηλεκτρονικών συστημάτων που διαθέτει (π.χ. εκπομπή παραπλανητικών μηνυμάτων, ψυχολογική προπαγάνδα).

3. **Εκμετάλλευση.** Περιλαμβάνει το σύνολο των ενεργειών που αξιοποιούν τις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές του εχθρού προς όφελος των φίλιων δυνάμεων (π.χ. υποκλοπές)

4. **Αδρανοποίηση.** Περιλαμβάνει την χρήση όπλων κατευθυνόμενης ενέργειας (Directed Energy weapons) προκειμένου να καταστραφούν ή προσωρινά να αχρηστευτούν ή να μειωθεί η μαχητική ικανότητα των ηλεκτρονικών μέσων του αντιπάλου.

## ΕΠΙΘΕΤΙΚΑ ΑΝΤΙΜΕΤΡΑ

Διεξάγονται από τις φίλες δυνάμεις και περιλαμβάνουν τα εξής[3]:



Εικόνα 1.3. Ρώσικος σταθμός SPN-30 θορύβου αντι-ραντάρ [3]

- Παρεμβολή στα συστήματα διοίκησης και ελέγχου του εχθρού (C2), ή στα συστήματα radar
- Καταστολή εχθρικής αεράμυνας με χρήση πυραύλων αντί-radar,
- Χρήση τεχνικών ηλεκτρονικής παραπλάνησης για να προκληθεί σύγχυση στα συστήματα ISR του εχθρού



(ISR=Identification (ανίχνευση) Surveillance (επιτήρηση) Reconnaissance (αναγνώριση)

•Χρήση όπλων κατευθυνόμενης ενέργειας για την εξουδετέρωση των ηλεκτρονικών μέσων του εχθρού.



Εικόνα 1.4. Blighter Surveillance Systems, 2015, Anti-UAV Defence System (AUDS) Unveiled by Trio of British Technology Companies [4]

## ΑΜΥΝΤΙΚΑ ΑΝΤΙΜΕΤΡΑ

Χρησιμοποιείται το Η/Μ φάσμα για να προστατευτεί το προσωπικό και ο τεχνολογικός του εξοπλισμός. Αφορούν μέτρα αυτοπροστασίας και μέτρα προστασίας του συνόλου των δυνάμεων και είναι:



Εικόνα 1.5. Φωτοβολίδες από C-130 [3]

- αναλώσιμα (πχ., φωτοβολίδες, αερόφυλλα και ενεργά δολώματα (decoys),
- παρεμβολείς,
- Συρόμενα δολώματα,



Εικόνα 1.6. Συρόμενο Δόλωμα [3]

•IR συστήματα αντιμέτρων,

•Αντίμετρα έναντι αυτοσχέδιων μηχανισμών που πυροδοτούνται ασύρματα .



Εικόνα 1.7. Chinese Mi-17 IR παρεμβολέας [3]



### 1.3.3. Ηλεκτρονικά Μέτρα Προστασίας (Electronic protection measures, EPM)

Τα Ηλεκτρονικά Μέτρα Προστασίας (EPM - Electronic protection measures) είναι τεχνικές που προσπαθούν να μειώσουν ή να εξαλείψουν τις επιπτώσεις των ηλεκτρονικών αντίμετρων.

Σκοπός των Ηλεκτρονικών Μέτρων Προστασίας είναι να αντιμετωπίζουν με επάρκεια το σύνολο των μη χρήσιμων σημάτων και να αναδεικνύουν με αδιαμφισβήτητο τρόπο την πραγματική πληροφορία. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας ένα πλήθος παραμέτρων των εχθρικών εκπομπών προκειμένου να αξιολογηθούν σωστά εν τέλει τα εχθρικά σήματα και να αποφασιστεί εάν αυτά είναι πραγματικά ή όχι. Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι η συχνότητα εκπομπής, η ισχύς εκπομπής, το PRF(Pulse Repetition Frequency) εάν αναφερόμαστε σε radar, η κατεύθυνση της εκπομπής κλπ. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται θα αναφερθούν αναλυτικά πιο κάτω, αλλά εκείνο που πρέπει να γίνει κατανοητό είναι ότι ο εντοπισμός στόχων σε ένα θορυβώδες περιβάλλον είναι τεχνικά δύσκολος και όσο μεγαλώνει η ευαισθησία του συστήματος εντοπισμού τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα να εντοπίζονται και μη πραγματικοί στόχοι. Εξειδικεύοντας τις παραπάνω γενικές κατευθύνσεις μπορούν να αναφερθούν οι εξής ενέργειες που πρέπει να υλοποιούνται:

1. Χρησιμοποίηση ασφαλών (secure) καναλιών ή κωδικών αν είναι διαθέσιμα.
2. Συχνή αλλαγή συχνοτήτων για να δυσχεραίνεται ο εχθρός στον εντοπισμό και στην παρακολούθηση των φίλιων εκπομπών.
3. Έλεγχος αυθεντικότητας των εκπομπών για να αποτρέπεται η Μιμητική Ηλεκτρονική Εξαπάτηση.
4. Χρήση εναλλακτικών μέσων επικοινωνίας εφόσον είναι διαθέσιμα (π.χ. οπτικά).
5. Ελαχιστοποίηση των χρόνων εκπομπής.
6. Δυνατότητα εξαπάτησης και συγκεκριμένα Υποκριτικής Ηλεκτρονική Εξαπάτησης .



7. Εάν αναγνωρισθεί κάποια ηλεκτρονική παρεμβολή δεν πρέπει να υπάρξει καμία αναφορά σε αυτήν μέσω των τυπικών καναλιών επικοινωνίας γιατί έτσι θα επιβεβαιώσει ο εχθρός την επιτυχία της επιχείρησής του.

Άλλη μία εξαιρετικής σημασίας προστατευτική ενέργεια θεωρείται η ορθολογική χρήση των ασύρματων εκπομπών για την ασφάλεια των επικοινωνιών (COMSEC) Πρέπει να αποτρέπεται η χρήση των ασύρματων δίαυλων από μη εξουσιοδοτημένο προσωπικό καθώς και η άσκοπη χρήση του από το εξουσιοδοτημένο γιατί έτσι παρέχονται στον εχθρό κρίσιμες πληροφορίες όπως:

1. Αποκάλυψη της τιμής της συχνότητας, των χαρακτηριστικών κλήσης, καθώς και του σκοπού για τον οποίο χρησιμοποιείται η συχνότητα αυτή.

2. Εξοικείωση του εχθρού με τα χαρακτηριστικά της φωνής των χειριστών του δικτύου, οπότε και γίνεται πιο εύκολη η παρακολούθηση σε δεύτερο χρόνο

3. Πιθανή μαγνητοφώνηση εκπομπών ώστε να χρησιμοποιηθούν αργότερα για σκοπούς παραπλάνησης.

4. Στοχοποίηση για μελλοντική ηλεκτρονική παρεμβολή της συχνότητας που έχει εντοπιστεί.

Τέλος ο περιορισμός του χρησιμοποιούμενου λεξιλογίου είναι επίσης ένα πολύ χρήσιμος γενικός κανόνας. Χρησιμοποιείται σε περιβάλλον έντονων παρεμβολών θορύβου ώστε η εντολή αν μεταδίδεται όσο τον δυνατόν ταχύτερα.

Η εκτέλεση όλων αυτών των μέτρων με την χρήση ενός αυτόνομου ΜΕΑ ή σμήνους ΜΕΑ μπορεί να επιφέρει πολλά πλεονεκτήματα καθώς εξαλείφονται δυσκολίες όπως το ανάγλυφο του εδάφους, η διακινδύνευση ανθρώπινων ζωών που θα έπρεπε σε άλλη περίπτωση να επανδρώσουν επίγεια μέσα σε προκεχωρημένες θέσεις καθώς ακόμα με την χρήση σμήνους αυξάνεται η βιωσιμότητα του συνολικού συστήματος καθώς δεν μας επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό η καταστροφή μέρους αυτού (κατάρριψη κάποιου ΜΕΑ). Σε αυτό συμβάλλουν και οι τρόποι επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης μεταξύ των ΜΕΑ, οι οποίοι θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.



#### 1.4. Σύστημα Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (UAS)

Αρχικά πρέπει να δώσουμε τον ορισμό των ΣμηΕΑ όπως περιγράφεται στην εφημερίδα της κυβερνήσεως (ΦΕΚ Τεύχος Β' 4527/30.12.2016 ) :

«Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους - ΣμηΕΑ (Unmanned Aircraft System-UAS) ορίζεται το μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UA) μαζί με όλο τον σχετικό εξοπλισμό που αφορά στην υποστήριξη αυτού (σταθμός ελέγχου, δυνατότητες σύνδεσης δεδομένων και τηλεχειρισμού, εξοπλισμός πλοήγησης κλπ.) ο οποίος είναι απαραίτητος για την λειτουργία του μη επανδρωμένου αεροσκάφους. Τα ΣμηΕΑ είναι είτε ελεύθερα (free UAS) ή είναι δυνατόν να είναι προσδεδεμένα (tethered UAS) σε σταθερές ή κινητές βάσεις. Στην κατηγορία των συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών - ΣμηΕΑ (Unmanned Aircraft System - UAS) περιλαμβάνονται και τα τηλεχειριζόμενα αεροσκάφη (Remotely - Piloted) και τα τηλεχειριζόμενα Συστήματα Αεροσκαφών (Remotely-Piloted Aircraft Systems RPAS), καθώς και τα αυτόνομα αεροσκάφη (autonomous aircraft)».

Ανάλογα με την χρήση τους κατηγοριοποιούνται σε διάφορες κατηγορίες .Στις στρατιωτικές εφαρμογές συγκεκριμένα υπάρχουν περισσότερα κριτήρια που επικεντρώνονται στο τρόπο πτήσης, αυτονομίας, βάρους, κτλ που υπάρχουν στις ένοπλες δυνάμεις όλων των χωρών που διαθέτουν ΣμηΕΑ. Η σημασία τους στο πεδίο της μάχης είναι μεγάλη γι' αυτό έχουν επενδύσει στην ανάπτυξη τους και στην μαζική παραγωγή τους χώρες όπως η Αμερική, το Ισραήλ, η Τουρκία κλπ.

##### 1.4.1. Κατηγοριοποίηση ΣμηΕΑ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η κατηγοριοποίηση τους σύμφωνα με το NATO:





NATO CLASSIFICATION					
class and weight, w(kg)	category and weight, w(kg)	normal employment	normal operating altitude(ft)	normal mission radius(km)	example platform
class I w<150	small w>20	Tactical unit(employ s launch system)	h<=5000 AGL	50(LOS)	luna, hermes 90
	mini 2<=w<=20	tactical unit(manual launch)	h<=3000 AGL	25(LOS)	scaneagle, raven
	micro w<2	tactical patrol/section, individual(single operator)	h<=200 AGL	5(LOS)	black widow
class II 150<=w<=600	tactical	tactical formation	h<=10,000 AGL	200(LOS)	sperwer, aerostar
class III w>600	strike/combat	strategic/national	h<=65,000	unlimited(BLOS)	mq 9, x 47
	HALE	strategic/national	h<=65,000	unlimited(BLOS)	global hawk
	MALE	operational/theater	h<=45,000 MSL	unlimited(BLOS)	predator a predator b

Εικόνα 1.8. Κατηγοριοποίηση ΜΕΑ [5]

Ένα βασικό κριτήριο διαχωρισμού των ΣμηΕΑ είναι το μέγεθος και βάση αυτού διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες [5]:

- Μικρής ακτίνας δράσης (Close-Range UAV): Ακτίνα δράσης έως 50 χιλιόμετρα.
- Mini UAV (MUAV): Ακτίνα δράσης έως 25 χιλιόμετρα. Βάρος 2 έως 20 χιλιόγραμμων περίπου.
- Micro UAV (MAV): Λειτουργία εντός κτιρίων. Ανάπτυγμα πτερύγων μικρότερο από 150 χιλιοστά.
- Μέσης ακτίνας δράσης ή Τακτικά UAV(TUA –Medium Range or Tactical UAV): Ακτίνα δράσης 200 χιλιόμετρα.
- Αντοχή σε Μεγάλο Υψόμετρο (HALE – High altitude long endurance): Λειτουργία σε υψόμετρο μέχρι και 15000 μέτρα επί 24ωρο. Δύνανται να φέρουν οπλισμό και ο χειρισμός τους γίνεται από σταθερές βάσεις-σταθμούς ελέγχου.





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

#### 1.4.2. Αποστολές ΣμηΕΑ

Τα ΣμηΕΑ συναντώνται τόσο σε πολιτικές όσο και σε στρατιωτικές εφαρμογές και έχουν ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων και αποστολών που πραγματοποιούν. Στον πολιτικό τομέα μπορούν να βρουν εφαρμογή στην γεωργία, σε επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, στην πυροσβεστική και την αστυνομία, σε μεγάλες βιομηχανίες για τον έλεγχο των υποδομών τους και γενικότερα σε πολλούς τομείς τα καθημερινότητας που δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.

Αντίστοιχα οι εφαρμογές και οι αποστολές που μπορούν να λάβουν τα ΣμηΕΑ στον στρατιωτικό τομέα είναι εξαιρετικής σημασίας. Κάποιες από αυτές είναι οι εξής :

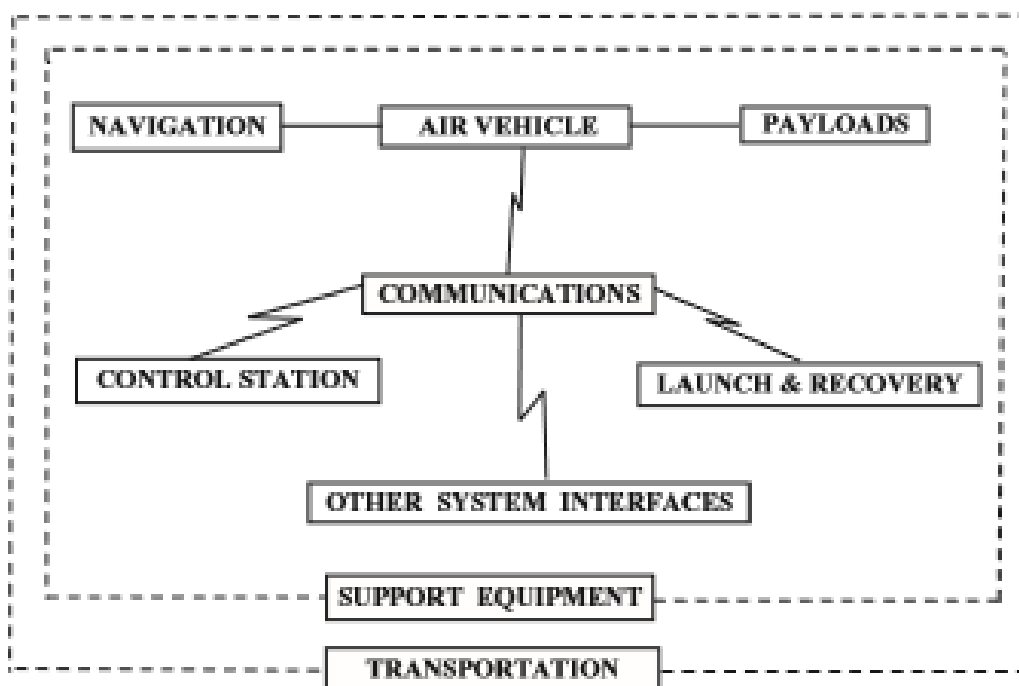
- Εντοπισμός εχθρικών στόλων.
- Παραπλάνηση πυραύλων που λειτουργούν ανιχνεύοντας το θερμικό στίγμα αεροσκάφους.
- Αναγνώριση δρομολογίου, περιοχής.
- Διατήρηση επαφής με τις εχθρικές δυνάμεις.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσβολής.
- Παροχή με ακρίβεια των συντεταγμένων του στόχου.
- Επιχειρήσεις συλλογής πληροφοριών (Electronic intelligence-ELINT).
- Κάλυψη με αισθητήρες της περιοχής επιχειρήσεων.
- Παροχή πληροφοριών στα επανδρωμένα συστήματα.
- Μείωση του χρόνου έκθεσης Α/Φ-Ε/Π σε υψηλή Α/Α απειλή.
- Παροχή τρισδιάστατων δεδομένων.
- Διεξαγωγή επιχειρήσεων παραπλάνησης και επίδειξης δύναμης.
- Διοικητική Μέριμνα – Διαχειριστική υποστήριξη.
- Αναμετάδοση ασύρματων επικοινωνιών.



- Προστασία στρατιωτικών εγκαταστάσεων, λιμανιών και περιοχών υψηλής σημασίας.
- Επιτήρηση και Αναγνώριση Εχθρικών Δυνάμεων.
- Αποστολές Ηλεκτρονικού Πολέμου ,όπως εντοπισμό εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων .
- Εντοπισμό και καταστροφή επίγειων ναρκών.
- Παρεμβολή σε εχθρικά ραντάρ και επικοινωνίες
- Καταστροφή εχθρικών μέσων Ηλεκτρονικού Πολέμου.
- Καταστροφή μη διαρραγέντων βλημάτων.
- 

#### 1.4.3. Βασικά Μέρη Συστήματος Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Ένα Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους αποτελείται από έναν αριθμό υποσυστημάτων τα οποία αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του συνολικού συστήματος. Η τεχνική λειτουργική δομή ενός τυπικού συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κανένα υποσύστημα δεν είναι πιο σημαντικό από το άλλο, αν και ορισμένα, όπως συνήθως η άτρακτος, έχουν μεγαλύτερη επίδραση στον σχεδιασμό των άλλων υποσυστημάτων καθώς είναι αυτά που θα τα φέρουν πάνω τους. Στην συνέχεια θα γίνει σύντομη ανάλυση των κύριων υποσυστημάτων ενός ΣμηΕΑ.[6]



Εικόνα 1.9. Σύστημα UAV – Δομή λειτουργίας [6]

### Σταθμός Ελέγχου (Control Station).

Ο σταθμός ελέγχου είναι το κέντρο ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος και η διεπαφή ανθρώπου-μηχανής. Συνήθως βρίσκεται στο έδαφος (GCS), ή είναι αερομεταφερόμενο σε «μητρικό» αεροσκάφος (ACS). Μπορεί να είναι ακόμα το κέντρο στο οποίο έχει προγραμματιστεί η αποστολή UAV, οπότε μπορεί να είναι γνωστή ως σταθμός προγραμματισμού και ελέγχου αποστολής (MPCS).

Από το σταθμό ελέγχου, οι χειριστές επικοινωνούν με το αεροσκάφος του συστήματος μέσω του υποσυστήματος επικοινωνιών, προκειμένου να το κατευθύνουν και να χειρίζονται τους διάφορους τύπους «ωφέλιμου φορτίου» που φέρει. Ομοίως, μέσω του down-link επικοινωνιών, το αεροσκάφος επιστρέφει πληροφορίες και εικόνες στους χειριστές. Οι πληροφορίες μπορεί να περιλαμβάνουν δεδομένα από τα ωφέλιμα φορτία, πληροφορίες κατάστασης των υποσυστημάτων και του αεροσκάφους και πληροφορίες θέσης. Ο σταθμός ελέγχου συνήθως φιλοξενεί επίσης τα συστήματα επικοινωνίας με άλλα εξωτερικά συστήματα. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν μέσα απόκτησης δεδομένων καιρού, μεταφορά

Αλέξανδρος Μπιτζής



πληροφοριών από και προς άλλα συστήματα στο δίκτυο, διαταγές από ανώτερη αρχή και αναφορά πληροφοριών σε αυτήν ή σε άλλες αρχές.

### **Ωφέλιμο Φορτίο (Payload)**

Το ωφέλιμο φορτίο ποικίλει ανάλογα με το εκάστοτε επιχειρησιακό έργο του ΣμηΕΑ. Αυτά μπορεί να κυμαίνονται από σχετικά απλά υποσυστήματα όπως από μια απλή βιντεοκάμερα έως και ραντάρ υψηλής ισχύος με αρκετά μεγάλη μάζα ακόμα και οπλισμό.

Μερικά, πιο εξελιγμένα, UAV φέρουν έναν συνδυασμό διαφορετικών τύπων αισθητήρων, σε μια μονάδα ωφέλιμου φορτίου ή σε μια σειρά από μονάδες. Τα δεδομένα από αυτούς τους διάφορους αισθητήρες μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία και να ενσωματωθούν για να παρέχουν βελτιωμένες πληροφορίες ή πληροφορίες που δεν θα μπορούσαν να ληφθούν χρησιμοποιώντας έναν μόνο τύπο αισθητήρα. Παράδειγμα, οι εικόνες από την οπτική (ελαφριά) βιντεοκάμερα, από τη θερμική κάμερα απεικόνισης και πιθανώς από ένα σύστημα σαρωτή ραντάρ, μπορεί να συγχωνευτούν μαζί. Έτσι, η θερμική εικόνα και η εικόνα ραντάρ μπορούν να προσθέσουν πληροφορίες κρυμμένες στην οπτική εικόνα. Η οπτική έγχρωμη εικόνα θα προσθέσει διακρίσεις, ανάλυση και αντίθεση που δεν μπορούν να αποκτηθούν από τη μειωμένη αντίθεση της θερμικής εικόνας ή από την χαμηλότερη ανάλυση της εικόνας ραντάρ. Οι εικόνες, ή άλλα δεδομένα, που λαμβάνονται από αυτά τα συστήματα είναι σε επεξεργάσιμη μορφή, η οποία μπορεί να μεταδοθεί μέσω του συνδέσμου με τον σταθμό ελέγχου ή μέσω άλλου διαύλου επικοινωνίας.

### **Αερόχημα (Air Vehicle)**

Ο τύπος και η απόδοση του αεροπορικού οχήματος καθορίζονται κυρίως από τις ανάγκες της επιχειρησιακής αποστολής. Το αεροσκάφος πρέπει να μεταφέρει το ωφέλιμο φορτίο της αποστολής, αλλά πρέπει επίσης να μεταφέρει τα υποσυστήματα που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του. Αυτά τα υποσυστήματα



περιλαμβάνουν σύνδεση τηλεπικοινωνιών, σταθεροποίηση και έλεγχο εξοπλισμού, τροφοδοτικό, καύσιμα, πυρομαχικά κλπ. Ανάλογα λοιπόν με την αποστολή του πρέπει να μελετηθεί με μεγάλη ακρίβεια το σχήμα του, τα χαρακτηριστικά του (πχ πτέρυγες ή έλικες, δεξαμενές καυσίμου ή ηλεκτρική τροφοδοσία, βάρος κλπ) καθώς και οι μηχανισμοί που απαιτούνται για την εκτόξευση του αεροσκάφους, την εκτέλεση της αποστολής του και την ανάκτηση του. Αν για παράδειγμα κάποιο ΣμηΕΑ επιχειρεί από ένα πολεμικό πλοίο ή από συγκεκριμένες τοποθεσίες, θα είναι πιθανόν απαραίτητη η κάθετη ικανότητα απογείωσης και προσγείωσης του αεροσκάφους.

### **Σύστημα Πλοήγησης (Navigation System)**

Οι χειριστές του ΣμηΕΑ θα πρέπει ανά πάσα στιγμή να γνωρίζουν που βρίσκεται το αεροσκάφος. Ακόμα είναι απαραίτητο και για το ίδιο το αεροσκάφος να γνωρίζει που βρίσκεται οποιαδήποτε στιγμή σε περίπτωση που απαιτηθεί αυτόνομη πτήση. Αυτή η κατάσταση της αυτόνομης πτήσης μπορεί να είναι μια προγραμματισμένη αποστολή είτε ένα μέρος της ή ακόμα και επείγουσα κατάσταση «επιστροφής στη βάση» σε περίπτωση κάποιας δυσλειτουργίας του συστήματος. Για πλήρως αυτόνομη λειτουργία, δηλαδή χωρίς καμία επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και του αεροπορικού οχήματος, πρέπει να μεταφέρεται επαρκής εξοπλισμός πλοήγησης στο αεροσκάφος.

Στο παρελθόν, αυτό σήμαινε ότι το αεροσκάφος έπρεπε να φέρει ένα περίπλοκο, ακριβό και βαρύ σύστημα. Σήμερα το GPS έχει διευκολύνει αυτό το πρόβλημα. Τα GPS που είναι τώρα διαθέσιμα είναι εξαιρετικά ελαφριά και φθηνά ώστε να παρέχουν συνεχώς ενημέρωση θέσης .

Σε περίπτωση μη αυτόνομης πλοήγησης, όταν δηλαδή η επικοινωνία μεταξύ αεροσκαφών και σταθμού βάσης είναι σχεδόν συνεχής υπάρχουν εναλλακτικές μέθοδοι σε περίπτωση που διακοπεί η λειτουργία του GPS κάποιες από τις οποίες είναι οι παρακάτω:



(α) Παρακολούθηση μέσω ραντάρ που βρίσκεται στον σταθμό βάσης. Εδώ το αεροσκάφος είναι εξοπλισμένο με αναμεταδότη που ανταποκρίνεται σε σαρωτή ραντάρ, έτσι ώστε η θέση του αεροσκάφους να φαίνεται μέσω αυτού.

(β) Παρακολούθηση μέσω ασυρμάτου. Η θέση του αεροσκάφους βρίσκεται υπολογίζοντας τον χρόνο που κάνει ένα κωδικοποιημένο σήμα που μεταφέρει τα δεδομένα από το αεροσκάφος στον σταθμό βάσεως, να φθάσει στην βάση .

(γ) Με τον υπολογισμό των διανυσμάτων ταχύτητας και του χρόνου που έχει παρέλθει από την απογείωση μπορεί να βρεθεί η θέση του αεροσκάφους. Εάν η αποστολή είναι πάνω από την ξηρά και το αεροσκάφος φέρει μια τηλεοπτική κάμερα που παρακολουθεί το έδαφος, η θέση της μπορεί να επιβεβαιωθεί συνδέοντας ορατά γεωγραφικά χαρακτηριστικά σημεία με τη γνωστή θέση τους στο χάρτη.

### **Εξοπλισμός Εκτόξευσης και Ανάκτησης ΜΕΑ**

(α) Μηχανισμός Εκτόξευσης. Τα αεροχήματα που δεν έχουν την ικανότητα να απογειώνονται κατακόρυφα ή δεν υπάρχει κατάλληλος διάδρομος απογείωσης χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό εκτόξευσης. Αυτό συνήθως είναι μία ράμπα κατά μήκος της οποίας το αεροσκάφος επιταχύνει μέσα σε ένα καροτσάκι, ώστε να φθάσει την κατάλληλη ταχύτητα που θα του επιτρέψει να ίπταται .

(β) Εξοπλισμός ανάκτησης. Αυτό επίσης απαιτείται συνήθως για αεροσκάφη χωρίς κατακόρυφη ικανότητα, εκτός εάν μπορούν να κατεβούν σε έδαφος που θα επιτρέψει την προσγείωση με τροχούς ή ολίσθηση. Συνήθως έχει τη μορφή αλεξίπτωτου, εγκατεστημένου εντός του αεροσκάφους, και το οποίο αναπτύσσεται σε κατάλληλο υψόμετρο πάνω από τη ζώνη προσγείωσης. Επιπλέον, απαιτείται ένα μέσο απορρόφησης της ενέργειας κρούσης, που συνήθως είναι αερόσακοι ή εύθραυστο υλικό που αντικαθιστάται. Μια εναλλακτική μορφή εξοπλισμού ανάκτησης μπορεί να είναι ένα μεγάλο δίχτυ



(γ) Εξοπλισμός Τοποθέτησης Αεροσκάφους σε Εκτοξευτή. Εάν το αεροσκάφος δεν είναι αρκετά ελαφρύ ώστε να είναι φορητό από τον άνθρωπο, απαιτείται ένα μέσο μεταφοράς του αεροσκάφους στον εκτοξευτή του.

### **Επικοινωνίες (Communications)**

Ίσως το πιο βασικό υποσύστημα ενός ΣμηΕΑ είναι αυτό των επικοινωνιών που παρέχει την σύνδεση του αεροσκάφους με το σταθμό βάσης. Συνήθως το μέσο επικοινωνίας είναι σήματα ραδιοσυχνοτήτων αλλά υπάρχουν και εναλλακτικοί τρόποι όπως το φως με τη μορφή δέσμης λέιζερ.

Τα δεδομένα που ανταλλάσσονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του αεροσκάφους περιέχουν πληροφορίες σχετικά με :

α) Το σχέδιο πτήσης που στη συνέχεια αποθηκεύεται στο σύστημα αυτόματου ελέγχου του αεροσκάφους (AFCS).

β) Εντολές για την πλοήγηση του αεροσκάφους όταν απαιτείται ο χειριστής να λάβει τον έλεγχο του αεροσκάφους .

γ) Εντολές σχετικά με τον χειρισμό του ωφέλιμου φορτίου .

δ) Δεδομένα όπως φωτογραφίες μετρήσεις κλπ που συλλέχθηκαν από το ωφέλιμο φορτίο και μεταδίδονται προς την βάση.

ε) Δεδομένα σχετικά με το αεροσκάφος που εκπέμπονται προς την βάση ( πχ επίπεδα καυσίμου) κλπ.

Ανάλογα με τον τύπο της αποστολής του ΣμηΕΑ, τον βαθμό ασφαλείας του και του εύρους της περιοχής που καλείται να καλύψει καθορίζονται τα στοιχεία των κεραιών και των λοιπών απαραίτητων συσκευών για την επίτευξη της αποστολής του. Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σχετικά με τις μεθόδους εντοπισμού εκπνευμένων ραδιοσυχνοτήτων από ΣμηΕΑ καθώς και των διάφορων τύπων κεραιών που απαιτούνται για αυτές τις διεργασίες.



### **Διεπαφή μεταξύ υποσυστημάτων ΣμηΕΑ καθώς και με άλλα εξωτερικά συστήματα**

Όλα τα υποσυστήματα ενός ΣμηΕΑ θα πρέπει να συνεργάζονται μεταξύ τους ώστε να λειτουργεί ομαλά το συνολικό σύστημα, παρόλο που ορισμένα από αυτά μπορεί να είναι σε θέση να λειτουργούν ως «αυτόνομα» συστήματα σε άλλες χρήσεις. Γι' αυτό πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στη σωστή λειτουργία των διεπαφών τους. Για παράδειγμα, το ίδιο το υποσύστημα ραδιοεπικοινωνιών σχηματίζει μια διεπαφή μεταξύ του σταθμού βάσης και του αεροπορικού οχήματος. Τα στοιχεία που είναι εγκατεστημένα τόσο στην βάση όσο και στο αεροπορικό όχημα πρέπει να λειτουργούν με τα ίδια πρωτόκολλα και με συμβατό τρόπο.

Ακόμα είναι απαραίτητο να υπάρχει αλληλεπίδραση και διεπαφή και με άλλα συστήματα καθώς συνήθως συνεργάζονται πολλά διαφορετικά συστήματα για την επίτευξη μίας αποστολής.

Ένα τυπικό παράδειγμα είναι η στρατιωτική παρακολούθηση όπου το σύστημα UAV μπορεί να λειτουργεί σε επίπεδο ταξιαρχίας, αλλά μπορεί επίσης να λαμβάνει μια εργασία άμεσα ή έμμεσα από το επίπεδο του σώματος για να ερευνήσει μια συγκεκριμένη περιοχή για συγκεκριμένες πληροφορίες και να αναφέρει πίσω στο σώμα ή σε άλλους χρήστες μέσω στρατιωτικού δικτύου πληροφοριών. Αυτό το δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει πληροφορίες που προέρχονται ή απαιτούνται από άλλα στοιχεία του στρατού, όπως επίγειες, θαλάσσιες ή αεροπορικές μονάδες και δορυφόροι, ή ακόμα και άλλα συστήματα UAV. Το σύνολο τότε αποκτά δικτυοκεντρικό χαρακτήρα και γίνεται αυτό που είναι γνωστό ως «*σύστημα συστημάτων*» .





### **Εξοπλισμός Υποστήριξης (Support Equipment)**

Ο εξοπλισμός υποστήριξης είναι το σύνολο των εργαλείων, των ανταλλακτικών, των εγχειριδίων και οποιοσδήποτε άλλος εξοπλισμός που είναι απαραίτητος για την συντήρηση του συστήματος .

### **Μεταφορά (Transportation)**

Είναι τα μέσα μεταφοράς που απαιτούνται για όλα τα υποσυστήματα ενός ΣμηΕΑ, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί οπουδήποτε. Ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του ΣμηΕΑ τα μέσα μεταφοράς μπορεί να είναι από ένα απλό όχημα έως και αρκετά οχήματα εξειδικευμένης χρήσης ακόμα και επανδρωμένο αεροσκάφος μέσα από το οποίο απελευθερώνεται το αερόχημα του ΣμηΕΑ.

Πέρα από τα βασικά μέρη ενός ΣμηΕΑ που ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις ποικίλουν ,εξαιρετικής σημασίας είναι και το περιβάλλον στο οποίο θα κληθεί να επιχειρήσει. Το υψόμετρο που θα πετάξει ,οι κλιματολογικές συνθήκες καθώς και το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον παίζουν σημαντικό ρόλο και αποτελούν παράγοντες μελέτης για την βέλτιστη κατασκευή και χρήση ενός ΣμηΕΑ.

#### **1.4.4. ΣμηΕΑ στο σήμερα**

Η ανάπτυξη των ΣμηΕΑ είναι ραγδαία και ήδη κάποιες χώρες διαθέτουν στο οπλοστάσιο τους έξυπνα συστήματα που αναλαμβάνουν διάφορες αποστολές. Παρακάτω θα αναφερθούν κάποια από αυτά που εκτελούν αποστολές Ηλεκτρονικού Πολέμου.



Εικόνα 1.10 EuroHawk [7]

Η έκδοση Mücke του KZO drone της γερμανικής εταιρίας Rheinmetall φέρει ωφέλιμο φορτίο VHF / UHF ηλεκτρονικής επίθεσης και διαθέτει επίσης προγραμματιζόμενο ραντάρ jammer στο

σκάφος που εκπέμπει στη ζώνη 20 MHz έως 110 MHz ή τη ζώνη 100 MHz έως 500 MHz ώστε να φιμώσει τις επικοινωνίες φωνής και δεδομένων. [8]



Εικόνα 1.11. The Mucke electronic countermeasures (ECM) UAV[8]



Εικόνα 1.12. Elbit Systems Hermes 450 [9]

Το Elbit Systems Hermes 450 είναι ένα ισραηλινό μεσαίου μεγέθους μη επανδρωμένο εναέριο όχημα πολλαπλών ωφέλιμων φορτίων (UAV) σχεδιασμένο για τακτικές αποστολές μεγάλης αυτονομίας. Έχει αυτονομία πτήσης πάνω από 20 ώρες, με πρωταρχική αποστολή αναγνώρισης, παρακολούθησης

και αναμετάδοση επικοινωνιών.[9]

Το IAI Heron (Machatz-1) είναι ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα μεγάλης αυτονομίας (UAV) μεσαίου ύψους που αναπτύχθηκε από την Israel Aerospace Industries. Μπορεί να μεταφέρει μια σειρά αισθητήρων, όπως θερμική κάμερα (υπέρυθρη) για εναέρια επιτήρηση. Ακόμα διαθέτει



Εικόνα 1.13. IAI Heron (Machatz-1) [10]

συστήματα πληροφοριών (COMINT και ELINT) και διάφορα συστήματα ραντάρ, συνολικού βάρους έως και 250 kg (550 lb). Το Heron είναι επίσης ικανό για εντοπισμό στόχων και προσδιορισμό στοιχείων πυροβολικού. Οι αισθητήρες ωφέλιμου φορτίου επικοινωνούν με το σταθμό ελέγχου εδάφους σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας είτε απευθείας σύνδεση μέσω οπτικής επαφής (LOS – line of sight) είτε μέσω αναμετάδοσης από δορυφόρο. Όπως και το σύστημα πλοήγησης, το ωφέλιμο φορτίο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί είτε με ένα πλήρως προγραμματισμένο αυτόνομο τρόπο λειτουργίας, είτε σε χειροκίνητη απομακρυσμένη λειτουργία σε πραγματικό χρόνο ή ακόμα και σε συνδυασμό των δύο.[10]

Άλλα σημαντικά ΣμηΕΑ που μπορούν να φέρουν οπλισμό και να πλήξουν στόχους είναι τα παρακάτω:



Εικόνα 1.14. Predator MQ9-1B[11]

Το predator MQ9-1B χρησιμοποιείται για εγγύς αεροπορική υποστήριξη, εναέρια παρατήρηση, αναγνώριση και απαγόρευση μίας περιοχής από τον εχθρό. Μπορεί να φέρει οπλισμό, αυξάνοντας έτσι την μαχητική ισχύ της δύναμης που το διαθέτει.



Συγκεκριμένα μπορεί να φέρει πάνω από δύο AGM-114 Hellfire πυραύλους.[11]

Τέλος ένα ΣμηΕΑ ελληνικής κατασκευής είναι το παρακάτω :

Αποτελεί την εξέλιξη του ΠΗΓΑΣΟΣ, παρέχοντας αυξημένες δυνατότητες από τον προκάτοχό του. Με αυτονομία 250 ωρών, εκτελεί αποστολές αναγνώρισης και επιτήρησης. Ακόμη παρέχει την



Εικόνα 1.15. Πήγασος II [12]

δυνατότητα μεταφοράς φορτίου.

Κατασκευασμένο από σύνθετα

υλικά, μειώνει κατά πολύ το κόστος παραγωγής.[12]



## 2 Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης και Εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων

### 2.1. Τι είναι το Direction Finding

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στις μεθόδους και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θέσης και κατεύθυνσης εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Direction Finding / Direction of Arrival Estimation Systems).

Ο προσδιορισμός της φυσικής θέσης ενός πομπού ραδιοσυχνοτήτων (RF) είναι γνωστός πρόβλημα που αναφέρεται συνήθως ως geolocation. Ο εντοπισμός της γεωγραφικής θέσης είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο σε πολλούς πολιτικούς και στρατιωτικούς τομείς. Τα συστήματα εκτίμησης θέσης χρησιμοποιούν πληροφορίες συχνότητας, πλάτους και φάσης από μια κεραία ή από μια σειρά κεραιών για να καθορίσουν την κατεύθυνση από την οποία προέρχεται ένα εκπεμπόμενο σήμα. Αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για ένα πεδίο στρατιωτικών επιχειρήσεων καθώς μπορεί να εντοπιστεί η θέση ενός εχθρικού τμήματος που χρησιμοποιεί μια συσκευή ραδιοεπικοινωνίας. Άλλες χρήσεις Εντοπισμού Θέσης Εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων περιλαμβάνουν τον εντοπισμό της πηγής ενός σήματος ραντάρ. Οι δέσμες ραντάρ είναι πολύ στενές και εάν ένας στόχος παρακολουθείται, αυτός ο στόχος μπορεί να εντοπίσει το ραντάρ χρησιμοποιώντας ένα σύστημα DF. Με την ίδια λογική μπορούν να εντοπιστούν παρεμβολείς και εχθρικά μέσα Ηλεκτρονικού Πολέμου δίνοντας έτσι πληροφορίες για την θέση τους σε φίλιες δυνάμεις ώστε να μπορέσουν να τα εξουδετερώσουν.

Για την εφαρμογή του DF συνήθως χρησιμοποιούνται πολλές συστοιχίες κεραιών ώστε να έχουν την μέγιστη διάσταση και να καλύπτουν αρκετά μήκη κύματος. Αυτό διασφαλίζει ότι η φάση του εισερχόμενου σήματος θα διαφέρει σε κάθε στοιχείο όταν το κύμα προσπίπτει στη συστοιχία. Για εφαρμογές που απαιτούν φορητά συστήματα, όπως για παράδειγμα τα UAV πρέπει να χρησιμοποιηθούν μικρότερα συστήματα DF. Ωστόσο, αυτά τα μικρότερα συστήματα παρουσιάζουν





προβλήματα ακρίβειας και ευαισθησίας των δεκτών. Κάποιοι αλγόριθμοι εντοπισμού κατεύθυνσης (DF) που εφαρμόζονται σε αυτά τα συστήματα για τη διευκόλυνση της εκτίμησης είναι οι εξής: α) Ο αλγόριθμος Ταξινόμησης Πολλαπλών Σημάτων (Multiple Signal Classification - MuSiC) και β) ο αλγόριθμος Εκτίμησης Παραμέτρων Σήματος μέσω Τεχνικών Περιστροφής (Estimation of Signal Parameters via Rotation Invariance Techniques - ESPRIT). [13]

## 2.2. Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης Εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων

Η μελέτη των μεθόδων Εντοπισμού Θέσης εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων γίνεται με την σχεδίαση κατάλληλου λειτουργικού συστήματος με χρήση της βέλτιστης συστοιχίας κεραιών σε αερομεταφερόμενη πλατφόρμα UAV , η οποία ελέγχεται μέσω επίγειου σταθμού.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τον εντοπισμό της θέσης μίας εκπομπής ραδιοσυχνοτήτων και στη συνέχεια θα αναλυθούν οι παρακάτω:

1. Angle Of Arrival (AOA), η οποία εντοπίζει την θέση του σήματος μέσω της γωνίας που φθάνει το σήμα στον δέκτη.
2. Frequency Difference Of Arrival (FDOA), η οποία εντοπίζει την θέση του σήματος μέσω της διαφοράς συχνότητας που μετρείται από δύο δέκτες.
3. Time of Arrival (TOA), η οποία εντοπίζει την θέση του σήματος από τον ακριβή χρόνο που το σήμα λαμβάνεται από πολλαπλούς δέκτες
4. Time Difference Of Arrival (TDOA), η οποία εντοπίζει την θέση του σήματος από την διαφορά του χρόνου εντοπισμού του σήματος από πολλαπλούς δέκτες.
5. Received Signal Strength (RSS), η οποία εντοπίζει την θέση του σήματος βασιζόμενη στην ισχύ του σήματος.

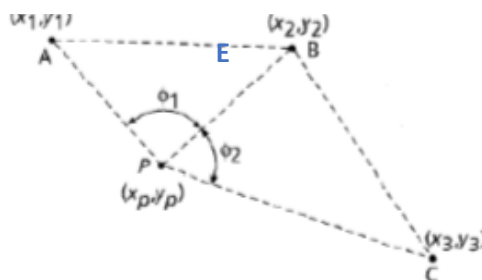
Άλλη μέθοδος εντοπισμού θέσης που αξίζει να αναφερθεί αλλά δεν θα αναλυθεί περαιτέρω είναι με τη χρήση αποτύπωσης σήματος WiFi από smart phones όταν οι υπηρεσίες τοποθεσίας GPS δεν είναι διαθέσιμες. Αυτή η μέθοδος



περιλαμβάνει δημιουργία βάσεων δεδομένων όταν οι υπηρεσίες GPS είναι διαθέσιμες και συνδέει τις τιμές ισχύος του σήματος WiFi με συγκεκριμένες τοποθεσίες στις οποίες λήφθηκαν οι μετρήσεις, αποθηκεύοντας αυτές τις μετρήσεις για μελλοντική χρήση που πιθανόν να μην είναι διαθέσιμο το GPS. Σε αυτή την περίπτωση βάσει ενός γνωστού πομπού προσπαθούμε να εντοπίσουμε έναν δέκτη, παρόλα αυτά η ακρίβεια αυτής της μεθόδου είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με άλλες[14].

### 2.2.1. Angle Of Arrival (AOA)

Ο εντοπισμός της γεωγραφικής θέσης μίας εκπομπής μέσω της μεθόδου Angle Of Arrival (AOA) γίνεται ως εξής. Αρχικά υπολογίζεται η γωνία λήψης του σήματος σε σχέση με τον δέκτη που αποτελείται από συστοιχία κεραιών που λαμβάνουν το σήμα με διαφορετική φάση. Η συσκευή DF αποτελείται από συσκευή επεξεργασίας σήματος και διάφορους αισθητήρες. Καθώς το σήμα λαμβάνεται από τις διάφορες κεραιές-δέκτες, η διαφορά φάσης που εντοπίζεται μεταξύ τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η γωνία από την οποία ήρθε το σήμα. Καθώς οι δέκτες εντοπίζουν το σήμα, κάθε δέκτης μπορεί να υπολογίζει προσεγγιστικά την γωνία από την οποία το έλαβε. Έτσι κάθε κεραία-δέκτης σχηματίζει νοητή γραμμή που περνάει από την θέση του και από το σημείο εκπομπής με την βοήθεια της γωνίας που υπολόγισε. Το σημείο εκπομπής είναι κατά προσέγγιση στο σημείο τομής δύο ή περισσότερων ευθειών από δύο ή περισσότερους δέκτες. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



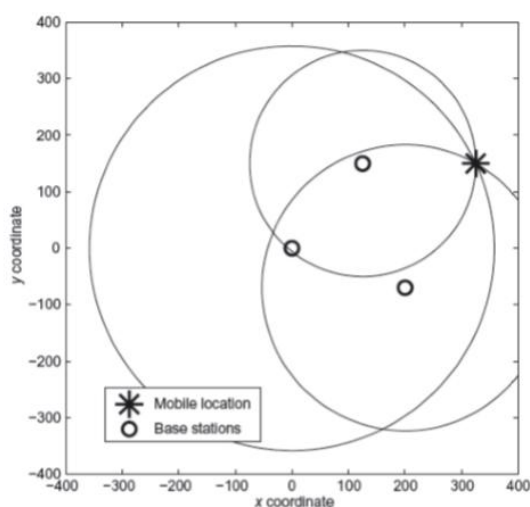
ικόνα 2.1 Εντοπισμός θέσης με προσέγγιση νοητών γραμμών [16]



Τα θετικά αυτής της μεθόδου είναι ότι χρειάζονται μόνο δύο δέκτες για τον εντοπισμό της γεωγραφικής τοποθεσίας αντί για τρεις, καθώς δύο γραμμές θα εντοπίσουν ένα μοναδικό σημείο διασταύρωσης σε 2-D χώρο. Ωστόσο, δεδομένου ότι στην πράξη οι μετρήσεις γίνονται με θόρυβο και σφάλματα δεν θα μπορέσουν να εντοπίσουν τελικά την πραγματική θέση του στόχου. Ακόμα δεν απαιτείται ακριβής συγχρονισμός μεταξύ των δεκτών όπως είναι σε άλλες μεθόδους. Αντίθετα τα μειονεκτήματα είναι ότι προκύπτει η ανάγκη περίπλοκων και δαπανηρών έξυπνων κεραιών που μπορούν να εκτελέσουν υπολογισμούς AOA, καθώς και η ανάγκη για οπτική επαφή με τον στόχο.[15,16]

### 2.2.2. Time of Arrival (TOA)

Η μέθοδος TOA βασίζεται στο γεγονός ότι τα κύματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός που είναι σταθερή. Έτσι όταν ένας δέκτης ανιχνεύσει ένα σήμα και γνωρίζοντας τον χρόνο που δημιουργήθηκε το σήμα αυτό μπορεί να σχηματιστεί ένας κύκλος από πιθανά σημεία καθώς η ταχύτητα διάδοσης του κύματος είναι γνωστή. Λαμβάνοντας μετρήσεις από τρεις ή περισσότερους δέκτες μπορούμε να εντοπίσουμε το σημείο εκπομπής στο σημείο που τέμνονται οι κύκλοι όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα .



Εικόνα 2.2. Εντοπισμός θέσης με μέθοδο TOA [20]

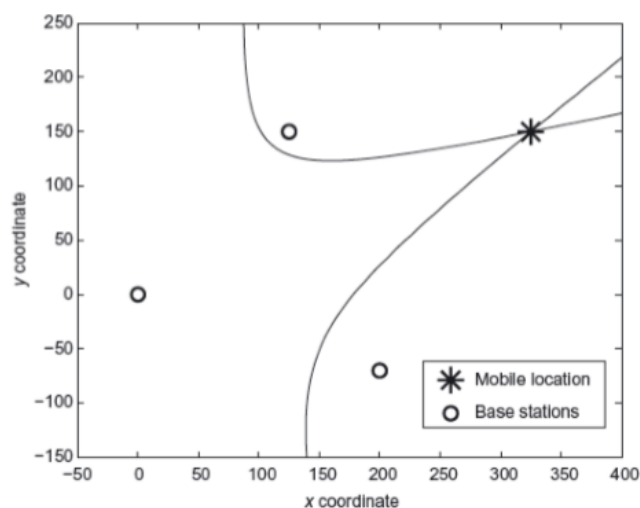




Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα σημεία εκπομπής εντοπίζονται με μεγάλη ακρίβεια ενώ το σημαντικό μειονέκτημα της που την καθιστά αρκετά δύσκολη στην χρήση είναι ότι σε πραγματικές εφαρμογές δεν μπορεί εύκολα να εντοπιστεί ο ακριβής χρόνος που δημιουργήθηκε ένα κύμα.[15,20]

### 2.2.3. Time Difference Of Arrival (TDOA)

Στην μέθοδο αυτή σε αντίθεση με την προηγούμενη δεν χρειάζεται να συγχρονιστεί ο δέκτης με τον πομπό, αντίθετα χρησιμοποιούνται συγχρονισμένοι δέκτες και μετριέται η διαφορά στον χρόνο μεταξύ του εντοπισμού του σήματος από τους διάφορους δέκτες. Έτσι σχηματίζονται καμπύλες υπερβολής με τα πιθανά σημεία εκπομπής. Κάνοντας μετρήσεις από διαφορετικούς δέκτες σε διαφορετικές τοποθεσίες σχηματίζονται διάφορες καμπύλες και το σημείο εκπομπής βρίσκεται στο σημείο τομής των καμπυλών αυτών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



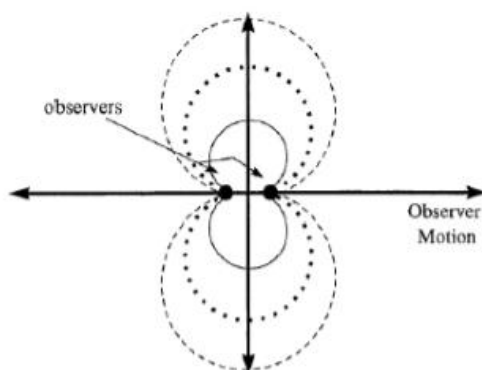
Εικόνα 2.3. Εκτίμηση θέσης με μέθοδο TDOA [15]

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι χρειάζονται τουλάχιστον τρείς δέκτες εάν ο πομπός είναι στην επιφάνεια της Γης και τέσσερις εάν το ύψος του πομπού είναι άγνωστο καθώς χρειάζονται δύο δέκτες για την δημιουργία μίας

υπερβολής και τουλάχιστον δύο καμπύλες υπερβολής για τον εντοπισμό του στόχου. Στην περίπτωση των UAVs αυτό μπορεί να ξεπεραστεί εάν οι δέκτες κινούνται και κάνουν μετρήσεις σε διαφορετικές τοποθεσίες, παρόλα αυτά με αυτόν τον τρόπο χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να γίνει ο εντοπισμός. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι πολλαπλοί δέκτες πρέπει να συγχρονίζονται με ακρίβεια μεταξύ τους για τον εντοπισμό του στόχου. Αυτό μπορεί να παρουσιάσει δυσκολίες στην περίπτωση σμήνους UAV όπου υπάρχουν περιορισμοί στον χρόνο μετάδοσης και στο εύρος ζώνης μεταξύ τους.[15,17,19]

#### 2.2.4. Frequency Difference Of Arrival (FDOA)

Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν ή ο πομπός ή ο δέκτης κινούνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάθε δέκτης να λαμβάνει μία ελάχιστη διαφορετική συχνότητα λόγω του φαινομένου Doppler. Γνωρίζοντας την ταχύτητα των δεκτών, την θέση τους και το μέγεθος της παρατηρούμενης αλλαγής φάσης μπορούν να σχηματιστούν καμπύλες πιθανών θέσεων του πομπού. Παίρνοντας διάφορες μετρήσεις από διάφορες θέσεις το σημείο τομής των καμπύλων μας δείχνει την τοποθεσία του πομπού. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.4. Εκτίμηση θέσης με μέθοδο FDOA [15]

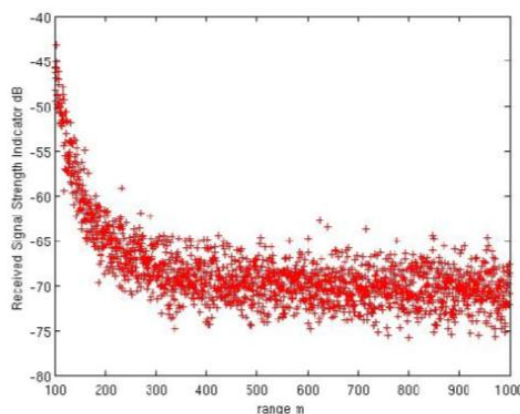
Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε συστήματα χαμηλής ισχύος. Η ταχύτητα του δέκτη πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για να παράγει μια αρκετά μεγάλη μετατόπιση στη συχνότητα ώστε να ξεπεραστεί το



αντίστοιχο σφάλμα στις μετρήσεις της συχνότητας. Επίσης η ακρίβεια των μετρήσεων πρέπει να είναι υψηλότερη από τη μικρότερη αναμενόμενη μεταβολή συχνότητας για την σωστή ανίχνευση της χωρίς να επηρεαστεί από το θόρυβο του συστήματος.[15,17,19]

#### 2.2.5. Received Signal Strength (RSS)

Σε αυτή την μέθοδο μετριέται η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος . Καθώς ο δέκτης κινείται και η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος μεγαλώνει, ο δέκτης κινείται προς τη θέση του πομπού. Εάν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος μειώνεται , ο δέκτης απομακρύνεται από τον πομπό .Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.5 Ισχύς λαμβανόμενου Σήματος σε διάφορες αποστάσεις από τον πομπό [15]

Αυτή η μέθοδος είναι μία από τις πιο απλές στην εφαρμογή, επειδή δεν απαιτεί εξειδικευμένα υλικό ούτε εκτεταμένους υπολογισμούς. Μπορεί ακόμα να συνδυαστεί με πιο εξελιγμένα συστήματα ως τρόπος δημιουργίας ενός υβριδικού συστήματος που μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια. Δυστυχώς, αυτή η μέθοδος είναι ευάλωτη στην εξασθένηση του σήματος λόγω πολλαπλών διαδρομών ή ανάκλασης από επιφάνειες γύρω από τον πομπό ή τους δέκτες και είναι ιδιαίτερα ανακριβής μέσα στα κτίρια. Επιπλέον η ισχύς του σήματος μειώνεται εκθετικά οπότε ο δέκτης πρέπει να έρθει σε αρκετά κοντινή απόσταση από τον πομπό για να τον εντοπίσει,

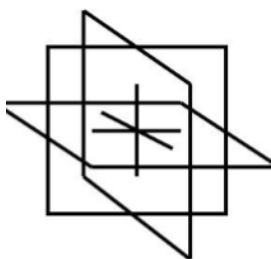


γεγονός που ίσως αποτελέσει πρόβλημα εάν ο πομπός βρίσκεται σε εχθρικό έδαφος.[14,15]

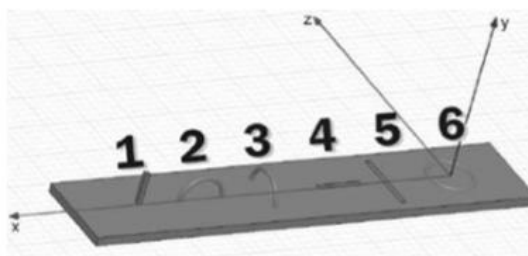
### 2.3. Κεραίες Εντοπισμού Θέσης

Αφού αναφέρθηκαν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των εκπεμπόμενων ραδιοσυχνοτήτων, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια μικρή αναφορά και στο είδος των κεραιών που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μεθόδους καθώς τα χαρακτηριστικά τους (μέγεθος, σχήμα κλπ) αποτελούν πολύ σημαντικό κομμάτι στην μελέτη για την κατασκευή ενός συστήματος ΣμηΕΑ.

Τα συστήματα-κεραίες DF είναι ικανά να ανιχνεύουν και να αξιολογούν πολλαπλά σήματα ταυτόχρονα, μερικές φορές σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και με διαφορετική πόλωση. Συνήθως αποτελούνται από αισθητήρες φορέα και μπορούν είτε να εγκατασταθούν σε μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική είτε να εγκατασταθούν μαζί. Η εικόνα 2.6 i) δείχνει έναν ιδανικό αισθητήρα φορέα που αποτελείται από τρεις βρόχους και τρία δίπολα που έχουν συσχετιστεί μεταξύ τους και ενώ η 2.6.ii) δείχνει έναν αισθητήρα κατανεμημένου φορέα που αποτελείται από τρεις κατανεμημένους βρόχους και τρία κατανεμημένα δίπολα.[13]



i)



ii)

Εικόνα 2.6 i) Τρεις βρόχοι και τρία δίπολα που έχουν συσχετιστεί μεταξύ τους ii) Τρεις κατανεμημένοι βρόχοι και τρία κατανεμημένα δίπολα.[13]

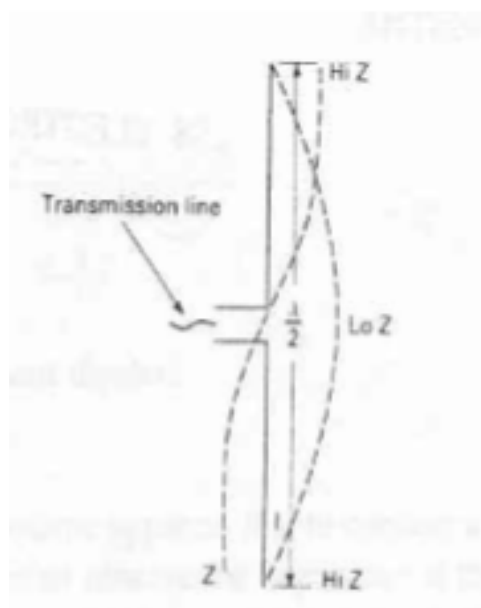


### 2.3.1. Κεραία Δίπολο

Μια διπολική κεραία αποτελείται από δύο πανομοιότυπα αγωγίμα στοιχεία, συνήθως μεταλλικές ράβδους ή σύρματα, με συνδεδεμένη γραμμή τροφοδοσίας στο καθένα. Λειτουργούν μετρώντας τη συχνότητα του εισερχόμενου σήματος και στα δύο στοιχεία. Έχει αποδειχθεί ότι η απόδοση ακτινοβολίας της προαναφερθείσας διάταξης μεγιστοποιείται στην περίπτωση που τα άκρα της έχουν καμφθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να εμφανίζονται κάθετα στη γραμμή μεταφοράς. Κατ' αυτό τον τρόπο το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι πλήρως συζευγμένα κατά τη διάδοσή τους στον περιβάλλοντα χώρο, οπότε και επιτυγχάνεται η μέγιστη ακτινοβολούμενη ενέργεια.

Ο πιο κοινός τύπος διπολικής κεραίας είναι η κεραία μισού μήκους κύματος. Σε αυτή τη ρύθμιση, τα δύο αγωγίμα στοιχεία απέχουν τόσο ώστε η συνολική απόσταση μεταξύ τους είναι  $\frac{1}{2}$  του συνολικού μήκους κύματος του λαμβανόμενου σήματος. Έτσι το μετρούμενο πλάτος είναι το μέγιστο.

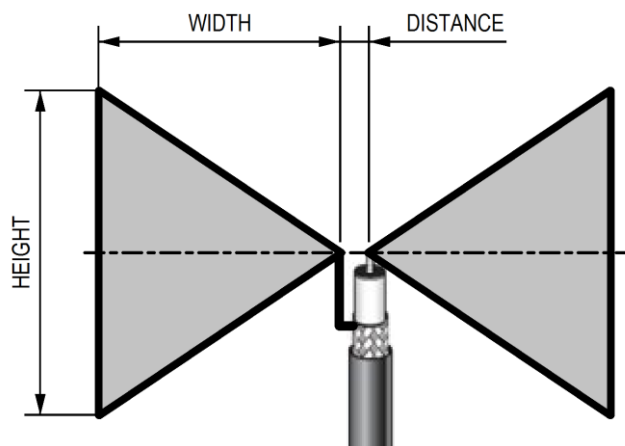
Η χρήση της διπολικής κεραίας για την εύρεση της κατεύθυνσης είναι θεωρητική γιατί στην πράξη καμιά διπολική κεραία δεν χρησιμοποιείται από μόνη της για τον σκοπό αυτό. Θα μπορούσε κανείς, γνωρίζοντας ότι η εκπομπή/λήψη της κεραίας αυτής μηδενίζεται στην κατεύθυνση του άξονα της, περιστρέφοντάς την να έχει μια εκτίμηση της γωνίας του πομπού, αλλά μια τέτοια μέτρηση θα είχε μικρή πρακτική σημασία αφού έχει και χαμηλή ακρίβεια αλλά και πολύ στενό εύρους ζώνης. [15,21]



Εικόνα 2.7. Κεραία Διπόλου [21]

### 2.3.2. Κεραία Bow-Tie

Μια κεραία Bow-Tie λειτουργεί λίγο διαφορετικά από μια διπολική κεραία. Η λειτουργία της βασίζεται στην γωνία λήψης του λαμβανόμενου σήματος αντί του μήκους κύματος του σήματος οπότε μπορεί να βρει εφαρμογή όταν το μήκος κύματος του σήματος αλλάζει ή δεν είναι γνωστό. Με άλλα λόγια η λειτουργία της κεραίας αυτής είναι πιο ευρυζωνική σε σχέση με την απλή διπολική. Το μειονέκτημα είναι ότι η ακρίβεια στις μετρήσεις εύρεσης κατεύθυνσης δεν είναι ακόμα πολύ υψηλή.[15]



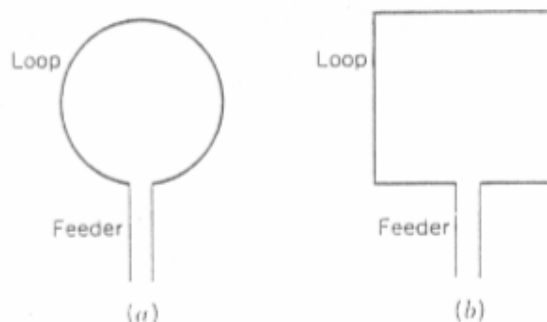
Εικόνα 2.8 Κεραία Bow Tie

### 2.3.3. Κεραία Πλαισίου (Βρόγχου)

Η κεραία πλαισίου είναι μία κεραία σύρματος στην οποία ρέει RF ρεύμα. Επειδή οι διαστάσεις της είναι πολύ μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος το ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι παντού ομοφασικό. Επομένως το πλαίσιο περιβάλλεται από ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι παντού κάθετο σε αυτό. Τα κυκλικά και τετράγωνα πλαίσια του σχήματος έχουν τα ίδια διαγράμματα ακτινοβολίας με αυτά ενός μικρού οριζόντιου δίπολου, εκτός από ότι, σε αντίθεση με το οριζόντιο δίπολο, ένα κατακόρυφο πλαίσιο είναι κατακόρυφα πολωμένο. Επειδή το πλαίσιο είναι μικρό, και ο DF εξοπλισμός πρέπει συχνά να είναι φορητός, οι κεραίες πλαισίου χρησιμοποιούνται κυρίως στα ραδιογωνιόμετρα.

Ένα μικρό πλαίσιο, κάθετο και περιστρεφόμενο γύρω από έναν κάθετο άξονα, μπορεί να τοποθετηθεί στην κορυφή ενός φορητού δέκτη του οποίου η έξοδος συνδέεται με έναν μετρητή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα πολύ καλό και απλό ραδιογωνιόμετρο. Έχοντας ρυθμιστεί στην επιθυμητή συχνότητα εκπομπής, είναι στην συνέχεια απαραίτητο να περιστρέψουμε το πλαίσιο μέχρι το λαμβανόμενο σήμα να γίνει ελάχιστο. Το επίπεδο του πλαισίου είναι τώρα κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Επειδή υπάρχει μια αβεβαιότητα  $180^\circ$  ως προς την γωνία λήψης απαιτούνται δύο μετρήσεις (π.χ. με μετακίνηση της βροχοκεραίας σε άλλο σημείο) προκειμένου να καθορίσουμε την ακριβή κατεύθυνση. Τέλος αν η απόσταση

ανάμεσά στην βροχοκεραία δέκτη και στον πομπό είναι αρκετά μεγάλη, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση από την πηγή της εκπομπής.[18,21]



Εικόνα 2.9 Κεραίες πλαισίου [21]

#### 2.3.4. Κεραίες Φασικής Σύνθεσης

Οι Κεραίες Φασικής Σύνθεσης είναι ένα σύνολο κεραιών ,συνδεδεμένες με έναν πομπό η έναν δέκτη, των οποίων οι δέσμη ακτινοβολίας μπορεί να ρυθμιστεί ηλεκτρονικά χωρίς κανένα μετακινούμενο τμήμα. Επίσης πολύ συχνά είναι δυνατή η εκπομπή ή λήψη σε διάφορες διευθύνσεις ταυτόχρονα. Η κύρια εφαρμογή των κεραιών φασικής σύνθεσης είναι το ραντάρ. Αξίζει να επισημάνουμε ότι οι κεραίες αυτές έχουν πρόσφατα μελετηθεί και για δορυφορικές επικοινωνίες.[21]

#### 2.3.5. Κεραία Doppler

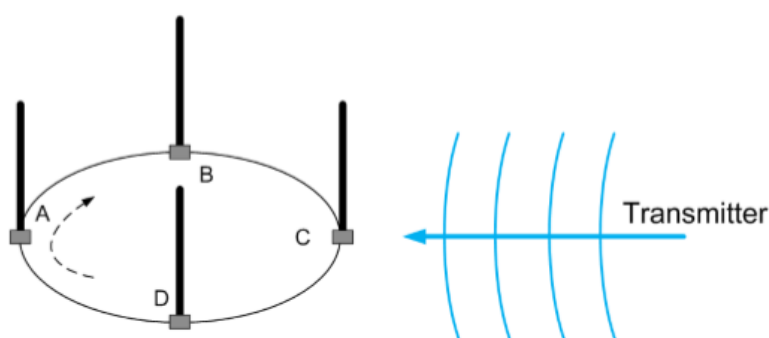
Μία από τις πιο διαδεδομένες συσκευές που χρησιμοποιούνται στην εύρεση κατεύθυνσης είναι η κεραίες Doppler. Αυτή η τεχνική( η οποία ονομάζεται pseudo Doppler σε αυτές τις συσκευές) είναι δημοφιλής λόγω του γεγονότος ότι εφαρμόζεται εύκολα, αλλά και παράγει μια λύση υψηλότερης πιστότητας από εκείνη που δίνεται από τις μεθόδους που περιγράφονται παραπάνω. Αυτή η μέθοδος μετράει την αλλαγή στην συχνότητα του σήματος με βάση την κίνηση του πομπού ή του δέκτη.



Όταν κινούνται κοντά η συχνότητα αυξάνεται ενώ όταν απομακρύνονται η συχνότητα μειώνεται. Έτσι εντοπίζεται η κατεύθυνση της κίνησης

Ένα σύστημα ψευδο-Doppler λειτουργεί με την ίδια αρχή, χωρίς να απαιτείται κίνηση του πομπού ή του δέκτη. . Για την ακρίβεια λαμβάνεται μια μέτρηση και μετά ο δέκτης περιστρέφεται κατά μία  $\Delta\phi$  (π.χ.  $1^\circ$ ) και λαμβάνεται μια νέα μέτρηση κ.ο.κ. Το σύνολο των μετρήσεων για διαφορετικές γωνίες μπορεί να συσχετιστεί και μέσω ειδικού λογισμικού ώστε να υπολογιστεί η θέση του δέκτη με πολύ καλή ακρίβεια. Η παραπάνω μέθοδος λειτουργεί ακόμη και όταν ο δέκτης και ο πομπός είναι ακίνητα αρκεί να μπορεί να περιστραφεί με σταθερό βήμα η κεραία του δέκτη.

Ο συνδυασμός της απλότητας ,του χαμηλού κόστους και της ακρίβειας αυτής της μεθόδου ,την καθιστά αρκετά χρήσιμη για την χρησιμοποίηση της σε εφαρμογές εύρεσης κατεύθυνσης μέσω UAV.[15]



Εικόνα 2.10. Εύρεση Κατεύθυνσης μέσω Doppler [15]



## 2.4. Εντοπισμός Θέσης μέσω MEA

### 2.4.1 Δομή ενός MEA με Συστήματα Εντοπισμού Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών

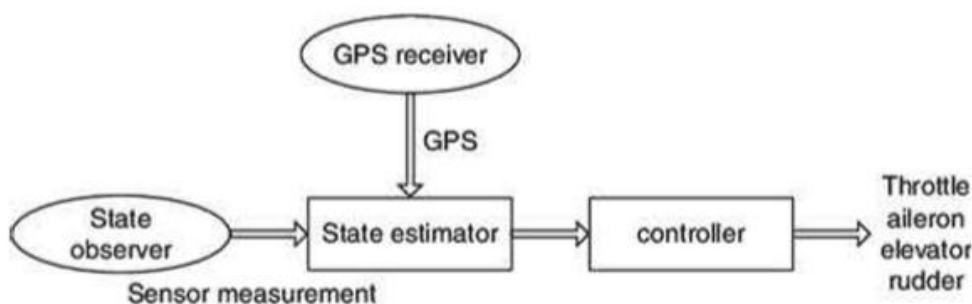
Στις προηγούμενες παραγράφους αναλύθηκαν οι μέθοδοι καθώς και οι κεραίες που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό της θέσης ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών. Στο άρθρο των H.A.Cook et Al, 2020 [35] περιγράφεται και αναλύεται ο εντοπισμός εκπεμπόμενων ραδιοσυχνοτήτων που μπορεί να επιτευχθεί αξιοποιώντας την, χαμηλού κόστους, τεχνολογία Software-Defined Radio (SDR) σε συνδυασμό με τον βαθμό ελευθερίας που προσφέρει ένα ΣμηΕΑ.

Για τον εντοπισμό ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών στην περίπτωση των UAV προτείνεται η τοποθέτηση SDR (Software-Defined Radio) και μιας υπολογιστικής μονάδας επεξεργασίας για να λειτουργήσουν ως αναλυτές φάσματος, τεχνικές εντοπισμού σήματος και κατάλληλο σύστημα επικοινωνίας του UAV με τον σταθμό βάσης για να μπορεί να μεταδίδει τις πληροφορίες που έχει λάβει αλλά και να λαμβάνει πληροφορίες ελέγχου από τον χειριστή.

Σε αυτό το άρθρο γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της κλασικής μεθόδου χρήσης μιας κατευθυντικής κεραίας για DF, έναντι άλλων συστημάτων DF που χρησιμοποιούν είτε δέσμη σάρωσης είτε το φαινόμενο Doppler, είτε μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύος είτε άλλες μεθόδους συμβολομετρίας. Ανεξάρτητα από τα μειονεκτήματα της τεχνικής εύρεσης κατεύθυνσης από κατευθυντική κεραία, η τεχνική αυτή σήμερα επικρατεί καθώς οι υπόλοιπες είναι αρκετά πιο ακριβές και δύσκολες στην εφαρμογή. Ακόμα όταν η ζώνη λειτουργίας είναι στις μικροκυματικές συχνότητες, οι «χειροκίνητες» τεχνικές εύρεσης κατεύθυνσης είναι οι μόνες κατάλληλες λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα την ευαισθησία/κατευθυντικότητα και το κόστος κατασκευής. Με την έλευση όμως της τεχνολογίας SDR μπορεί κάποιος και χρησιμοποιώντας τις τεχνικές DF που αναφέρθηκαν, να μειώσει δραστικά το μέγεθος και την πολυπλοκότητα των αντίστοιχων συστημάτων εύρεσης κατεύθυνσης.

Σχετικά με τον έλεγχο του ΣμηΕΑ μπορεί να γίνει είτε από απόσταση από τον χειριστή μέσω ραδιοζεύξης είτε με αυτόματο πιλότο. Ο έλεγχος του ΜΕΑ με αυτόματο πιλότο μπορεί είτε να διατηρήσει το ΣμηΕΑ στην επιθυμητή θέση είτε να το κατευθύνει σε ένα προγραμματισμένο δρομολόγιο. Ακόμα ο έλεγχος μπορεί να γίνει και ημιαυτόματα καθώς ο χειριστής μπορεί να οδηγεί το ΣμηΕΑ και ο αυτόματος πιλότος να ελέγχει το υψόμετρο και άλλες λειτουργίες σταθεροποίησης της πτήσης.

Εξαιρετική σημασίας για το παραπάνω είδος των εφαρμογών παίζει ο ελεγκτής πτήσης καθώς αποτελεί το κέντρο ελέγχου για όλα τα ΣμηΕΑ. Είναι η μονάδα επεξεργασίας στην οποία συνδέονται όλοι οι αισθητήρες που σχετίζονται με την πτήση του ΣμηΕΑ. Πέρα από αυτό στον ελεγκτή πτήσης συνδέονται και άλλα περιφερειακά όργανα όπως το GPS ,αισθητήρες σόναρ κλπ δίνοντας έτσι την δυνατότητα στο ΣμηΕΑ να εκτελεί πτήσεις με αυτονομία χωρίς να χρειάζεται ο χειριστής να επεμβαίνει συνεχώς για διορθώσεις της πορείας του ΜΕΑ. Κάποιοι προτεινόμενοι ελεγκτές πτήσης είναι οι εξής: Pixhawk, ArduPilot, Naza και iNav. Ουσιαστικά τα συστήματα αυτόματου πιλότου είναι συστήματα κλειστού βρόγχου και αποτελούνται από τα όργανα – αισθητήρες και τους ελεγκτές. Τα όργανα-αισθητήρες είναι αυτά που μετρούν την κατάσταση του περιβάλλοντος (state observer) πχ. οι μαγνητικοί αισθητήρες, το επιταχυνσιόμετρο κλπ και σε συνεργασία με το GPS φιλτράρονται κατάλληλα και δίνουν μία προσέγγιση της τρέχουσας θέσης-κατάστασης του ΜΕΑ. Αυτή σε συνεργασία με τον ελεγκτή πτήσης και την κατάλληλη μονάδα επεξεργασίας αποτελούν τον αυτόματο πιλότο των ΣμηΕΑ όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.11 Λειτουργική Δομή Αυτόματου Πιλότου ενός ΜΕΑ [35]



Για να επιτευχθεί μία αυτόνομη αποστολή, το ΣμηΕΑ πρέπει να μεταδίδει και να λαμβάνει πληροφορίες από και προς τον Σταθμό Ελέγχου Εδάφους (Σταθμό Βάσης). Γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας αυτόματου πιλότου, MAVLink (Micro Air Vehicle Link). Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιείται τόσο για την επικοινωνία του ΜΕΑ με τον Σταθμό Βάσης όσο και για την επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του. Τα κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου αυτόματου πιλότου είναι οι διαστάσεις και το βάρος του που πρέπει να είναι μικρά, το κόστος, η δυνατότητα ελεύθερης επεξεργασίας του λογισμικού του και η δυνατότητα αυτόματης από-προσγείωσης του ΣμηΕΑ.

#### 2.4.2 Εντοπισμός Εκπεμπόμενων Ραδιοσυχνοτήτων Μέσω Δικτύου Ασύρματων Αισθητήρων σε Σμήνος ΜΕΑ

Τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων έχουν ευρεία εφαρμογή από την επιτήρηση και τον εντοπισμό σε στρατιωτικές εφαρμογές έως και σε βιοιατρικές εφαρμογές. Οι R.R. Selmic et al προτείνουν στο άρθρο τους [36] μια μέθοδο εύρεσης κατεύθυνσης που βασίζεται στην θέση του αισθητήρα χρησιμοποιώντας δίκτυα με στατικούς και κινητούς αισθητήρες. Ο εντοπισμός ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών είναι μια τεχνική μέσα από την οποία ένα σμήνος ΣμηΕΑ συνεργάζεται με την βοήθεια των αισθητήρων τους, προσαρμόζοντας την θέση τους αυτόνομα και σε πραγματικό χρόνο προκειμένου να εντοπίσουν μία άγνωστη ηλεκτρομαγνητική εκπομπή. Για τον εντοπισμό του πομπού χρησιμοποιείται η τεχνική RSSI (Received Signal Strength Indicator) με την μέτρηση της απόστασης του κινούμενου δέκτη από τον πομπό.

Ένα σμήνος αισθητήρων προσαρμόζει τη θέση του βασιζόμενο στις τιμές που λαμβάνει, ή οποία εξαρτάται από το περιβάλλον (μέσο) και συγκλίνουν προς ένα σημείο στο οποίο εντοπίζουν κάποια ηλεκτρομαγνητική εκπομπή. Ο Selmic et al εκτέλεσαν μια σειρά πειραμάτων, στα οποία υπολογίζουν τα επίπεδα ισχύος που λαμβάνει ο αισθητήρας, τα μετατρέπουν σε σχετικές τιμές αποστάσεως βασιζόμενοι στο γεγονός ότι το λαμβανόμενο σήμα εξασθενεί εκθετικά (PLE-Path Loss Exponent)

και υπολογίζουν έτσι την θέση του πομπού χρησιμοποιώντας την στατιστική μεθοδολογία των ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι μέσα από μια σειρά δοκιμών με στατικούς και κινητούς κόμβους-αισθητήρες μελετούν τον βέλτιστο σχηματισμό του σμήνους των αισθητήρων για τον εντοπισμό του πομπού συγκρίνοντας το σφάλμα της πειραματικής του θέσης με την πραγματική του θέση.

### Πειραματική Διάταξη Υλικού-Λογισμικού

Στις πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω hardware και software: Ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων Crossbow IRIS, Java, Matlab και προγράμματα TinyOS.

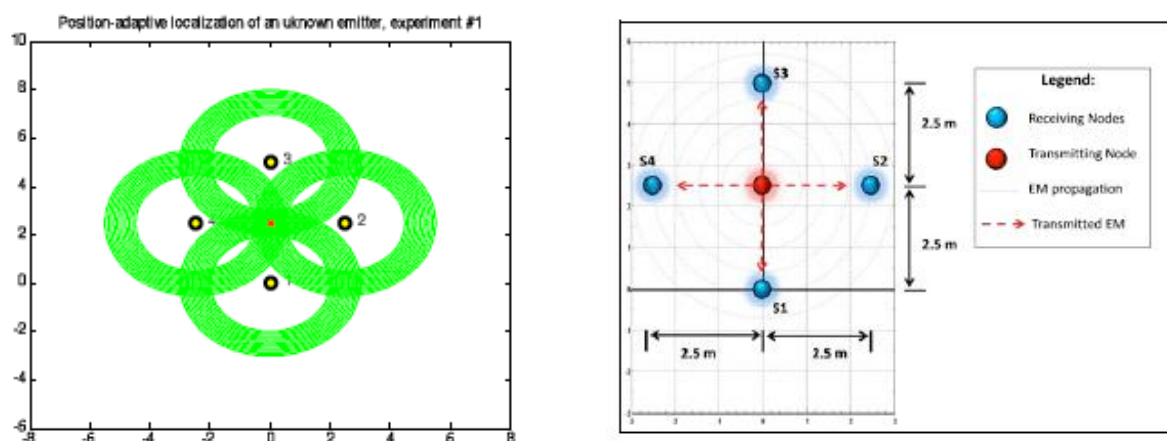
Το Crossbow IRIS 2,4 GHz είναι μια μονάδα που χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση ασύρματων αισθητήρων χαμηλής ισχύος, έχει μια παγκόσμια συμβατή ζώνη ISM στα 2,4 – 2,48 GHz, ταχύτητα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων 250 kbps μεταξύ των αισθητήρων σε απόσταση μέχρι 500 μέτρα χωρίς ενίσχυση. Ακόμα διαθέτει έναν IEEE 802.15.4 πομποδέκτη ευρέως φάσματος, με αντοχή στις παρεμβολές, προσφέροντας έτσι ασφάλεια στα δεδομένα. Για τις ανάγκες των δοκιμών προστέθηκε μία κεραία ground plane, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.12 η οποία προστατεύει τα ηλεκτρονικά της μονάδας από τα εισερχόμενα σήματα. Έτσι πραγματοποιούνται περισσότερες πολυκατευθυντικές μετρήσεις που είναι σημαντικές για την ενσωμάτωση των μονάδων αυτών σε επίγεια οχήματα ή σε αεροχήματα. Ο ρόλος αυτών των μονάδων δεν είναι μόνο να εντοπίζουν ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές αλλά να μεταδίδουν και τις τιμές RSSI στους γειτονικούς κόμβους, μέσω των οποίων με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων θα εντοπιστεί η θέση του πομπού.



**Εικόνα 2.12 Τροποποιημένος Κόμβος - Αισθητήρας για βελτιωμένες πολυκατευθυντικές μετρήσεις RSS [36]**

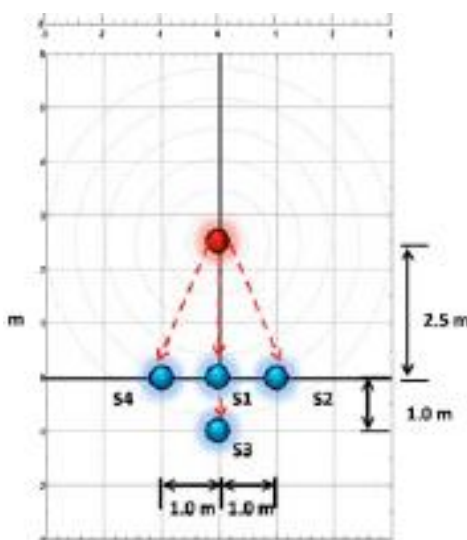
## Πειραματική Διαδικασία

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις κόμβοι σαν δέκτες και ένας κόμβος ως πομπός για τον εντοπισμό του κατάλληλου σχηματισμού των δεκτών ώστε να επιτευχθεί το μικρότερο σφάλμα στον υπολογισμό της θέσης του πομπού. Στην περίπτωση που δεν υπήρχε εμπόδιο μεταξύ του πομπού και των δεκτών, ο καταλληλότερος σχηματισμός ήταν το «διαμάντι», γεγονός αναμενόμενο μια και η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων βασίζεται στην τομή των κύκλων που σχηματίζονται από το λαμβανόμενο σήμα σε κάθε δέκτη, όπως αυτό φαίνεται στην εικόνα 2.13.



**Εικόνα 2.13** Αισθητήρες - Δέκτες σε σχηματισμό "Διαμάντι" γύρω από τον Πομπό [36]

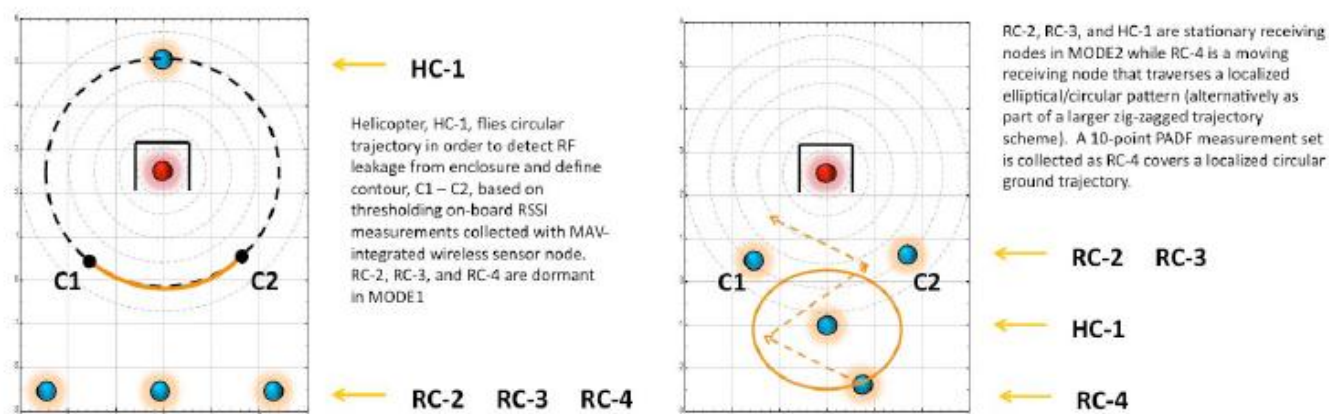
Στην συνέχεια τοποθετήθηκε ο πομπός σε ένα πλαστικό κουτί που είχε καλυφθεί, εκτός από μία πλευρά του, με αλουμινόχαρτο για να εμποδίζεται η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν μπροστά στην ακάλυπτη πλευρά του καθώς οι τιμές RSS ήταν μεγαλύτερες και η εκτίμηση της θέσης του πομπού πιο ακριβής. Ο σχηματισμός των δεκτών με το μικρότερο σφάλμα στην εκτίμηση της θέσης του πομπού φαίνεται στην εικόνα 2.14.



Εικόνα 2.14 Σχηματισμός Δεκτών Αισθητήρων [36]

Στην δεύτερη φάση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιούν ένα ΣμηΕΑ στο οποίο είχε ενσωματωθεί ένας αισθητήρας. Το ΣμηΕΑ πετούσε σε κυκλική τροχιά γύρω από το κουτί στο οποίο βρίσκονταν ο πομπός. Το κουτί όπως προαναφέρθηκε ήταν καλυμμένο από τις τρεις πλευρές με αλουμινόχαρτο και είχε τοποθετηθεί ένα μαύρο πανί σε αυτό για να μην εντοπίζεται από την κάμερα του ΣμηΕΑ. Καθώς πετούσε το ΣμηΕΑ λάμβάνε RSS τιμές από τον πομπό και εντόπιζε δύο ακραία σημεία C1, C2 μπροστά από την ακάλυπτη πλευρά του κουτιού καθώς είχε οριστεί ένα κατώφλι για αυτές τις τιμές όπως φαίνεται στην εικόνα 2.15. Στην συνέχεια σε αυτά τα σημεία πηγαίνουν δύο επίγεια οχήματα με ενσωματωμένους αισθητήρες και το ΣμηΕΑ λαμβάνει μία σταθερή θέση στο κέντρο αυτών των σημείων. Στην Β' Φάση του πειράματος προστίθεται ένα τρίτο επίγειο όχημα με αισθητήρα κινούμενο σε τροχία ζγκ ζγκ πραγματοποιώντας μετρήσεις από διαφορετικούς προσανατολισμούς σε συνεργασία με τους άλλους τρεις σταθερούς αισθητήρες για τον εντοπισμό της θέσης του πομπού όπως φαίνεται στην εικόνα 2.15.





Εικόνα 2.15 Εντοπισμός Πομπού με συνεργασία επίγειων και εναέριου αισθητήρα [36]

Μέσα από αυτή την μελέτη φαίνεται πως οι μετρήσεις RSS μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ αποτελεσματικά για τον εντοπισμό της θέσης ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών και η ακρίβεια τους μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του αριθμού των κόμβων και την κατάλληλη κατανομή τους. Τέτοιες εφαρμογές μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για τρομοκρατικούς σκοπούς όπως στην περίπτωση της πυροδότησης των αυτοσχέδιων βομβών. Μελλοντικές ερευνητικές μελέτες θα μπορούσαν να στραφούν στην ανάπτυξη εφαρμογών για τον εντοπισμό πολλαπλών πομπών από σμήνος αισθητήρων - ΣμηΕΑ ακόμα και αγνώστων πρωτοκόλλων επικοινωνιών.





### 3 Σύστημα Σμήνους Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

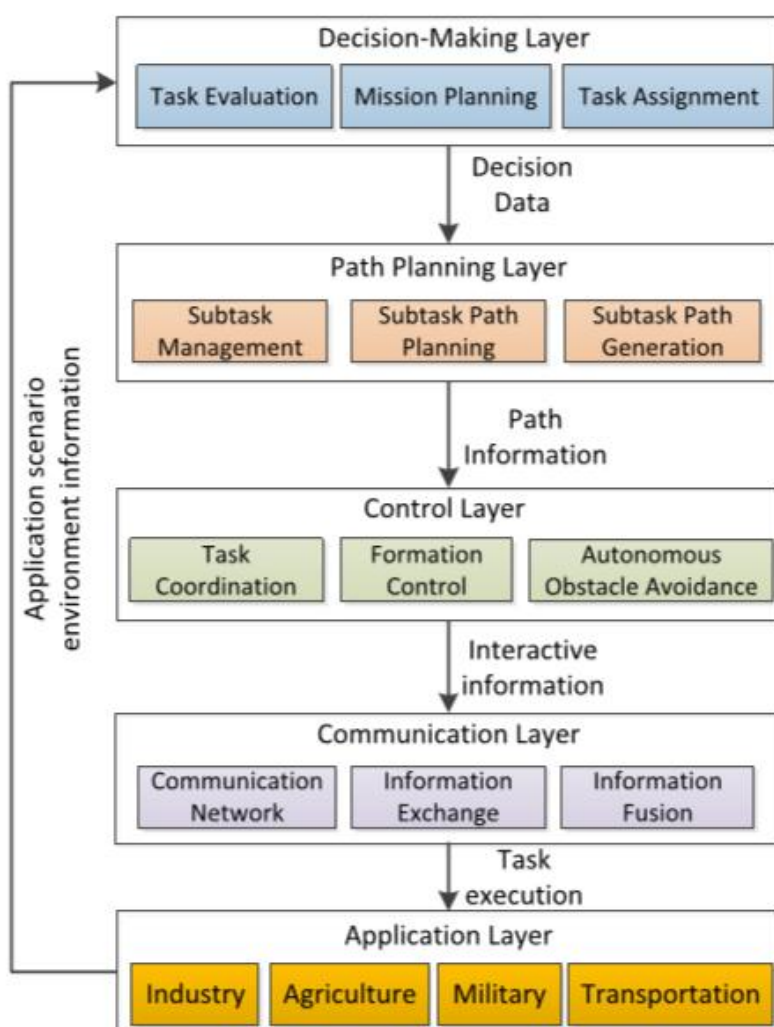
Στην φύση, για να καταπολεμηθούν τα μειονεκτήματα της ατομικότητας και να επιτευχθούν περισσότερα πλεονεκτήματα, πολλοί βιολογικοί οργανισμοί σχηματίζουν ομάδες, συνεργάζονται και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όπως οι αγέλες των λύκων, οι μέλισσες κλπ. Μελετώντας τις δυνατότητες των μεμονωμένων συμπεριφορών καθώς και τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης του βιολογικού συστήματος, μπορεί να επιτευχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο που να περιγράφει, μέσω της ανταλλαγής εσωτερικών πληροφοριών στο σύστημα, την επίτευξη της ομαλής συνεργατικής συμπεριφοράς μίας ομάδας και κατ' επέκταση ενός σμήνους.

Το γεγονός αυτό ώθησε την έρευνα στο να εξελιχθούν αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της συνεργασίας ομάδων, όμοιων ή και μη, συστημάτων με σκοπό για παράδειγμα τον σχεδιασμό μίας διαδρομής ή την κατανομή επιμέρους έργων. Έτσι η τεχνολογία ευφυών συστημάτων σε ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών αποτελεί έναν πολύ μεγάλο κεφάλαιο έρευνας τα τελευταία χρόνια.

#### 3.1. Ανάλυση δομής Ευφυούς Συστήματος Σμήνους

Καθώς αυξάνονται οι δυνατότητες και οι απαιτήσεις ενός ΜΕΑ και κατ' επέκταση ενός σμήνους η αρχιτεκτονική σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος γίνεται όλο και πιο περίπλοκη και αποτελεί μία συνεχώς αυξανόμενη πρόκληση για την επιστήμη. Έρευνες δείχνουν ότι ο ιεραρχικός έλεγχος ενός συστήματος σμήνους ΜΕΑ μπορεί να μειώσει την πολυπλοκότητα των στόχων που πρέπει να πετύχει το σμήνος καθώς βελτιώνει και την αποδοτικότητα του. Ο σχεδιασμός της εκτέλεσης των αποστολών ενός σμήνους αποτελεί συνδυασμό βελτιστοποίησης πολλών επιμέρους προβλημάτων και μπορεί να επιτευχθεί με τον ιεραρχικό διαχωρισμό επιπέδων ελέγχου ενός συστήματος σμήνους. Στην συνέχεια θα αναλυθεί η ιδέα του

Boskovic JD[32], ο οποίος διαχωρίζει ένα ευφυή σύστημα σμήνους σε πέντε επίπεδα. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα παρουσιάζονται οι σχέσεις μεταξύ των επιπέδων.



Εικόνα 3.1. Οι σχέσεις μεταξύ των επιπέδων [32]

Το επίπεδο λήψης απόφασης (Decision-Making Layer) είναι υπεύθυνο για την εκτίμηση, τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των εργασιών του σμήνους και μεταφέρει αυτά τα δεδομένα στο επόμενο επίπεδο που αφορά τον σχεδιασμό του δρομολογίου του σμήνους (Path Planning Layer). Το επίπεδο αυτό διαχωρίζει τις εργασίες σε επιμέρους εργασίες και σχεδιάζει τον τρόπο που θα εκτελεστούν βάσει των δεδομένων που έλαβε από το επίπεδο λήψης απόφασης. Το επίπεδο ελέγχου



(Control Layer) εκτελεί συντονισμό εργασιών μεταξύ των ομάδων του σμήνους, σύμφωνα με τις πληροφορίες που έλαβε από το προηγούμενο επίπεδο και πραγματοποιεί αυτόματη αποφυγή εμποδίων και έλεγχο του σχηματισμού του.

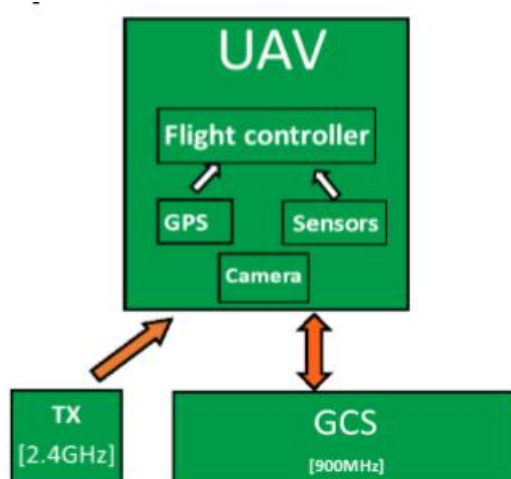
Το επίπεδο επικοινωνίας (Communication Layer) υλοποιεί το δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ των ατόμων ενός σμήνους σύμφωνα με τις πληροφορίες που δημιουργήθηκαν στο επίπεδο ελέγχου. Το επίπεδο εφαρμογής (Application Layer) θα ανατροφοδοτήσει το επίπεδο λήψης αποφάσεων με τις αντίστοιχες πληροφορίες περιβάλλοντος σύμφωνα με το εκάστοτε σενάριο. Μέσω της ιεραρχικής βελτιστοποίησης, το σμήνος αυτό, μπορεί να στοχεύσει σε σύνθετα σενάρια εργασιών και διαφορετικά πεδία εφαρμογών, για να επιτύχει ιεραρχικό συντονισμό και να ολοκληρώσει γρήγορα και με επιτυχία πολύπλοκες εργασίες.

Κάθε επίπεδο αποτελεί ένα τεράστιο κεφάλαιο μελέτης και έρευνας. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί το επίπεδο επικοινωνίας του παραπάνω μοντέλου καθώς θα αναλυθούν διάφοροι μέθοδοι που υλοποιούν το δίκτυο επικοινωνίας των ατόμων του σμήνους και την δυνατότητα εντοπισμού της θέσης του καθενός από τα υπόλοιπα.

### 3.2. Επικοινωνία μεταξύ Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων σε ένα Σμήνος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί ο τρόπος επικοινωνίας μεταξύ των UAV που απαρτίζουν ένα σμήνος με διάφορες μεθόδους που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πολιτικές ή στρατιωτικές εφαρμογές αντίστοιχα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως αναφέρεται στο άρθρο των Mitch Campion et al [22], κάθε μεμονωμένο UAV ελέγχεται ταυτόχρονα από ένα Ground Control System (GCS). Τα σμήνη UAV χρησιμοποιούν έναν υπολογιστή ως GCS που τρέχει το λογισμικού ελέγχου εδάφους. Οι υπολογιστές είναι εξοπλισμένοι με πομποδέκτη που στέλνει και λαμβάνει δεδομένα τηλεμετρίας από συνδεδεμένα UAV. Τα δεδομένα τηλεμετρίας περιλαμβάνουν πληροφορίες GPS, ταχύτητα εδάφους και άλλες παραμέτρους που συλλέγονται από αισθητήρες ωφέλιμου φορτίου. Αυτοί οι πομποδέκτες χρησιμοποιούν ελεύθερες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων, όπως 900MHz για αποστολή και λήψη. Σε γενικές γραμμές αξίζει να αναφέρουμε ότι τα UAV θα μπορούσαν όμως να έχουν υψηλότερα επίπεδα αυτονομίας λαμβάνοντας αποφάσεις μόνα τους, χρησιμοποιώντας υπολογιστές επί του ίδιου του σκάφους.



Εικόνα 3.2. Διάγραμμα hardware και ελέγχου ενός MEA [22]



Τα σμήνη UAV χρησιμοποιούν μία από τις δύο γενικές μορφές αρχιτεκτονικής επικοινωνίας σμήνους. Η μία βασίζεται στην αρχιτεκτονική υποδομών σμήνους UAV (Infrastructure based swarm architecture) και η άλλη σε αρχιτεκτονική ad-hoc δικτύων. (Flying ad-hoc network (FANET) architecture).

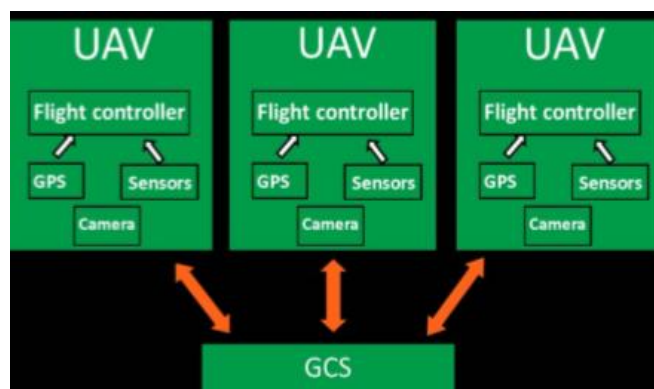
### 3.2.1 Αρχιτεκτονική σμήνους βασισμένη σε υποδομές

Η αρχιτεκτονική που βασίζεται στην υποδομή αποτελείται από έναν σταθμό ελέγχου εδάφους (GCS) που λαμβάνει πληροφορίες τηλεμετρίας από όλα τα αεροσκάφη του σμήνους και στέλνει εντολές σε κάθε UAV ξεχωριστά. Το GCS μπορεί να επικοινωνεί με μεμονωμένα drone σε πραγματικό χρόνο, στέλνοντας εντολές στους ελεγκτές πτήσης κάθε UAV ξεχωριστά. Ακόμα μπορεί μια λειτουργία πτήσης να είναι προ-προγραμματισμένη σε κάθε UAV και τα μεμονωμένα σχέδια πτήσης κάθε UAV να λειτουργούν ταυτόχρονα, ενώ το GCS να χρησιμοποιείται απλά για την παρακολούθηση του συστήματος. Αυτά τα σμήνη UAV θεωρούνται ημιαυτόνομα καθώς υφίσταται η ανάγκη ελέγχου από έναν κεντρικό σύστημα για την ολοκλήρωση της ανατιθέμενης αποστολής. Η τεχνική αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη στον έλεγχο σμηνών ΣμηΕΑ.

Ένα πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η βελτιστοποίηση της πτήσης και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί μπορούν να διεξαχθούν σε πραγματικό χρόνο από ένα GCS που διαθέτει υπολογιστή υψηλότερης απόδοσης από ό, τι θα μπορούσε να μεταφερθεί στο σκάφος ενός UAV. Επιπλέον, δεν υπάρχει διασύνδεση μεταξύ των drones αποφεύγοντας έτσι πιθανές δυσλειτουργίες στην μεταξύ τους επικοινωνία. Παρόλα αυτά η εξάρτηση του σμήνους από το GCS για το συντονισμό όλων των drone μπορεί να επιφέρει προβλήματα ιδιαίτερα στις στρατιωτικές εφαρμογές καθώς σε περίπτωση επίθεσης ή αποτυχίας του συστήματος επίγειου ελέγχου, διακυβεύεται η λειτουργικότητα ολόκληρου του σμήνους, ενώ παράλληλα θα πρέπει και το σμήνος να βρίσκεται εντός της εμβέλειας του GCS. Ακόμα οι RF επικοινωνίες μεταξύ GCS και UAV μπορούν να εντοπιστούν και να παρεμβληθούν.

Επιπλέον λόγω των μικρών δυνατοτήτων ωφέλιμου φορτίου του UAV, το υλικό που απαιτείται για την επίτευξη αξιόπιστης επικοινωνίας με μια υποδομή

ενδέχεται να περιορίσει τις δυνατότητες των σμηγνών καθώς το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου που θα χρησιμοποιηθεί για την λήψη δεδομένων θα είναι μειωμένο. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η έλλειψη κατανεμημένης λήψης αποφάσεων. Σε μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε υποδομές, το GCS συντονίζει τη λήψη αποφάσεων όλων των UAV με βάση υπολογισμούς και αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν στο GCS .



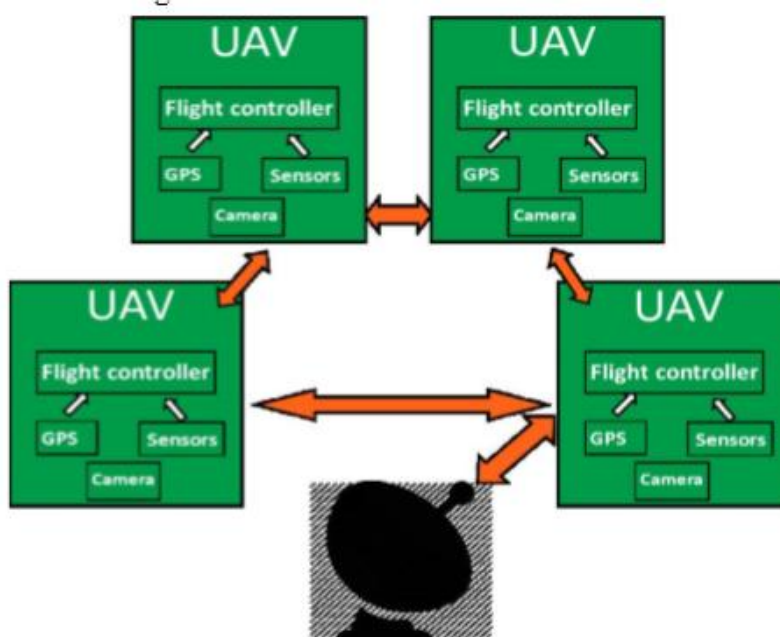
Εικόνα 3.3. Infrastructure based swarm architecture [22]

### 3.2.2 Αρχιτεκτονική σμήνους σε ad-hoc δίκτυο

Το FANETs (Flying Ad-hoc Networks) είναι μια αρχιτεκτονική κατά την οποία δημιουργείται ένα ασύρματο δίκτυο ανάμεσα σε ένα σμήνος UAV και τα μη επανδρωμένα αεροχήματα επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει πρόσβαση σε κάποιο επίγεια σημείο ελέγχου, αλλά τουλάχιστον ένα από αυτά πρέπει να είναι συνδεδεμένο σε βάση εδάφους ή δορυφόρο. Σε αυτή την περίπτωση τα UAV εκτελούν αυτόματες εργασίες και αποστολές χωρίς ανθρώπινη βοήθεια. Δεν χρειάζονται δρομολογητές ή σημεία πρόσβασης για ένα ad-hoc δίκτυο. Αντ 'αυτού, οι κόμβοι εκχωρούνται δυναμικά και εκχωρούνται εκ νέου βασιζόμενοι σε δυναμικούς αλγόριθμους δρομολόγησης. Σε ένα FANET, όλα τα UAV αποτελούν μέρος ενός δικτύου επικοινωνιών που δημιουργείται μεταξύ των UAV. Αυτό το δίκτυο επιτρέπει επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο μεταξύ UAV όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.

Η άμεση επικοινωνία μεταξύ των UAV επιτρέπει μια κατανομημένη λήψη αποφάσεων επειδή δεν εξαρτώνται από έναν επίγειο ελεγκτή, οπότε δεν κινδυνεύει η βιωσιμότητα του σμήνους από ενδεχόμενη καταστροφή του ή βλάβη του. Πρέπει να τονιστεί ότι αυτή η αρχιτεκτονική έχει τραβήξει αρκετά το ενδιαφέρον στον τομέα της έρευνας λόγω των φθηνότερων και μικρότερων ασύρματων συσκευών επικοινωνίας που απαιτούνται.

Ορισμένα μειονεκτήματα στα FANET είναι ότι απαιτείται υλικό δικτύου σε κάθε UAV και η απόσταση από την οποία τα UAV μπορούν αξιόπιστα να επικοινωνούν μεταξύ τους είναι ένας περιοριστικός παράγοντας για την εφαρμογή. Ακόμα η δυναμική αναδιάρθρωση της δρομολόγησης για εφαρμογές σμήνους UAV είναι μια δύσκολη εργασία που μπορεί να προκαλέσει απώλεια πακέτων οπότε θα είναι αναμενόμενο να έχουμε σφάλματα σε εφαρμογές όπου η ακριβής τηλεμετρία δεδομένων μεταξύ UAV είναι κρίσιμη.



Εικόνα 3.4. Flying ad-hoc network (FANET) architecture [22]





### 3.2.3. Υλοποίηση ad-hoc αρχιτεκτονικής σμήνους με υποστήριξη επίγειων υποδομών

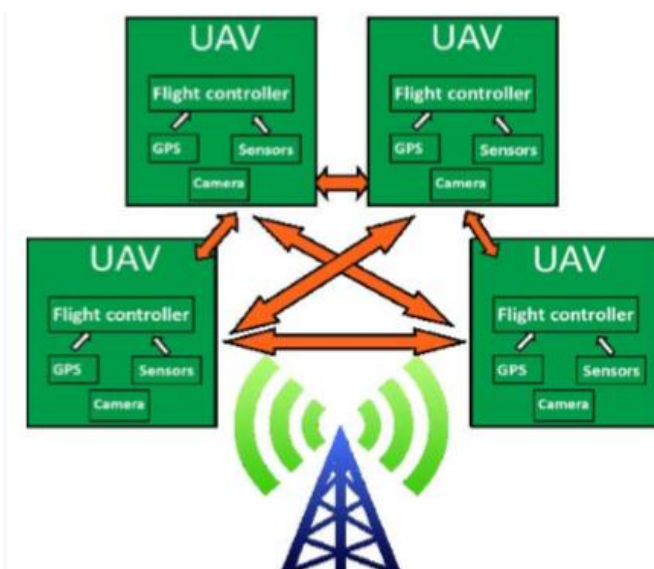
Οι Mitch Campion et al [22] προτείνουν ένα υβρίδιο δικτύου που βασίζεται σε υπάρχουσες υποδομές κάνοντας χρήση της υποδομής ασύρματων επικοινωνιών κινητής τηλεφωνίας αλλά με δημιουργία πρωτοκόλλου δικτύου μεταξύ των UAV χωρίς παρέμβαση ενός GCS. Αυτή η προτεινόμενη αρχιτεκτονική των σμηνών UAV αξιοποιεί τις δυνάμεις και των δύο αρχιτεκτονικών, ενώ μετριάζει μερικές αδυναμίες.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι μια προσαρμογή ενός ad-hoc δικτύου που υλοποιείται μέσω επίγειας υποδομής. Συγκεκριμένα, δημιουργείται ένα κυψελωτό δίκτυο στο οποίο επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ των UAV μέσω της αλληλεπίδρασης με την επίγεια υποδομή κινητής τηλεφωνίας. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ενώ διαφέρει από ένα καθαρό FANET στο ότι η επικοινωνία μεταδίδεται μέσω υποδομής είναι στην πραγματικότητα σαν ένα FANET αφού η υποδομή δεν λαμβάνει αποφάσεις. Αντίθετα, η λήψη αποφάσεων κατανέμεται μεταξύ των UAV και η υποδομή χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη μετάδοση δεδομένων. Τα υψηλά επίπεδα αυτονομίας μπορούν ακόμη να επιτευχθούν παρά την προτεινόμενη αρχιτεκτονική με βάση την επίγεια υποδομή. Για να υλοποιηθεί μία τέτοια αρχιτεκτονική πρέπει να αναπτυχθούν ωφέλιμα φορτία UAV που περιέχουν υπολογιστική ισχύ επαρκή για τον συντονισμό αποφάσεων με βάση τα δεδομένα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο που λαμβάνονται από συνδεδεμένα UAV. Αυτό επιτρέπει τη λήψη κατανεμημένων αποφάσεων με βάση την λογική, τη μηχανική μάθηση και άλλους κατανεμημένους αλγόριθμους ελέγχου.

Η ασύρματη τεχνολογία τέταρτης γενιάς (4G) διαθέτει μέγιστες ταχύτητες λήψης 1Gbps. Τα συστήματα επικοινωνίας 5G αναμένεται να διαθέτουν μέγιστες ταχύτητες λήψης 10 Gbps με καθυστέρηση δικτύου έως και 1ms. Ένα τυπικό μέγεθος πακέτου για επικοινωνίες UAV είναι μεταξύ 17 και 263 byte. Ενώ οι ταχύτητες 4G είναι επαρκείς για αυτά τα πακέτα, το 5G θα επιτρέπει πρόσθετη ροή δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων τύπων δεδομένων, όπως βίντεο από κάμερες ωφέλιμου φορτίου ή δεδομένα από συστήματα εντοπισμού στόχων και μέτρησης αποστάσεων. Η ικανότητα επίτευξης χαμηλού χρόνου καθυστέρησης είναι σημαντική



για την επικοινωνία μέσα σε ένα σμήνος UAV. Κεντρικός στόχος των επικοινωνιών 5G είναι οι επικοινωνίες μεταξύ μηχανών (M2M). Ακόμα το υλικό (hardware) που απαιτείται να διαθέτει το UAV για την αξιόπιστη πρόσβαση του σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πρέπει να είναι συμβατό με το UAV και ως προς το μέγεθος και ως προς το βάρος του. Οι κάρτες SIM ή οι κάρτες ασύρματης πρόσβασης 4G είναι ελαφριές και μπορούν εύκολα να προστεθούν σε έναν συνοδευτικό υπολογιστή στο σκάφος του UAV ή ακόμα και σε ένα συνοδευτικό έξυπνο τηλέφωνο. Το πλεονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι το μεγάλο γεωγραφικό εύρος των περιοχών για το οποίο θα μπορούν να επικοινωνούν τα UAV καθώς τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας παρέχουν ήδη μεγάλη κάλυψη και αυτή τείνει συνεχώς να αυξάνεται.



Εικόνα 3.5. Ad-hoc network realized through infrastructure support architecture [22]

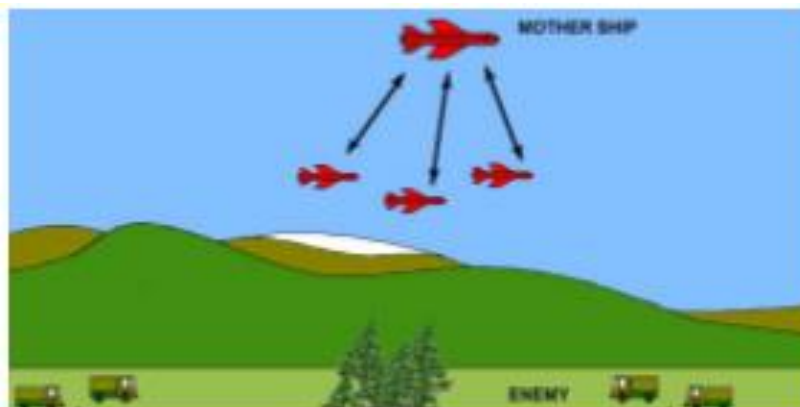
Οι παραπάνω αρχιτεκτονικές επικοινωνίας σμήνους UAV που αναπτύχθηκαν θα μπορούσαν να βρουν αρκετές πολιτικές εφαρμογές και να δώσουν λύση σε προβλήματα όπως για παράδειγμα την φύλαξη μεγάλων εργοστασιακών μονάδων, επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, εφαρμογές στον αγροτικό τομέα κλπ. Δεν θα πρέπει όμως να παραβλέψουμε και το γεγονός ότι η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας θα μπορέσει να επιφέρει πλεονεκτήματα και σε στρατιωτικές εφαρμογές αποτελώντας κρίσιμο πολλαπλασιαστή ισχύος για την άμυνα μιας χώρας. Στις



περιπτώσεις όμως που το σμήνος UAV θα επιχειρήσει σε εχθρικό έδαφος όπου θα υπάρχει επιτήρηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος θα πρέπει να δράσει αν δύναται χωρίς να γίνει αντιληπτό. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν μπορούμε να βασιστούμε εξ ολοκλήρου στις προαναφερθείσες αρχιτεκτονικές επικοινωνίας καθώς οι RF επικοινωνίες μπορούν εύκολα να γίνουν αντιληπτές από εχθρικά μέσα ηλεκτρονικού πολέμου και να παρεμβληθούν.

#### 3.2.4. Αξιόπιστα οπτικά ασύρματα δίκτυα σε σμήνη UAV

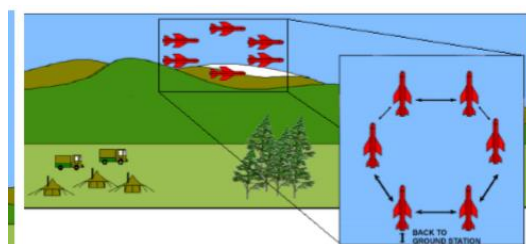
Οι Ch. Chlestil et al [24] προτείνουν σε άρθρο τους την χρήση της Free Space Optics (FSO) τεχνολογία επικοινωνίας για ένα σμήνος UAV η οποία βασίζεται στο φως που διαδίδεται σε ελεύθερο χώρο για ασύρματη μετάδοση δεδομένων για τηλεπικοινωνίες ή δικτύωση υπολογιστών. Αυτή η τεχνολογία έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι της RF επικοινωνίας καθώς δεν μπορεί ο εχθρός να αντιληφθεί την μεταφορά δεδομένων μέσω της οπτικής επικοινωνίας ούτε να την παρεμβάλει. Παρ'όλα αυτά σε αυτού του είδους την επικοινωνία αρκετά σημαντικός παράγοντας είναι η οπτική επαφή των UAV (Line of Sight –LOS).



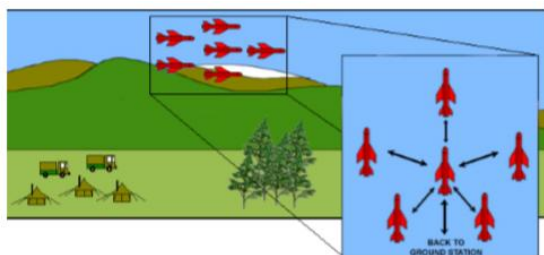
Εικόνα 3.6. Ανταλλαγή δεδομένων σμήνους με UAV με σταθμό επιτήρησης [24]

Στην παραπάνω φωτογραφία παρουσιάζεται μία πιθανή εφαρμογή αυτού του τρόπου επικοινωνίας μεταξύ ενός σμήνους UAV που πετάει σε χαμηλό ύψος και ενός εναέριου σταθμού επιτηρήσεως που πετάει σε μεγαλύτερο ύψος και λαμβάνει δεδομένα από το σμήνος μέσω οπτικής επαφής.

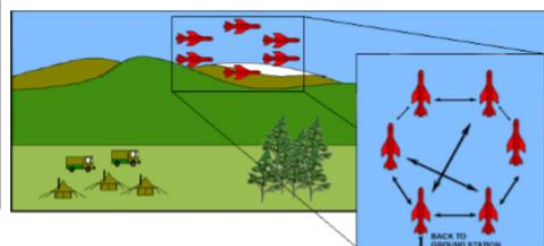
Με αυτόν τον τρόπο επικοινωνίας θα μπορεί το σμήνος να πετάει σε διάφορους σχηματισμούς ώστε να εξασφαλίζει την βιωσιμότητα και την αξιοπιστία του. Μερικά παραδείγματα είναι ο σχηματισμός ring (a) έτσι ώστε αν χαθεί η επικοινωνία μεταξύ δύο UAV να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί άλλη σύνδεση καθώς έχουν πολυκατευθυντική οπτική επαφή. Άλλος σχηματισμός είναι ο star (b) στο κέντρο του οποίου υπάρχει Οπτική Πολυκατευθυντική Μονάδα (Optical Multipoint Unit) που δρα σαν αναμεταδότης και τέλος το δίκτυο mesh (c) που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω σχηματισμών.



(a) Ring Architecture



(b) Star Architecture



(c) Meshed Architecture

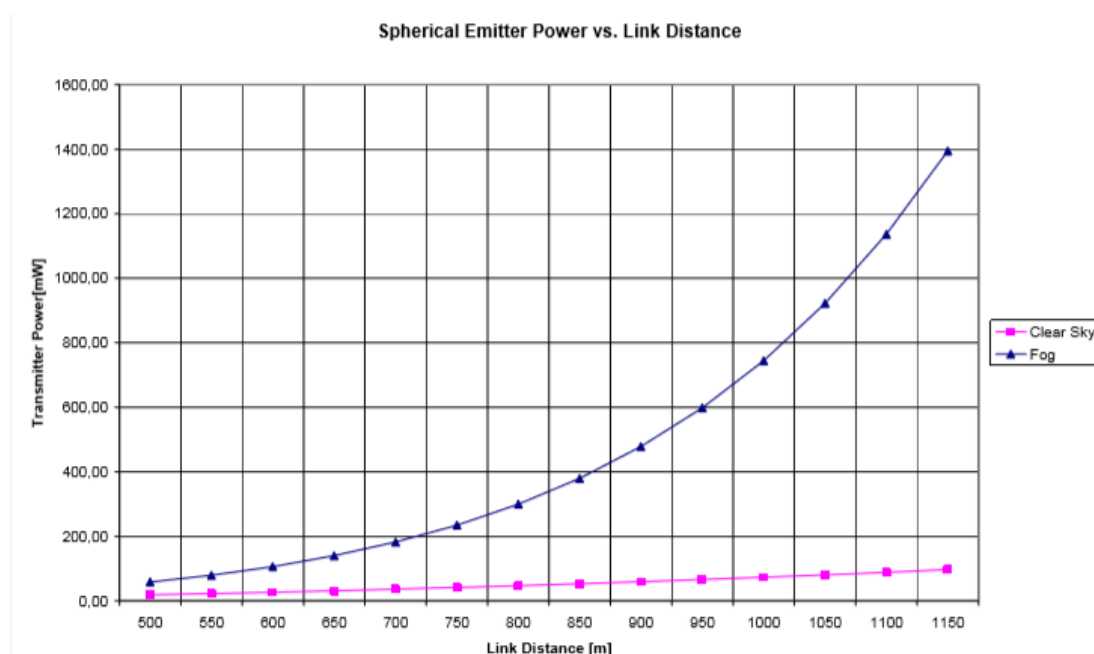
Εικόνα 3.7. Σχηματισμοί Σμήνους MEA [24]

Πέρα από τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα καθώς απαιτείται οπτική επαφή. Σημαντικό πρόβλημα στην οπτική επικοινωνία αποτελεί η απώλεια οπτικής επαφής, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, πιθανές απώλειες λόγω της γεωμετρίας του αεροσκάφους καθώς και η αύξηση της απόστασης μεταξύ των αεροσκαφών που απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην επίτευξη της οπτικής ζεύξης.

Οι Ch. Chlestil et al [24] προτείνουν πως το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να καταπολεμηθεί τοποθετώντας πάνω στα UAV είτε σφαιρικούς ομοιοκατευθυντικούς



πομπούς που θα επιτρέπουν την εκπομπή ακτινών σε διάφορες κατευθύνσεις είτε με την χρήση πολλαπλών πομπών υψηλής κατευθυντικότητας με δυνατότητα μεγάλης απόκλισης της εκπεμπόμενης δέσμης. Η απαιτούμενη οπτική ισχύς υπολογίζεται βάσει παραδοχών ευαισθησίας δέκτη, ρυθμού σφάλματος bit (BER) και ρυθμού δεδομένων. Οι παραπάνω προδιαγραφές δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν με εμπορικά συστήματα παρακολούθησης επειδή είναι πάντα σχεδιασμένα για ένα μόνο κανάλι μετάδοσης. Το Διάγραμμα 1 δείχνει μια σημαντική αύξηση της απαιτούμενης ισχύος πομπού για αποστάσεις ζεύξης άνω των 900 m για ομιχλώδεις καιρικές συνθήκες. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί καθώς πρέπει να παράγεται περισσότερη ισχύ λείζερ για να ξεπεραστούν οι απώλειες λόγω της ομίχλης σε κάθε κανάλι μετάδοσης. Σε συνθήκες καθαρού ουρανού, η ατμοσφαιρική εξασθένηση σε μια μικρή απόσταση είναι φυσιολογική και η απαιτούμενη ισχύς λείζερ δείχνει μια ομαλή κλίση.



Διάγραμμα 1. Απαιτούμενη ενέργεια εκπομπής για διάφορες αποστάσεις ζεύξης [24]

Η παραπάνω τεχνική επικοινωνίας μας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα ιδιαίτερα σε στρατιωτικές εφαρμογές καθώς λειτουργεί σε silent mode ("αθόρυβη λειτουργία") όπου δεν εκπέμπεται RF και επιτυγχάνεται χαμηλή ανιχνευσιμότητα της δέσμης φωτός από τον εχθρό. Τα σμήνη UAV που είναι εξοπλισμένα με FSO μπορούν να φτάσουν στην περιοχή που θα επιχειρήσουν χωρίς να μεταδώσουν σήματα RF, επομένως αυτοί οι σχηματισμοί δεν ανιχνεύονται από ηλεκτρονική



αναγνώριση. Τέλος κατά την διάρκεια μίας αποστολής παρατήρησης και παρακολούθησης στην περιοχή-στόχο ή σε μια επίθεση, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον πρόσθετο εξοπλισμό επικοινωνίας RF είτε σαν εφεδρικό μέσο επικοινωνίας είτε σαν μέσω για την πρόκληση παρεμβολών και άλλου τύπου ηλεκτρονικών επιθέσεων στον εχθρό.

### 3.2.5. Εντοπισμός θέσης με χρήση ηχητικών τεχνολογιών

Μια άλλη προσέγγιση σχετικά με την επικοινωνία των Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων καθώς και με τον εντοπισμό της θέσης των υπολοίπων ΣμηΕΑ σε ένα σμήνος μας δίνουν οι Meysam Basiri et al [25] και συγκεκριμένα περιγράφουν μία λύση όπου χρησιμοποιείται ο ήχος ως η κύρια πηγή πληροφορίας για να μετρηθεί η σχετική κατεύθυνση των υπόλοιπων drone.

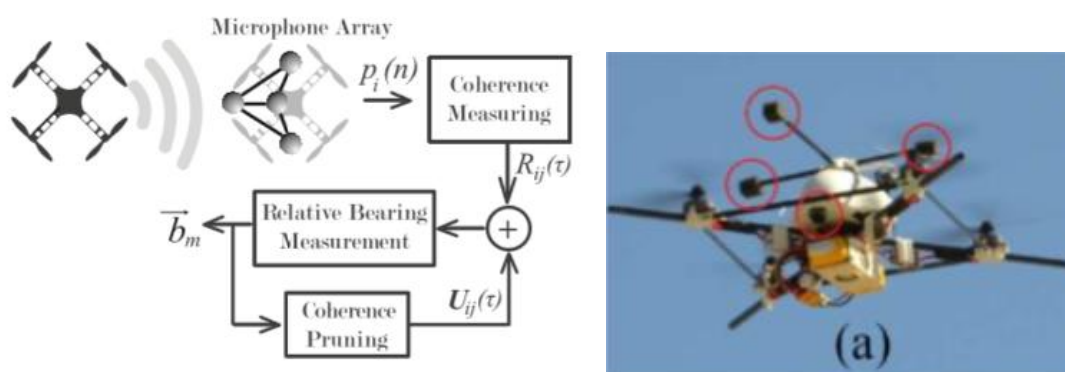
Το ζητούμενο είναι η αναγνώριση της σχετικής θέσης του κάθε ΣμηΕΑ για να αποκτηθούν πληροφορίες για την θέση των υπόλοιπων Drone ενός σμήνους. Αυτή η πληροφορία είναι απαραίτητη για διάφορους λόγους όπως για την αποφυγή συγκρούσεων των Μη Επανδρωμένων καθώς και για τον έλεγχο του σχηματισμού τους. Το πρόβλημα της ανίχνευσης της σχετικής θέσης έχει προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας διάφορα εξωτερικά συστήματα όπως πχ κάμερες ,GPS κλπ. Δεδομένου όμως του γεγονότος ότι τα μικρά drone δεν μπορούν να φέρουν μεγάλο φορτίο και του περιορισμού των προαναφερθέντων συστημάτων(κάμερα και GPS είναι ευάλωτα σε περιβάλλοντα εκτενούς μεγέθους και σε παρεμβολές) ιδιαίτερα σε μη επανδρωμένα που θα χρησιμοποιηθούν σε στρατιωτικές εφαρμογές και θα δράσουν σε εχθρικό και έντονο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, οι M.Basiri et al προτείνουν ενσωματωμένους αισθητήρες που βασίζονται στον ήχο για την μέτρηση της σχετικής θέσης των μη επανδρωμένων καθώς με αυτόν τον τρόπο έχουμε πολλά πλεονεκτήματα. Αρχικά είναι ανεξάρτητα από τις συνθήκες φωτισμού και ορατότητας οπότε μπορούν να λειτουργούν τη νύχτα. Βασίζονται σε αισθητήρες μικροφώνου, οι οποίοι έχουν χαμηλότερο κόστος, όχι μεγάλο βάρος, είναι μικροί και παθητικοί άρα είναι κατάλληλοι για μικρά drone. Τα κατευθυντικά μικρόφωνα επιτρέπουν την πλήρη κάλυψη 3D που απαιτείται για εναέρια ρομπότ. Επιπλέον, τα ηχητικά κύματα θα μπορούν να παρέχουν πληροφορίες ξεπερνώντας εμπόδια ,όπως πχ άλλα ΣμηΕΑ

λόγω των ιδιοτήτων που προσφέρουν τα χαρακτηριστικά των ηχητικών κυμάτων . Ακόμα, δεδομένου ότι ο κινητήρας των περισσότερων ΣμηΕΑ παράγει ήχο, ο ήχος αυτός θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για παθητική απόκτηση της σχετικής θέσης των ΜΕΑ που ανήκουν στο σμήνος καθώς και άλλων ιπτάμενων μέσων, ίσως όχι φιλικά διακείμενων, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο έγκαιρη προειδοποίηση για την ύπαρξη τους, τόσο στο σμήνος όσο και στο έδαφος .Στην συνέχεια θα αναφερθούν ένα παθητικό και ένα ενεργητικό σύστημα που βασίζεται στον ήχο.

### 3.2.5.1. Παθητικό ηχητικό σύστημα

Το παθητικό ενσωματωμένο σύστημα μετράει την σχετική κατεύθυνση των άλλων drone βασιζόμενο ολοκληρωτικά στον ήχο της μηχανής τους αποτελώντας έτσι μια εξαιρετικά αποδοτική ενεργειακή λύση. Αυτή η μέθοδος είναι αποδοτική όταν δεν υπάρχει ήχος από την ίδια την μηχανή του drone ή όταν αυτός είναι διαφορετικός γι' αυτό χρησιμοποιείται από ΣμηΕΑ σταθερής πτέρυγας ή ΣμηΕΑ που φέρουν έλικες και βρίσκονται στο έδαφος ή προσκολλημένα σε τοίχο, ταβάνι κλπ.

Στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα φαίνονται οι βασικές μονάδες ενός παθητικού συστήματος μέτρησης ήχου που αναλύονται αμέσως πιο κάτω και στην εικόνα ένα drone με συστοιχία μικροφώνων.



Εικόνα 3.8. Σχηματικό διάγραμμα παθητικού συστήματος μέτρησης ήχου (αριστερά) και drone με συστοιχία μικροφώνων (δεξιά) [25]





- **Microphone Array**

Μια ενσωματωμένη συστοιχία μικροφώνων χρησιμοποιείται για τη ταυτόχρονη μέτρηση των ηχητικών κυμάτων σε διαφορετικά σημεία στον χώρο. Απαιτείται ελάχιστος αριθμός τεσσάρων μικροφώνων, όχι όλα τοποθετημένα στο ίδιο επίπεδο, για τον υπολογισμό της κατεύθυνσης των πηγών ήχου σε 3D χωρίς ασάφεια.

Τα ηχητικά κύματα συλλέγονται από τα μικρόφωνα και μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα. Αυτά τα σήματα στη συνέχεια ενισχύονται και φιλτράρονται χρησιμοποιώντας βασικά αναλογικά φίλτρα για την απομάκρυνση του ανεπιθύμητου θορύβου. Όλα τα μικρόφωνα λαμβάνουν ταυτόχρονα δείγματα από τα σήματα, τα οποία μετατρέπονται σε ψηφιοποιημένη μορφή με συχνότητα δειγματοληψίας  $F_s$ . Αφού ληφθεί μια διακριτή ακολουθία  $N$  δειγμάτων από κάθε μικρόφωνο, περνούν στη μονάδα μέτρησης συνοχής για την περαιτέρω επεξεργασία και τον σχετικό προσδιορισμό της θέσης.

- **Coherence Measuring Unit**

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί αυτή η συσκευή βασίζεται στις χρονικές διαφορές των χρόνων άφιξης (TDOA) των σημάτων που χρησιμοποιούνται στον εντοπισμού του ήχου. Αυτή η μονάδα ξεκινά μετρώντας την συσχέτιση ( $R_{ij}$ ) μεταξύ κάθε ζεύγους σημάτων που φτάνει σε κάθε μικρόφωνο, ως συνάρτηση της χρονικής καθυστέρησης ( $\tau$ ) [25]. Μόνο οι τιμές του  $R_{ij}(\tau)$  για όλες τις πιθανές διακριτές χρονικές καθυστερήσεις στο εύρος  $\pm \tau_{max}$  αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία. Η μέγιστη χρονική καθυστέρηση  $\tau_{max}$  περιορίζεται από συχνότητα δειγματοληψίας  $F_s$  και την απόσταση  $dm$  μεταξύ των δύο μικροφώνων:

$$\tau_{max} = \frac{dm}{c} F_s$$

Η διερεύνηση του ( $R_{ij}$ ) μόνο για ένα σύνολο ακέραιων καθυστερήσεων περιορίζει τη λύση των μετρήσεων, στη συχνότητα δειγματοληψίας και την απόσταση των μικροφώνων.





- **Relative Bearing Measurement Unit**

Μετά την εύρεση της συσχέτισης ( $R_{ij}$ ) για όλα τα ζεύγη μικροφώνων  $i, j$ , πραγματοποιείται αναζήτηση για την πιο πιθανή κατεύθυνση πηγής  $b_m$ . Αυτή είναι η κατεύθυνση που μεγιστοποιεί το άθροισμα των μετρήσεων συσχέτισης από όλα τα ζεύγη.

$$\vec{b}_m = \arg \max_{\vec{b}} \sum_{i,j} R_{ij}(\tau_{\vec{b}ij})$$

Όπου  $\tau_{\vec{b}ij}$  είναι η αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση αν η πηγή είναι στην κατεύθυνση  $\vec{b}$  και υπολογίζεται από τις συντεταγμένες των μικροφώνων  $i$  και  $j$  σύμφωνα με την παρακάτω σχέση [25].

$$\tau_{\vec{b}ij} = \frac{\vec{x}_{ij} \cdot \vec{b}}{c}$$

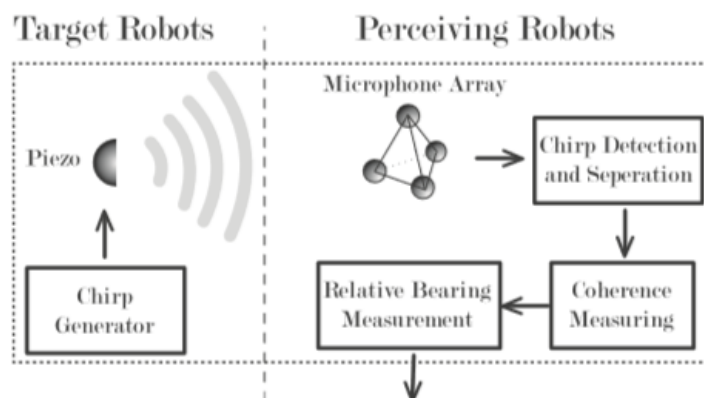
- **Coherence Pruning Unit**

Η προηγούμενη μονάδα περιγράφει μία μέθοδο εντοπισμού ενός γειτονικού ρομποτικού UAV εντοπίζοντας την κατεύθυνση του βρίσκοντας την μέγιστη συσχέτιση των σημάτων από όλα τα ζεύγη μικροφώνων. Στην περίπτωση πολλαπλών γειτονικών ρομπότ, αυτή η μέθοδος θα παρέχει την κατεύθυνση της κυρίαρχης πηγής ήχου που εμφανίζει την υψηλότερη συσχέτιση στις μετρήσεις ομοιότητας. Για μια ομοιογενή ομάδα ρομπότ με τα ίδια χαρακτηριστικά ήχου, η κυρίαρχη πηγή ήχου θα αντιστοιχεί στον πλησιέστερο γείτονα. Ωστόσο, στην πράξη, αυτό δεν συμβαίνει πάντα, καθώς οι ήχοι του κινητήρα ποικίλλουν ανάλογα με την ισχύ του λόγω και της αντίστοιχης ταχύτητας που μπορεί να αναπτύσσει ανά περίπτωση. Γι αυτό το λόγο η Coherence Pruning Unit χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών άλλων υπάρχοντων ρομπότ που ενδεχομένως κρύβονται πίσω από τον ήχο του κυρίαρχου ρομπότ. Η ιδέα λειτουργίας αυτής της μονάδας είναι να μειώσει την επίδραση του κυρίαρχου ρομπότ στις μετρήσεις συσχέτισης για να

εντοπίσει άλλα ρομπότ στα οποία η προσπάθεια συσχέτισης των λαμβανόμενων σημάτων είναι πιο δύσκολη.

### 3.2.5.2. Ενεργητικό ηχητικό σύστημα

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ενεργή ηχητική σηματοδότηση όπου τα ρομπότ UAV παράγουν μοναδικούς ήχους για να βοηθήσουν ο ένας τον άλλον για την εύρεση των σχετικών πληροφοριών κατεύθυνσης παρά τον έντονο θόρυβο του κινητήρα. Στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου.



Εικόνα 3.9. Σχηματικό διάγραμμα ενεργητικού συστήματος μέτρησης ήχου [25]

Το σύστημα χωρίζεται σε δύο μέρη, το «Target Robots» και το «Perceiving Robots» για να απεικονίσει τις κύριες μονάδες του συστήματος σε κάθε κατάσταση. Στην κατάσταση στόχου ρομπότ, το "Chirp Generator" ενός ρομπότ παράγει μοναδικό ήχο chirp προκαθορισμένου ρυθμού και συχνότητας. Το ρομπότ που έχει ως αποστολή τον εντοπισμό των υπόλοιπων, συλλέγει τα ηχητικά κύματα από μια ενσωματωμένη συστοιχία μικροφώνων. Αυτά ελέγχονται συνεχώς από τη μονάδα "Chirp Detection and Separation" για την ύπαρξη του χαρακτηριστικού ηχητικού σήματος στο ηχητικό μείγμα, που εκπέμπουν αυτά που θέλουν να εντοπιστούν. Όταν ανιχνευθεί ένα πλήρες τέτοιο ηχητικό σήμα, αφαιρείται από το μείγμα ήχου και μεταφέρεται στη μονάδα "Μέτρηση συνοχής", όπου μετράει την φασική συμφωνία μεταξύ κάθε ζεύγους σημάτων μικροφώνου, ως συνάρτηση της χρονικής καθυστέρησης ( $\tau$ ) που εφαρμόζεται σε καθένα από αυτά ( $R_{ij}$ ) όπως περιγράφεται



παραπάνω. Στην συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τις μονάδες του παθητικού συστήματος εντοπισμού θέσης ,όπως περιγράφονται στην παρ. 3.2.5.1.

Και οι δύο μέθοδοι που αναφέρθηκαν χρησιμοποιήσαν στις δοκιμές με μια σειρά μικροφώνων μικρού βάρους για τη μέτρηση της κατεύθυνσης του ήχου. Η παθητική μέθοδος βασίστηκε στον διαθέσιμο ήχο του κινητήρα των drone και έδειξε καλή ακρίβεια στη μέτρηση της κατεύθυνσης έως και τριών ΣμηΕΑ με την απουσία θορύβου από τον ίδιο τον κινητήρα. Η ενεργή μέθοδος βασίστηκε στην λήψη ακουστικών σημάτων εκπεμπόμενα από drone που επιτρέπουν τη λήψη των σχετικών ήχων από τις μηχανές τους παρουσία θορύβου από την ίδια την μηχανή του drone που λαμβάνει τα σήματα, για την αύξηση του εύρους ανίχνευσης και τη διάκριση της ταυτότητας των.

### 3.3. Ασφάλεια Επικοινωνίας Σμήνους

Παρότι η φύση της επικοινωνίας σε ένα σμήνος, λόγω της οπτικής επαφής των ζεύξεων, επιτρέπει τον υψηλό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, καθιστά επίσης πιο εύκολη την παρεμβολή της επικοινωνία μεταξύ του ΣμηΕΑ και του σταθμού βάσης εδάφους. Ως εκ τούτου, έχουν προταθεί διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας για την ασφάλεια επικοινωνιών μεταξύ των ατόμων ενός σμήνους[32]. Ένα από αυτά χρησιμοποιεί για τη βελτίωση της ασφαλούς επικοινωνίας, ένα σύστημα επικοινωνίας, συνεργασίας πολλαπλών ΣμηΕΑ. Ένας ΣμηΕΑ- παρεμβολέας μπορεί να πετάει κοντά σε ένα πιθανό σύστημα υποκλοπής σήματος ή ραντάρ και να εκπέμπει τεχνητό θόρυβο για να παρεμβάλλει το σύστημα υποκλοπής [33]. Ταυτόχρονα, για τη βελτιστοποίηση της ασφάλειας του συστήματος, προτείνεται μια συνεργατική μέθοδο παρεμβολής, η οποία χρησιμοποιεί μια μέθοδο εκπομπής τεχνητών παρεμβολών για την προστασία της επικοινωνίας γειτονικών ΣμηΕΑ, από την ύπαρξη συστημάτων υποκλοπής σημάτων επικοινωνίας [34] .Το ένα ΣμηΕΑ αποστέλλει εμπιστευτικές πληροφορίες στο έδαφος και το άλλο συνεργατικό ΣμηΕΑ μεταδίδει σήματα παρεμβολών για την ασφάλεια της επικοινωνίας. Σε άλλες μελέτες έχουν προταθεί ΜΕΑ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυναμικά είτε για την μετάδοση της πληροφορίας είτε ως παρεμβολείς.



### 3.4. Ερευνητικές Τάσεις και Μελλοντικοί Τομείς Έρευνας

Η επικοινωνία μεταξύ των ομάδων ΣμηΕΑ χρησιμοποιείται κυρίως για την ανταλλαγή πληροφοριών κατάστασης των ΣμηΕΑ και δεδομένων από τα φορτία που φέρουν (κάμερες, αισθητήρες κλπ.). Όταν ο αριθμός των ομάδων αυτών είναι μεγάλος, υπάρχουν πολλά είδη αποστολών, υψηλές ταχύτητες πτήσης, συχνές αλλαγές στις σχετικές σχέσεις χώρου και χρόνου των ΣμηΕΑ, η αποτελεσματικότητα της μετάδοσης πληροφοριών καθιστά το δίκτυο επικοινωνίας του σμήνους αρκετά απαιτητικό.

Οι κύριες τρέχουσες και μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις σχετικά με τα δίκτυα επικοινωνίας του σμήνους είναι οι παρακάτω[32].

- DELAY-TOLERANT NETWORKING (DTN): Επίλυση προβλημάτων δικτύου σε ένα δυναμικό περιβάλλον.
- NETWORK FUNCTION VIRTUALIZATION (NFV): Δημιουργία λογισμικού και κατάλληλης υποδομής για οπτικοποίηση του δικτύου επικοινωνίας.
- SOFTWARE-DEFINED NETWORKING (SDN): Διαχωρισμός μεταξύ του επιπέδου ελέγχου των ΜΕΑ και του επιπέδου δεδομένων.
- LOW POWER AND LOSSY NETWORKS (LLT): Αποτελεσματική δικτύωση με περιορισμένους πόρους.
- Πάνω στην έρευνα σχετικά με τους εναέριους σταθμούς βάσης, τα FANET που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούν τις ίδιες ζώνες συχνοτήτων ασύρματης επικοινωνίας με τις δορυφορικές επικοινωνίες και τα δίκτυα GSM, γεγονός που θα προκαλέσει προβλήματα αλληλοπαρεμβολών μεταξύ συχνοτήτων. Επομένως, είναι απαραίτητο να τυποποιηθούν οι ζώνες συχνοτήτων επικοινωνίας FANET και να σχεδιαστούν οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης.



- Στον τομέα της επικοινωνίας των ΣμηΕΑ, μαζί με τα μέτρα που αναφέρθηκαν για την ασφάλεια επικοινωνίας μεταξύ των ατόμων ενός σμήνους, θα μπορούσε μελλοντικά να ερευνηθεί η παραμόρφωσης του σήματος και τα αντίμετρα στην υποκλοπή της πληροφορίας μέσα από την συνεργασία πολλαπλών ΜΕΑ.



#### 4. Case Studies: Εφαρμογές Ευφυών Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

##### 4.1. Εντοπισμός ηλεκτρομαγνητικών πηγών εδάφους μέσω ενός ή περισσοτέρων Drone (Σμήνος Drone)

Στο παραπάνω κεφάλαιο έγινε αναφορά σχετικά με τους τρόπους που μπορούν να επικοινωνήσουν πολλά drone μαζί ώστε να δρουν σαν σμήνος και να αποφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα τόσο σε στρατιωτικές όσο και σε πολιτικές εφαρμογές. Σε ένα σύγχρονο στρατιωτικό επιχειρησιακό περιβάλλον, κομβικό σημείο για την επίτευξη τόσο των τακτικών όσο και των επιχειρησιακών στόχων αποτελεί ο εντοπισμός και πιθανόν ο έλεγχος των επικοινωνιών του αντιπάλου, γεγονός το οποίο θα επιφέρει σημαντικό πλεονέκτημα στις φίλιες δυνάμεις. Συνήθως τα μέσα Ηλεκτρονικού Πολέμου που είναι επιφορτισμένα με αυτήν την αποστολή είναι επίγεια με αποτέλεσμα να έχουν δυνατότητες επιτήρησης του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος σε συγκεκριμένο τομέα. Ακόμα λόγω του επίγειου χαρακτήρα τους μπορεί να αποτελέσουν σημαντικούς στόχους για τον εχθρό. Συμπεραίνουμε εύκολα λοιπόν πως αν χρησιμοποιηθεί ένα ΣμηΕΑ ή ακόμα καλύτερα σμήνος ΣμηΕΑ για των εντοπισμό ηλεκτρομαγνητικών πηγών εδάφους οι παραπάνω περιορισμοί εξαλείφονται και το σύστημα αυτό θα αποτελέσει σημαντικό πολλαπλασιαστή ισχύος της δύναμης που τον διαθέτει. Ακόμα η τυχόν κατάρριψη τους δεν θα επιφέρει μεγάλο πλήγμα και δεν θα βλάψει το ανθρώπινο δυναμικό.

Στο άρθρο των Andre Barka et al [26] περιγράφεται η τοποθέτηση στην άτρακτο ενός αεροσκάφους συστοιχίας κεραιών για τον εντοπισμό ηλεκτρομαγνητικών πηγών στο έδαφος. Αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.1. Συστοιχία κεραιών σε ΜΕΑ για την εύρεση κατεύθυνσης σήματος [26]

Η ανάλυση των καθυστερήσεων φάσης μεταξύ της πηγής εκπομπής που βρίσκεται στο έδαφος και των κεραιών λήψης που είναι τοποθετημένες στο αεροσκάφος επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό της κατεύθυνσης της ηλεκτρομαγνητικής πηγής. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες πτήσης κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, οι δονήσεις της συστοιχίας, καθώς και η σύζευξη μεταξύ των κεραιών λήψης της συστοιχίας λόγω των αλληλεπιδράσεων που προκαλεί το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών με τη δομή του αεροσκάφους.

Στην εργασία [26] υπολογίστηκε η διαφορά φάσης των 8 σπειροειδών κεραιών ευρείας ζώνης που εγκαταστάθηκαν κάτω από την πτέρυγα ενός ΣμηΕΑ. Η ζώνη συχνοτήτων που διερευνήθηκε είναι [2-6 GHz] και υπολογίστηκε το σφάλμα φάσης  $\epsilon$  μεταξύ της διαφορικής φάσης δύο κεραιών που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$  στον ελεύθερο χώρο και την ίδια διαφορά φάσης  $d\Phi_{\text{structure}}$  λαμβάνοντας υπόψη την αντανάκλαση και τις επιπτώσεις περίθλασης λόγω της δομής του ΣμηΕΑ.

Η βελτιστοποιημένη συστοιχία που περιγράφεται σε αυτήν την εργασία αποτελείται από 8 σπειροειδείς κεραίες ευρείας ζώνης. Η διάμετρος των οπών των σπειροειδών κεραιών είναι 51,4 mm. Το συνολικό μήκος της βελτιστοποιημένης γραμμικής συστοιχίας είναι 6 μέτρα και η απόσταση  $d$  μεταξύ καθεμιάς από αυτές τις κεραίες φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.





Array	Ant 1	Ant 2	Ant 3	Ant 4	Ant 5	Ant 6	Ant 7	Ant 8
d(m)	0,0000	0,3445	0,9185	1,2920	4,6510	4,8805	5,7420	6,0000

Πίνακας 1. Απόσταση Κεραιών [26]

Η πρώτη κεραία (Ant 1) είναι εγκατεστημένη στο πίσω μέρος του rod. Η ζώνη συχνοτήτων που διερευνήθηκε είναι [2-6 GHz] για την οποία ο συντελεστής ανάκλασης της σπειροειδούς κεραίας είναι χαμηλότερος από -10 dB. Το μέγιστο αξονικό κέρδος κυμαίνεται από 1dB έως 2,5 dB.

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της εργασίας ήταν να ελέγξει την ανθεκτικότητα της μεθόδου εύρεσης κατεύθυνσης σε σφάλματα φάσης που προκαλούνται από τη σύζευξη των κεραιών με τη δομή του ΣμηΕΑ. Διαπιστώθηκε ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη θέση των κεραιών. Πράγματι, έχει αποδειχθεί ότι οι κεραίες που βρίσκονται κοντά στην άκρη της πτέρυγας θα μπορούσαν να προκαλέσουν σφάλματα φάσης έως 90 μοίρες που είναι ακατάλληλα για εύρεση κατεύθυνσης.



#### 4.2. Αναχαίτιση Drones με άλλα Drones μέσω των RF εκπομπών τους

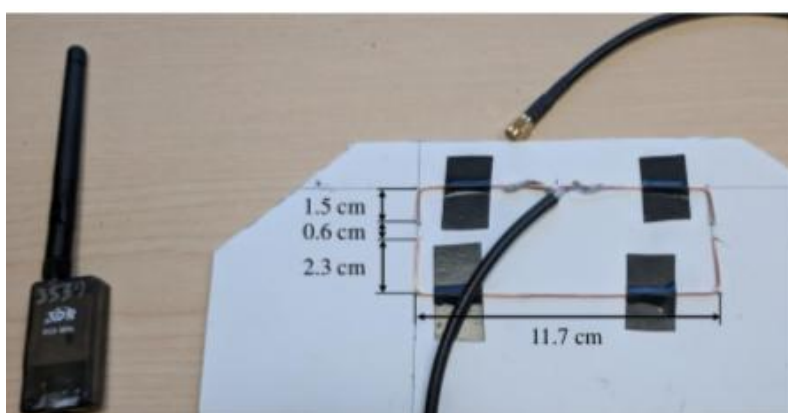
Καθώς τα ΣμηΕΑ έχουν εισχωρήσει στους περισσότερους στρατιωτικούς τομείς συνεισφέροντας στην επιτήρηση και όχι μόνο δημιουργείται η ανάγκη ανάπτυξης μέσων για την διασφάλιση των περιοχών υψίστης σημασίας από αυτά. Διαβαθμισμένες εγκαταστάσεις και περιοχές αποτελούν στόχο των εχθρικών ΜΕΑ για αυτό η ανάγκη ανάπτυξης εφαρμογών ΜΕΑ για την αναχαίτιση αυτών είναι προφανής.

Στο άρθρο των Louis Dressel et al [27] παρουσιάζεται ένα σύστημα ανίχνευσης που μπορεί να εντοπίσει ένα άλλο drone μέσω των εκπομπών ραδιοηλεκτρομαγνητικής του.

Όταν είναι εξοπλισμένο με κεραίες και ραδιοφωνικούς δέκτες, ένα drone μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση ενός άλλου drone από τις εκπομπές τηλεμετρίας του. Όταν ένας ανιχνευτής drone είναι κινητός, μπορεί να παρακολουθεί μη εξουσιοδοτημένα drone σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τους σταθερούς ανιχνευτές. Η κινητικότητα και το χαμηλό κόστος των αεροσκαφών έχουν καταστήσει ένα ραδιοεντοπισμό που βασίζεται σε drone ως ένα πολύ ενεργό ερευνητικό θέμα. Στο άρθρο των Louis Dressel et al [27], χρησιμοποιείται ένα drone αναζήτησης για να εντοπιστεί ένα drone στόχος από τις RF εκπομπές τηλεμετρίας του. Το drone-ανιχνευτής φέρει δύο κεραίες. Συγκρίνοντας διαδοχικά την ισχύ του σήματος που ανιχνεύεται στις κεραίες, το drone αναζήτησης μπορεί να επιτύχει μια καλή εκτίμηση της θέσης του drone στόχου. Το drone ανιχνευτής καθορίζει την πορεία του κατά την κίνηση του σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να κάνει σωστές μετρήσεις αποφεύγοντας συγκρούσεις με το drone στόχο. Ο σχεδιασμός της πορείας του drone ανιχνευτή γίνεται με την χρήση της μεθοδολογίας αναζήτησης δέντρων του Μόντε Κάρλο [27]. Αυτή η μέθοδος είναι καλύτερη σε σχέση με μία οπτική μέθοδο (vision-based) η οποία δεν μπορεί να ξεχωρίσει διάφορα ιπτάμενα αντικείμενα (π.χ πουλιά, δέντρα κλπ).

Στο πείραμα των Louis Dressel et al η ισχύς του σήματος μετράται ταυτόχρονα από δύο κεραίες που είναι τοποθετημένες σε αντίθετες πλευρές του

drone ανιχνευτή. Η μία κεραία δείχνει κατά μήκος του μπροστινού μέρους του drone και η άλλη προς τα πίσω. Αυτές οι κεραίες είναι κατευθυντικές και λαμβάνουν την υψηλότερη ισχύ του σήματος όταν είναι στραμμένες και ευθυγραμμισμένες με την πηγή που εκπέμπει τα ραδιοκύματα. Εάν η μπροστινή κεραία μετρήσει υψηλότερη ισχύ σήματος, η πηγή του σήματος πιθανότατα βρίσκεται μπροστά από τον ανιχνευτή αντίθετα αν η κεραία που βλέπει προς τα πίσω μετρήσει μεγαλύτερη ισχύ, η πηγή πιθανότατα βρίσκεται πίσω από το drone. Κάθε κεραία συνδέεται με ένα ομοαξονικό καλώδιο σε ένα HackRF. (Software-Defined Radio). Το HackRF έχει δύο κρίσιμα πλεονεκτήματα που δικαιολογούν το αυξημένο βάρος και το κόστος του: το εύρος ζώνης του είναι 20MHz αντί για 2,4MHz όπως σε άλλα παρόμοια συστήματα και η συχνότητα λειτουργίας του είναι 6GHz αντί για 1,7GHz αυξάνοντας έτσι την διακριτική του ικανότητα. Το μεγάλο εύρος ζώνης σημαίνει ότι το HackRF μπορεί να παρατηρήσει το μεγαλύτερο μέρος συχνοτήτων του RF φάσματος τηλεμετρίας 902–928MHz.



Εικόνα 4.2. Κεραία drone-στόχου (αριστερά). Μια από τις δύο κεραίες του drone-ανιχνευτή υπό κατασκευή (δεξιά).[27]

Σχετικά με την εύρεση της πορείας που θα ακολουθήσει ο ανιχνευτής χρησιμοποιούνται στοχαστικά μοντέλα όπως τεχνικές particle filtering (Louis Dressel,2019). Η κατανομή των πιθανών θέσεων των στόχων ονομάζεται «πεποίθηση» (*belief*). Ένα Particle Filter χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της «πεποίθησης» και την παρακολούθηση της θέσης του στόχου drone, Ο αλγόριθμος



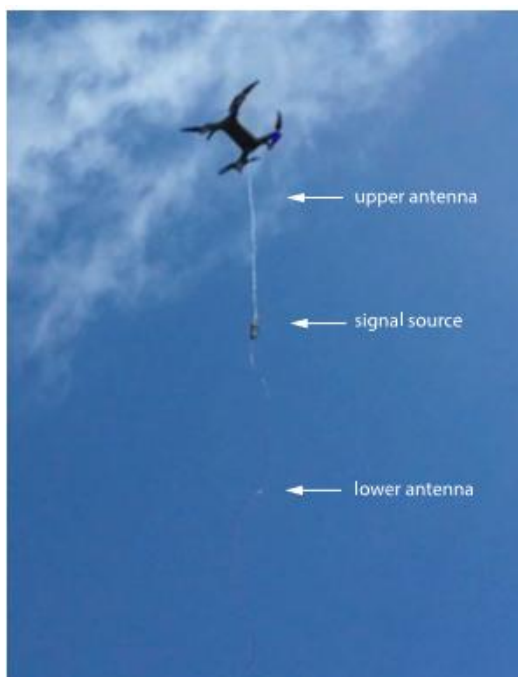
σχεδιασμού του στοχαστικού μοντέλου που χρησιμοποιείται ονομάζεται Markov Decision Process (MDP).

Αυτή η προσέγγιση που αναφέρεται στο παραπάνω άρθρο για τον εντοπισμό και την αναχαίτιση μη εξουσιοδοτημένων ΜΕΑ σε διαβαθμισμένες περιοχές θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε σμήνος ΜΕΑ τα οποία θα μπορούν να επικοινωνούν με τους τρόπους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο έτσι ώστε να σφραγίζονται μεγάλες περιοχές χωρίς να διατρέχουν κίνδυνο τόσο παρακολούθησης όσο και οποιασδήποτε άλλης επιθετικής ενέργειας μπορεί να υλοποιηθεί από εχθρικά ΜΕΑ (παρεμβολές, βομβιστικές ενέργειες κλπ).



#### 4.3. Μέτρηση διαγράμματος Ραντάρ από ΣμηΕΑ

Η εργασία των Washburn et al [28] περιγράφει την χρησιμοποίηση ΣμηΕΑ για την μέτρηση του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας (Antenna Patterns Measurement-APM) ενός ωκεανογραφικού Radar. Περιγράφεται μια νέα μέθοδος που χρησιμοποιεί αεροσκάφη για την προτυποποίηση της κεραίας (APM) ωκεανογραφικών ραντάρ υψηλής συχνότητας (HF) που χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση της επιφάνειας του ωκεανού, κατά την οποία απαιτείται η ακριβής γνώση των APMs των χρησιμοποιούμενων κεραιών ώστε να επιτευχθούν ακριβείς μετρήσεις της επιφανείας. Με την μέτρηση των APM παρέχεται κατευθυντική βαθμονόμηση των κεραιών λήψης των ραντάρ ώστε να επιτυγχάνεται ή σωστή εύρεσης κατεύθυνσης χωρίς σφάλματα. Συνήθως, τα APM μετρώνται χρησιμοποιώντας μικρά ερευνητικά σκάφη που μεταφέρουν πηγές ραδιοσήματος ή αναμεταδότες σε κυκλικά τόξα γύρω από την θέση ενός ραντάρ. Αυτή η διαδικασία είναι δαπανηρή, διότι απαιτεί τεχνικούς θαλάσσης, ένα σκάφος και άλλο εξοπλισμό απαραίτητο για την υποστήριξη των εργασιών με μικρά σκάφη. Επιπλέον, οι δυσμενείς συνθήκες της θάλασσας και τα εμπόδια που βρίσκονται στο νερό επηρεάζουν την ανθεκτικότητα και την ακρίβεια των συστημάτων μέτρησης που διαθέτουν τα μικρά σκάφη ώστε να μετρούν τα APMs. Σε αντίθεση, φαίνεται ότι τα drone μπορούν να διεξάγουν με επιτυχία μετρήσεις των APM με πολύ χαμηλότερο κόστος και σε ένα ευρύτερο φάσμα καταστάσεων της θάλασσας με συγκρίσιμη ακρίβεια. Τα APM που προκύπτουν από τις μετρήσεις Drone μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μακρύτερα μέσα στην ακτή, καθώς δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες της θάλασσας και συνεπώς μπορούν να διενεργηθούν μετρήσεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτή η απλοποιημένη διαδικασία για τη λήψη APM μπορεί να οδηγήσει σε συχνότερες βαθμονομήσεις και βελτιωμένες μετρήσεις επιφανείας.



Εικόνα 4.3. Τετρακόπτρο σε πτήση κατά την διάρκεια APM.[28]

Αυτή η εφαρμογή των drone θα μπορούσε να βελτιστοποιήσει τα στρατιωτικά ραντάρ επιτρέποντας τους την αύξηση της ακρίβειας τους και της απόστασης που δύνανται να καλύψουν. Με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί πιο έγκαιρη προειδοποίηση για τα τμήματα εκείνα που πρέπει να αντιδράσουν άμεσα (π.χ. σε αντιαεροπορικά συστήματα, πυροβολικό κλπ ).

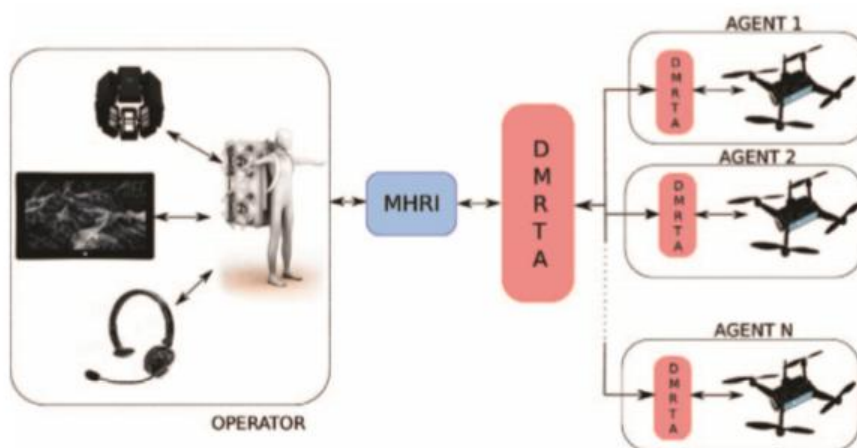
Ακόμα μια πιθανή διεύρυνση αυτής της μελέτης θα ήταν η χρησιμοποίηση αυτών των drone για εντοπισμό εχθρικών ραντάρ ,μέτρηση του διαγράμματος ακτινοβολίας των κεραιών τους και εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για μετακίνηση φίλιων δυνάμεων είτε χωρίς να γίνουν αντιληπτές (σε περίπτωση που μας το επιτρέπει η κάλυψη του συγκεκριμένου ραντάρ) είτε για μετακίνηση μέχρι του σημείου που ξεκινά η περιοχή επιτήρησης του. Συμπερασματικά στην περίπτωση αυτή τα drone θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να εντοπίσουν τους νεκρούς τομείς του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης του εχθρού, προκειμένου να δρομολογηθούν οι επιθέσεις εναντίον του από τις περιοχές αυτές.

#### 4.4. Αποστολές Έρευνας και Διάσωσης (Search & Rescue – S&R) με Σμήνος MEA

Ένας από τους σημαντικότερους τομείς στους οποίους μπορούν να αξιοποιηθούν τα σμήνη MEA είναι οι αποστολές Έρευνας και Διάσωσης οι οποίες είναι υψίστης σημασίας τόσο κατά την περίοδο στρατιωτικών επιχειρήσεων όσο και στην καθημερινότητα σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών ,ατυχημάτων ,εγκλωβισμών κλπ.

##### 4.4.1. Εφαρμογή Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Σμήνους MEA

Οι J.Cacace et al [29] παρουσιάζουν σε άρθρο τους μία πρωτοποριακή αρχιτεκτονική επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης Ανθρώπου - Drone για την εκπλήρωση τέτοιου είδους αποστολών .Η αρχιτεκτονική ελέγχου που παρουσιάζουν επιτρέπει στον χειριστή να αλληλεπιδρά με φυσικό και αποδοτικό τρόπο με το drone και φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 4.4. Αρχιτεκτονική επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης Ανθρώπου - Drone [29]

Ο χειριστής είναι εξοπλισμένος με ελαφρές φορητές συσκευές για να αλληλεπιδρά με το ρομποτικό σύστημα. Η έξοδος αυτών των συσκευών αποστέλλεται συνεχώς στη μονάδα Multimodal Human Robot-Interaction (MHRI) για τη δημιουργία νέων εντολών. Η μονάδα MHRI ερμηνεύει τις εντολές του χειριστή ενσωματώνοντας τις εισόδους από τα διάφορα κανάλια επικοινωνίας που έχει με τον





χειριστή. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε εντολές που βασίζονται σε ομιλία είτε σε χειρονομίες για να σταματήσουν ένα drone, ενώ οι φωνητικές εντολές σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες χειρονομίες του χειριστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό εντολών πλοήγησης .

Όταν ζητείται μια νέα πράξη, η αντίστοιχη εντολή πρέπει να προωθηθεί στο ρομπότ που έχει σχεδιαστεί για την εκτέλεση της. Εάν ο ανθρώπινος χειριστής δεν προσδιορίσει ρητά την πράξη, η Distributed Multi-Robot Task Allocattion (DMRTA) θα βρει μια άλλη έγκυρη κατανομή εργασιών ώστε να υλοποιήσει αυτή την πράξη. Η ενότητα DMRTA είναι υπεύθυνη για την κατανομή εργασιών σε πολλαπλά ρομπότ . Συγκεκριμένα, εάν δοθεί μια εργασία για εκτέλεση, αυτή η ενότητα θα πρέπει να την αναθέσει στο κατάλληλο ρομπότ της ομάδας με βάση διάφορους περιορισμούς, όπως πόροι και δυνατότητες που απαιτούνται για την εκτέλεση της εργασίας (π.χ. ανάθεση της εργασίας λήψης-εικόνας σε ένα ρομπότ εξοπλισμένο με κάμερα), την κατάσταση του ρομποτικού συστήματος και τους χρονικούς περιορισμούς που καθορίζει ο χειριστής κλπ. Επιπλέον, στο πλαίσιο αυτό, ο ανθρώπινος χειριστής μπορεί να καθορίσει άμεσα το ρομπότ που είναι υπεύθυνο για μια ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ρόλος της μονάδας DMRTA είναι να επικυρώσει τη σκοπιμότητα του αιτήματος του χειριστή.

Όλες οι μονάδες και οι παράγοντες που εμπλέκονται στην αρχιτεκτονική αυτή συνδέονται μέσω WiFi, ενώ η επικοινωνία βασίζεται στο Zyre , ένα λογισμικό που παρέχει αξιόπιστα ομαδικά μηνύματα μέσω τοπικών δικτύων.

#### 4.4.2. Drone με έξυπνες κεραίες για εντοπισμό θυμάτων σε πληγμένες από καταστροφές περιοχές

Σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, βομβαρδισμών, τρομοκρατικών επιθέσεων και άλλων μαζικών καταστροφών σημαντικό ρόλο παίζει ο παράγοντας χρόνος για τον εντοπισμό και την διάσωση των θυμάτων από τα συντρίμια.

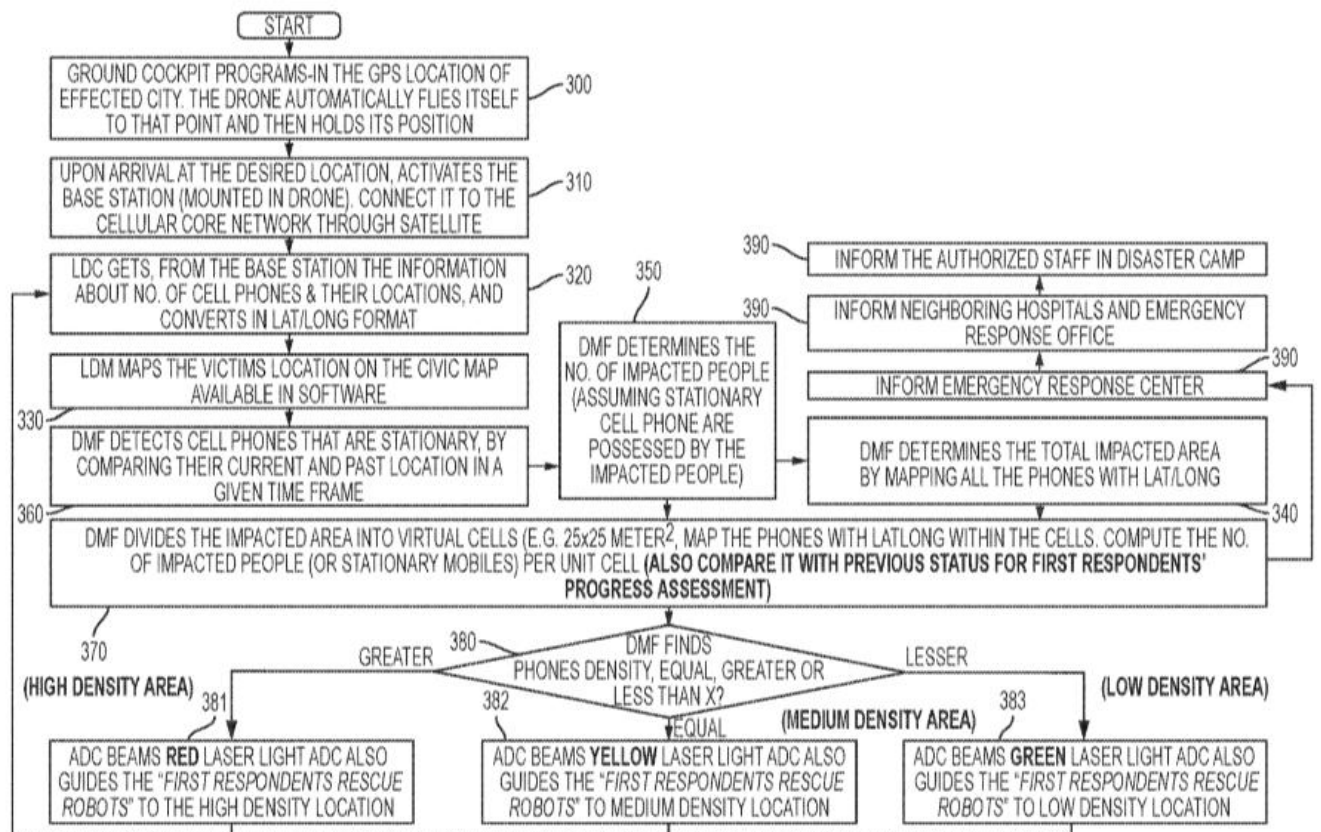
Την λύση αυτού του προβλήματος δίνουν οι Yaqub et al [30] με την εφεύρεση τους που περιλαμβάνει ένα ΣμηΕΑ με «έξυπνη» κεραία. Το σύστημα αυτό εντοπίζει εγκλωβισμένους ανθρώπους σε περιοχές που έχει συμβεί κάποια



καταστροφή μέσω του σήματος του κινητού τους. Περιλαμβάνει ένα ΣμηΕΑ το οποίο ελέγχεται από ένα κέντρο εντολών, είναι εξοπλισμένο με ανασυρόμενο στοιχείο κεραίας, ένα βασικό στοιχείο σύνδεσης δικτύου και έναν εσωτερικό ελεγκτή. Το στοιχείο κεραίας περιλαμβάνει ένα σταθμό βάσης κινητής τηλεφωνίας και χρησιμοποιεί σύστημα «έξυπνης» κεραίας για να υπολογίσει την κατεύθυνση των εισερχόμενων σημάτων. Το στοιχείο σύνδεσης δικτύου χρησιμοποιείται για να υλοποιηθεί ασύρματη ζεύξη επικοινωνίας είτε με δορυφόρο είτε με μικροκυματικές ζεύξεις με πρωτόκολλο internet βασισμένο σε δίκτυο 4G,5G ή οποιασδήποτε μελλοντικής ασύρματης τεχνολογίας. Έτσι όταν το κινητό ενός θύματος προσπαθήσει να επικοινωνήσει με τον σταθμό βάσης για να συνδεθεί στο δίκτυο , θα γίνει φανερή η τοποθεσία του. Όταν γίνει γνωστή η τοποθεσία των κινητών σε μία περιοχή που έχει υποστεί καταστροφές, μπορεί να αποτυπωθεί σε έναν χάρτη και έτσι μέσω της κατανομής των κινητών τηλεφώνων στον χάρτη να βελτιστοποιηθούν οι προσπάθειες διάσωσης τους.

Με αυτήν την εφαρμογή θα μειωθούν δραστικά τα θύματα που καταλήγουν λόγω καθυστέρησης εντοπισμού τους ή λόγω έλλειψης οξυγόνου σε περίπτωση εγκλωβισμού τους καθώς η διαδικασία έρευνας και διάσωσης θα γίνεται σε λιγότερο χρόνο και στοχευμένα.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διαδικασία που ακολουθείται για τον εντοπισμό των ατόμων σε μία κατεστραμμένη περιοχή μέσω του ΣμηΕΑ που φέρει «έξυπνη» κεραία.



Εικόνα 4.5. Διαδικασία έρευνας και εντοπισμού θυμάτων σε μία περιοχή που έχει υποστεί καταστροφή [30]



## Επίλογος

Με την παρούσα εργασία γίνεται φανερός ο καταλυτικό ρόλος που παίζει η τεχνολογία Σμήνους Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών τόσο σε συνδυασμό με τον Ηλεκτρονικό Πόλεμο όσο και σε πολλούς άλλους τομείς της στρατιωτικής επιστήμης καθώς αποτελεί ένας συνεχώς εξελισσόμενο ερευνητικό αντικείμενο. Τα πλεονεκτήματα που επιφέρει είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς όπως αναφέρθηκε μπορεί να μειώσει τις απώλειες σε ανθρώπινο δυναμικό, με τις στρατιωτικές εφαρμογές. Βοηθάει στην έγκαιρη προειδοποίηση που είναι υψίστης σημασίας για την στρατιωτική ετοιμότητα μιας χώρας και σε αποστολές έρευνας και διάσωσης.

Οι εφαρμογές που αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία θα μπορούσαν να αποτελέσουν εφαλτήριο για την ανάπτυξη και άλλων εφαρμογών. Θα ήταν πολύ χρήσιμη η ανάπτυξη αυτόνομων ευφυών συστημάτων drone που θα επιλύουν το πρόβλημα SLAM ή active SLAM για την χαρτογράφηση μίας εχθρικής περιοχής ή την αποτύπωση στον χάρτη όλων των ηλεκτρομαγνητικών πηγών κάνοντας έτσι φανερή την τοποθεσία των εχθρικών κέντρων διοίκησης και ελέγχου καθώς και άλλων επιμέρους μονάδων ενδιαφέροντος (π.χ. παρεμβολέων). Η επικοινωνία μεταξύ των drone θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω του ήχου ή με οπτικά σήματα ώστε να μην γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη τους από τον εχθρό. Με τον ίδιο τρόπο θα μπορούσε να χαρτογραφηθεί η τοποθεσία ραντάρ ή οπλικών συστημάτων που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Τέλος πολύ χρήσιμη θα ήταν η ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας στα σμήνη drone ώστε να μειωθεί σημαντικά το μέγεθός τους και να μπορούν να βάλλουν στόχους αυτόνομα χρησιμοποιώντας διάφορους αλγορίθμους (π.χ. Pattern Recognition) χωρίς να γίνονται αντιληπτά.



## Βιβλιογραφία

(1) Joint Publication 3-13.1, “Joint Doctrine for Electronic Warfare.” US Joint Chiefs of staff Washington, DC: Joint Staff, (08 February 2012). Retrieved from: [https://www.usna.edu/Training/\\_files/documents/References/2C%20MQS%20References/Joint%20Publication%203-13-1%20Electronic%20Warfare.pdf](https://www.usna.edu/Training/_files/documents/References/2C%20MQS%20References/Joint%20Publication%203-13-1%20Electronic%20Warfare.pdf)

(2) Mustafa Gokhan Erdemli, (September 2009) “GENERAL USE OF UAS IN EW ENVIRONMENT—EW CONCEPTS AND TACTICS FOR SINGLE OR MULTIPLE UAS OVER THE NET-CENTRIC BATTLEFIELD” Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5000.

(5) Jeffrey M. Maddalon, Kelly J. Hayhurst, Daniel M. Koppen, Jason M. Upchurch, and A. Terry Morris (01-02-2013) “Perspectives on Unmanned Aircraft Classification for Civil Airworthiness Standards”, NASA Langley Research Center, Hampton VA 13681-2199.

(6) Reg Austin, (2010) “UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS UAVS DESIGN, DEVELOPMENT AND DEPLOYMENT” John Wiley & Sons, Ltd Publication ISBN 9780470058190 (H/B)

(13) Robert A. Scott, MSc Thesis (2014) “AN ELECTRICALLY SMALL MULTI-PORT LOOP ANTENNA FOR DIRECTION OF ARRIVAL ESTIMATION”, Urbana, Illinois, sponsored by the U.S. Army Research Office through grant number W911NF-10-1-0274.

(14) Samuel Whiting (5-2018) “Radio-Frequency Transmitter Geolocation Using Non-Ideal Received Signal Strength Indicators” Utah State University, All Graduate Theses and Dissertations. 7038.

(15) Michael A. Magers (24-3-2016) “GEOLOCATION OF RF EMITTERS USING A LOW-COST UAV-BASED APPROACH”, AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Theses and Dissertations. 438. <https://scholar.afit.edu/etd/438>



(16) T. S. Rappaport, J. H. Reed, and B. D. Woerner, Virginia Polytechnic Institute and State University (October 1996) “Position Location Using Wireless Communications on Highways of the Future”, IEEE Communication Magazine 0163-6804/96/ 05.00

(17) Alex Mikhalev and Richard Ormondroyd (2007) “Passive Emitter Geolocation using Agent-based Data Fusion of AOA, TDOA and FDOA Measurements” 2007 10th International Conference on Information Fusion, IEEE, Quebec, QC, Canada, **CD:978-0-662-45804-3**

(18) Franks, Raymond E.(1988) “Direction Finding Antennas” In: Lo, Y.T., Lee, S.W. (eds) Antenna Handbook. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6459-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6459-1_25)

(19) Alon Amar, Geert Leus, Benjamin Friedlander (2010) “Emitter Position and Velocity Estimation Given Time and Frequency Differences of Arrival”, IEEE, Conference: Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), 2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on, DOI: 10.1109/ACSSC.2010.5757629

(20) Seyed A. (Reza) Zekavat and R. Michael Buehrer (2012) “HANDBOOK OF POSITION LOCATION Theory, Practice, and Advances” IEEE Press , Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.; 2012, MMS ID 991045051202101

(21) Γ.Αλεξίου «Ασύρματα Ηλεκτρονικά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα» Κεφ 9 «Κεραίες»,

<https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/notes/kef09.pdf>

(22) Mitch Champion, Prakash Ranganathan, and Saleh Faruque (May 2018) “A Review and Future Directions of UAV Swarm Communication Architectures” Conference: 2018, IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), DOI:10.1109/EIT.2018.8500274





(23) Qiannan Cui, Peizhi Liu, Jinhua Wang, Jing Yu (2017) “Brief Analysis of Drone Swarms Communication” 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), Beijing, China, DOI: 10.1109/ICUS.2017.8278390

(24) Ch. Chlestil, E. Leitgeb, N. P. Schmitt, S. Sheikh Muhammad, K. Zettl, W. Rehm (2006) “Reliable Optical Wireless Links within UAV Swarms”, IEEE 2006 International Conference on Transparent Optical Networks, Nottingham, UK DOI: 10.1109/ICTON.2006.248491

(25) Meysam Basiri, Felix Schill, Pedro Lima, and Dario Floreano, (July 2016) “On-Board Relative Bearing Estimation for Teams of Drones Using Sound” IEEE Robotics and Automation Letters ( Volume: 1, Issue: 2, July 2016), p. 820-827 DOI: 10.1109/LRA.2016.2527833

(26) Andre Barka, Thierry Deloues, D. Medinsky, (2009) “Complex Gain Computation of Direction Finding C band Array Antennas mounted in Motor Gliders Pods”, 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, North Charleston, SC, USA, DOI: 10.1109/APS.2009.5171478

(27) Louis Dressel and Mykel J. Kochenderfer (2019) “Hunting Drones with Other Drones: Tracking a Moving Radio Target”, 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794243

(28) Libe Washburn, Eduardo Romero, Cyril Johnson, Brian Emery, Chris Gotschalk (May 2017) “Measurement of Antenna Patterns for Oceanographic Radars Using Aerial Drones”, Journal Of atmospheric and Oceanic Technology Vol 34, DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0180.1

(29) J. Cacace, A. Finzi, V. Lippiello, M. Furci, N. Mimmo and L. Marconi (2016) “A Control Architecture for Multiple Drones Operated via Multimodal Interaction in Search & Rescue Mission” 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), Lausanne, Switzerland, DOI: 10.1109/SSRR.2016.7784304





(30) Yaqub et al, United States Patent, Patent No. US 10,527,709 B2, Date of Patent Jan 7,2020 “System and method of detecting individuals in a target geographic location with a disastrous site using smart antenna Borne drone”

(31)MAJ Andrew William Sanders, MSc Thesis (12-4-2017) “Drone Swarms”, US Army School of Advanced Military Studies United States Army Command and General Staff College Fort Leavenworth, Kansas

(32)Yongkun Zhou, Bin Rao and Wei Wang, (2020) “UAV Swarm Intelligence: Recent Advances and Future Trends” IEEE, volume 8,2020, p.183856-183878

(33) A. Li, Q. Wu, and R. Zhang,(February 2019). “UAV-enabled cooperative jamming for improving secrecy of ground wiretap channel,” IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 8, no. 1, pp. 181–184

(34)C.Zhong, J.Yao and J.Xu, (February 2019) “Secure UAV communication with cooperative jamming and trajectory control,” IEEE Commun. Lett., vol.23, no.2, pp. 286–289

(35)H.A. Cook et al (2020) , “Radio direction finding techniques for an Unmanned Aerial Vehicle”, p.1-10. Department of Engineering-Electrical ,Cape Peninsular University of Technology, South Africa.

(36) R. R. Selmic, M. Gates, C. Barber, A. Mitra, and R. Ordonez (2011) “Position-Adaptive Direction Finding of Electromagnetic Sources Using Wireless Sensor Networks”,p.1176-1181, 19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis Corfu Holiday Palace, Corfu, Greece June 20-23, 2011.



## Άλλες Πηγές

(3) Παρουσιάσεις μαθήματος «Ηλεκτρονικών» 8<sup>ου</sup> Εξαμήνου Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων (2017-2018)

(4) <https://www.blighter.com/anti-uav-defence-system-auds-unveiled-by-trio-of-british-technology-companies/>

(7) <https://www.airforce-technology.com/projects/euro-hawk-unmanned-aerial-system-uas/>

(8) <http://www.army-technology.com/projects/brevel/>

(9) <https://www.airforce-technology.com/projects/hermes-multirole-high-performance-tactical-uas/>

(10) <https://www.airforce-technology.com/projects/heron-uav/>

(11) <https://www.airforce-technology.com/projects/predator-uav/>

(12) <https://www.defence-point.gr/news/pigasos-ii-i-periodos-tis-orimotitas-i-istoria-toy-quot-fterotoy-alogoy-quot-tis-pa>