



**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ  
ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»**

---

***ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»***

**ΤΙΤΛΟΣ**

**Ανθεκτικά Δίκτυα Επικοινωνιών μη Επανδρωμένων Εναέριων  
Συστημάτων σε Επιχειρησιακό Περιβάλλον Άμυνας ή Ασφάλειας**

---

**ΤΙΤΛΟΣ ΑΓΓΛΙΚΑ**

**Robust Communication Networks of UAS in a Tactical Defense and/or Security  
Domain**

---

**Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή:**

**Βασίλειος Λινάρδος (ΑΜ: 8096609)**

---

**Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:**

**Ιωάννης Κούκος**

---

**ΠΕΙΡΑΙΑΣ**

**ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023**

---



## **Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής**

**Κούκος Ιωάννης**

---

**Παπουσιδάκης Μιχαήλ**

---

**Χατζόπουλος Αβραάμ**

---



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βασίλειος Λινάρδος, του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 8096609 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα και Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Διπλωματικής εργασίας μου, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



Βασίλειος Λινάρδος

Ημερομηνία

22 Σεπτεμβρίου 2023



**Ανθεκτικά Δίκτυα Επικοινωνιών μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων σε  
Επιχειρησιακό Περιβάλλον Άμυνας ή Ασφάλειας**

**Λινάρδος Βασίλειος**

**Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική  
εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του  
Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα και  
Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής  
Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.**





## Περίληψη

Ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών πλήρως κατανεμημένης τοπολογίας αποτελείται από πολλαπλά μη επανδρωμένα αεροχήματα συνδεδεμένα με ad-hoc τρόπο, ενσωματωμένα σε μια ομάδα για την επίτευξη στόχων υψηλού επιπέδου. Σε αυτή την εργασία, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της «Διπλωματικής Εργασίας» του 3ου εξαμήνου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα και Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, περιγράφονται οι κύριες παράμετροι (εύρος ζώνης, ρυθμός δεδομένων, διεκπεραίωση, αριθμός κόμβων, ισχύς μετάδοσης, κάλυψη, κατανάλωση ενέργειας, ασφάλεια δικτύου), συζητείται η υλοποίηση και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών πεδίου σε ένα πυκνό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός ανθεκτικού δικτύου επικοινωνιών μη επανδρωμένων συστημάτων. Ο βασικός σκοπός είναι η επίδειξη ενός κινητού αδόμητου δικτύου επικοινωνίας (MANET) που αποτελείται από μη επανδρωμένα αεροχήματα, ικανά να διατηρήσουν επαρκή ροή πληροφοριών σε ένα εχθρικό – βεβαρυμμένο λόγω ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών περιβάλλον. Οι κόμβοι του δικτύου αυτού έχουν τη δυνατότητα διαχείρισης της κατανάλωσης ενέργειας τους προκειμένου να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος λειτουργίας του δικτύου και ο χρόνος πτήσης των μη επανδρωμένων συστημάτων που το υλοποιούν.

Από τη μελέτη προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του δικτύου ανάλογα με τον αριθμό των συνδεδεμένων σε αυτό κόμβων και την απόσταση των κόμβων από το σταθμό εδάφους. Επιπλέον αποδεικνύεται η ανθεκτικότητα του δικτύου κατά την λειτουργία του σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και την αλληλεπίδρασή του με άλλα δίκτυα επικοινωνιών που λειτουργούν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων. Επίσης αναλύθηκε η αλληλεπίδραση των εκπομπών του δικτύου κατά των διαύλων ναυτιλίας GNSS.

Λέξεις Κλειδιά: Ασφάλεια, Άμυνα, Ασύρματα Δίκτυα Τοπολογίας Πλέγματος, Δίκτυα Ad - hoc, μηΕΑ

## **Abstract**

A wireless mesh communication network consists of multiple UAVs connected in an ad-hoc manner, integrated into a group to achieve high level goals. This thesis was prepared as part of the postgraduate program of studies named "Unmanned Autonomous and Remote Controlled Systems", held by the Department of Industrial Design and Production Engineering of the University of West Attica. In this thesis, the main parameters (bandwidth, data rate, throughput, number of nodes, transmit power, coverage, power consumption, network security) of a resilient, unmanned aerial system (UAS) oriented communications network, are outlined. Implementation of a UAS communication network is discussed and results on field testing in a dense electromagnetic environment are presented. The main scope is the demonstration of an ad-hoc communication network consisting of UAVs, capable of sustaining adequate flow of information in a hostile – congested electromagnetic environment. Networked nodes may also support power consumption management in order to maximize the operational time of the network and the endurance of the UAS.

The study draws conclusions on the behavior of the network depending on the number and the distance from the ground station of the networked nodes. Additionally, the resilience of the network during its operation and interaction with other communication networks operating in the same frequency range are taken under consideration. Interference against GNSS shipping channels is also analyzed.

**Keywords:** Security, Defense, Wireless Mesh Networks, Ad - hoc Networks, UAV

## **Ευχαριστίες**

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Κούκο, για τη συνεχή καθοδήγησή του και την ανιδιοτελή υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής. Η προθυμία με την οποία προσέφερε απλόχερα τη βοήθειά του καθ' όλο αυτό το διάστημα, καθώς και οι γνώσεις που αποκόμισα ήταν καταλυτικοί παράγοντες.

Ομοίως, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο κ. Μιχάλη Ποθητό, καθώς αυτός με έφερε σε επαφή με τα μη επανδρωμένα συστήματα, καθώς και στο προσωπικό της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων, του Ναυτικού και των ιδιωτικών εταιριών για την προσφορά του εξοπλισμού και την σημαντικότερη συνεισφορά τους στην εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών του συστήματος.

Το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω όμως στην οικογένειά μου η οποία αυτά τα τελευταία δύο χρόνια με στήριξε πέραν του δέοντος και που χωρίς τη δική τους στήριξη θα ήταν αδύνατη τόσο η συμμετοχή μου στο πρόγραμμα, όσο και η εκπόνηση αυτής της διατριβής.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	1
Abstract .....	2
Ευχαριστίες .....	3
Περιεχόμενα.....	4
Κατάλογος Πινάκων .....	6
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	7
Κατάλογος Σχημάτων / Εικόνων .....	8
Κατάλογος Συντομογραφιών .....	10
1. Εισαγωγή.....	13
2. Δίκτυα Επικοινωνιών μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων.....	17
2.1 Ασύρματα δίκτυα.....	20
2.1.1 Πλεονεκτήματα ασύρματης δικτύωσης.....	21
2.1.2 Τοπολογίες δικτύων.....	22
2.1.3 Κόμβοι δικτύων .....	24
2.1.4 Είδη ασύρματων δικτύων (MANET, WMN).....	28
2.2 Υλοποίηση δικτύου επικοινωνιών μηΕΑ .....	32
2.2.1 Διαχείριση των παραμέτρων/πόρων του δικτύου.....	32
2.2.1.1 Μεγέθη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	33
2.2.1.2 Μοντέλα διάδοσης.....	34
2.2.1.3 Διαμορφώσεις σημάτων .....	46
2.2.1.4 Μηχανισμοί διόρθωσης σφαλμάτων .....	49
2.2.2 Διαχείριση ενέργειας .....	53
2.2.3 Ευρωστία .....	55
2.2.3.1 Αξιοπιστία .....	56
2.2.3.2 Ασφάλεια.....	59
3. Καθορισμός Αποστολής.....	64
3.1 Λειτουργίες που Εξυπηρετεί το Δίκτυο σε Περιβάλλοντα Άμυνας και Ασφάλειας. ....	65
3.2 Αποστολές: Μελέτη - Σχεδίαση .....	67
3.3 Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Σχεδίαση Αποστολών .....	69

4. Δίκτυο Επικοινωνιών ΣμηΕΑ για Περιβάλλοντα Άμυνας και Δημόσιας Ασφάλειας.....	73
4.1 Προτάσεις Αποστολών .....	73
4.2 Επίπεδο Τεχνολογίας.....	76
4.3 Θεωρητική Μελέτη Τεχνικών Χαρακτηριστικών Δικτύου .....	78
4.3.1 Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας (radar horizon).....	79
4.3.2 Περιοχή συχνοτήτων εκπομπής (frequency band) .....	82
4.3.3 Ισχύς εκπομπής – διαχείριση ενέργειας .....	90
4.3.4 Υπολογισμός ζεύξεων (Link budget) .....	91
4.4 Ευρωστία (Robustness) .....	99
5. Δοκιμές Δικτύου Επικοινωνιών μη Επανδρωμένων Οχημάτων.....	101
5.1 Δοκιμές EMC/EMI.....	103
5.1.1 Μεθοδολογία δοκιμών EMC/EMI .....	104
5.1.2 Αποτελέσματα δοκιμών EMC/EMI .....	110
5.2 Δοκιμές σε σενάρια πραγματικών αποστολών.....	119
5.2.1 Μεθοδολογία δοκιμών σε σενάρια πραγματικών αποστολών ....	119
5.2.1.1 Εκτέλεση σεναρίου επιτήρησης θαλασσίων οδών .....	120
5.2.1.2 Σενάριο υποστήριξης ομάδων επιχειρήσεων σε χερσαίο περιβάλλον .....	124
5.2.2 Αποτελέσματα δοκιμών σε σενάρια πραγματικών αποστολών ..	126
6. Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	131
Βιβλιογραφία .....	137

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Οι Δέκα σημαντικότεροι χρήστες μηΕΑ ('The Top 20 Drone Service Provider Ranking', 2018).....	27
Πίνακας 2: Απώλειες Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών (Capela, 2012). ....	35
Πίνακας 3: Ηλεκτρονικός Ορίζοντας (RadarHorizon). ....	80
Πίνακας 4: Απόσταση ζώνης Fresnel για περιοχή συχνοτήτων UHF (0,3 - 1GHz)..	84
Πίνακας 5: Απόσταση ζώνης Fresnel για περιοχή συχνοτήτων L (1 - 2GHz). ....	84
Πίνακας 6: Απόσταση ζώνης Fresnel για περιοχή συχνοτήτων S (2 - 4GHz). ....	85
Πίνακας 7: Απόσταση ζώνης Fresnel για περιοχή συχνοτήτων C (4 - 8GHz).....	86
Πίνακας 8: Απώλειες ελεύθερου χώρου (Free space losses). ....	87
Πίνακας 9: Υπολογισμός ζεύξεων για $G_a = 3\text{dB}$ και $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	93
Πίνακας 10: Υπολογισμός ζεύξεων για $G_a = 3\text{dB}$ και $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	93
Πίνακας 11: Υπολογισμός ζεύξεων για $G_a = 13\text{dB}$ και $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	94
Πίνακας 12: Υπολογισμός ζεύξεων για $G_a = 13\text{dB}$ και $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	95
Πίνακας 13: Τιμές ακτίνων πρώτης έλλειψης Fresnel για διάφορες αποστάσεις.....	97
Πίνακας 14: Υπολογισμός μέγιστης ακτίνας ελλείψεων Fresnel και του ορίου του 80% για διάφορες αποστάσεις. ....	97
Πίνακας 15: Αποστάσεις μεταξύ του εξοπλισμού κατά τις δοκιμές EMC/EMI. ....	109
Πίνακας 16: Αποστάσεις μεταξύ του εξοπλισμού κατά τις δοκιμές θαλασσίου Ελέγχου. ....	123

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας για ύψη κόμβων από 0 έως 500m.....	81
Διάγραμμα 2: Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας για ύψη κόμβων από 0 έως 5000m...	82
Διάγραμμα 3: Σύγκριση ζώνης Fresnel για συχνότητες UHF, L, SκαιC.....	83
Διάγραμμα 4: Σύγκριση ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα – ζώνης Fresnel για συχνότητες UHF.....	84
Διάγραμμα 5: Σύγκριση ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα – ζώνης Fresnel για συχνότητες L. ....	85
Διάγραμμα 6: Σύγκριση ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα – ζώνης Fresnelγια συχνότητες S. ....	85
Διάγραμμα 7: Σύγκριση ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα – ζώνης Fresnelγια συχνότητες C.....	86
Διάγραμμα 8: Απώλειες ελεύθερου χώρου για τις μελετώμενε συχνότητες. ....	87
Διάγραμμα 9: Απώλειες ελεύθερου χώρου για το σύνολο των συχνοτήτων 300MHz - 8 GHz.....	88
Διάγραμμα 10: Διαφορά ρυθμαπόδοσης δεδομένων ανάλογα το εύρος ζώνης. ....	89
Διάγραμμα 11: Εύρος περιοχής των τεσσάρων μελετώμενων συχνοτήτων.....	89
Διάγραμμα 12: Υπολογισμός ζεύξεων για $G_a = 3\text{dB}$ και $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	92
Διάγραμμα 13: Λόγος C/Nγια $G_a = 3\text{dB}$ και $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	93
Διάγραμμα 14: Υπολογισμός ζεύξεων για $G_a = 3\text{dB}$ και $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	94
Διάγραμμα 15: Λόγος C/Nγια $G_a = 3\text{dB}$ και $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	94
Διάγραμμα 16: Υπολογισμός ζεύξεων για $G_a = 13\text{dB}$ και $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	95
Διάγραμμα 17: Λόγος C/Nγια $G_a = 13\text{dB}$ και $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	95
Διάγραμμα 18: Υπολογισμός ζεύξεων για $G_a = 13\text{dB}$ και $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	96
Διάγραμμα 19: Λόγος C/Nγια $G_a = 13\text{dB}$ και $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ . ....	96
Διάγραμμα 20: Τιμές ακτίνων πρώτης έλλειψηςFresnel για διάφορες αποστάσεις. .	97
Διάγραμμα 21: Τιμές μέγιστης ακτίνας ελλείψεων Fresnel και του ορίου του 80% για διάφορες αποστάσεις. ....	98

## Κατάλογος Σχημάτων / Εικόνων

Εικόνα 1: Σύστημα επικοινωνιών με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Kaleem, Ahmad and Duong, 2022).....	14
Εικόνα 2: Εφαρμογές δικτύων δημόσιας ασφάλειας (PSN) (Shahzadi, Ali and Naeem, 2022).....	17
Εικόνα 3: Tactical MANET (Lee <i>et al.</i> , 2020). ....	19
Εικόνα 4: Τοπολογίες Δικτύων (Pothitos, 2015).....	24
Εικόνα 5: Τοπολογία – Δρομολόγηση Mesh Δικτύου (Jerome, 2011). ....	31
Εικόνα 6: Συχνότητες και μήκη κύματος ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.....	33
Εικόνα 7: Ηλεκτρομαγνητικός Ορίζοντας (Adamy, 2009). ....	36
Εικόνα 8: Γράφημα υπολογισμού Ηλεκτρομαγνητικού Ορίζοντα (Adamy, 2009)...	36
Εικόνα 9: Γράφημα υπολογισμού Ηλεκτρομαγνητικού Ορίζοντα με εμπόδιο (Adamy, 2009). ....	37
Εικόνα 10: Μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου (Adamy, 2009).....	38
Εικόνα 11: Φαινόμενο απωλειών διάδοσης δύο ακτίνων (Adamy, 2009). ....	39
Εικόνα 12: Ζώνη Fresnel (Adamy, 2009).....	41
Εικόνα 13: Έλλειψη Fresnel (Dancraggs, 2007). ....	42
Εικόνα 14: Περίθλαση από ευθεία ακμή (γεωμετρικά στοιχεία) (Adamy, 2009)....	42
Εικόνα 15: Περίθλαση από ευθεία ακμή πέραν της ζώνης Fresnel (Adamy, 2009) .	43
Εικόνα 16: Περίθλαση από ευθεία ακμή (περιοχή εμφάνισης του φαινομένου) (Adamy, 2009) .....	44
Εικόνα 17: Διαμόρφωση πλάτους (Πάλλης <i>et al.</i> , Α' εξάμηνο).....	46
Εικόνα 18: Διαμόρφωση συχνότητας (Πάλλης <i>et al.</i> , Α' εξάμηνο).....	47
Εικόνα 19: Ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας (Πάλλης <i>et al.</i> , Α' εξάμηνο).....	47
Εικόνα 20: Ψηφιακή διαμόρφωση φάσης (Πάλλης <i>et al.</i> , Α' εξάμηνο).....	48
Εικόνα 21: Ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους (Πάλλης <i>et al.</i> , Α' εξάμηνο).....	48
Εικόνα 22: Μορφές διαφορισμού χώρου (Πάλλης <i>et al.</i> , Α' εξάμηνο).....	52
Εικόνα 23: Γεωμετρική απεικόνιση EIRP (πράσινη σφαίρα) με το μοτίβο μια συγκεκριμένης κεραίας. ....	54
Εικόνα 24: Τα επίπεδα του μοντέλου OSI όπως ορίστηκαν από τον ISO (Comer, 2015). ....	58
Εικόνα 25: Εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται UAV. (Pasandideh <i>et al.</i> , 2022) ....	64
Εικόνα 26: Χάρτης πυκνότητας κυκλοφορίας ναυτιλίας.(AEGEAN SEA Ship Traffic Live Map   Marine Vessel Traffic, no date) .....	74
Εικόνα 27: Μεταναστευτικές ροές 2015 – 2023 (το μπλε χρώμα και τα νούμερα αφορούν Αιγαίο και ανατολική Μεσόγειο).(Migration flows: Eastern, Central and Western routes, 2023).....	75
Εικόνα 28: Διασώσεις μεταναστών στη θάλασσα 2015 – 2023 (η επιχείρηση Poseidon αφορά Αιγαίο και ανατολική Μεσόγειο).(Lives saved in EU Mediterranean operations (2015-2023), 2023) .....	75
Εικόνα 29: Χάρτης χωρικών υδάτων και αποστάσεων νησιών στο Αιγαίο. ....	76
Εικόνα 30: Σχεδιάγραμμα πτήσης κατά τις δοκιμές EMC/EMI.....	106
Εικόνα 31: Τοπολογία ασύρματου δικτύου ΣμηΕΑ και υποστηρικτικών δικτύων (δοκιμή EMC/EMI).....	107
Εικόνα 32: Διάταξη εξοπλισμού δοκιμών EMC/EMI. ....	108
Εικόνα 33: Στιγμιότυπα φάσματος στην περιοχή συχνοτήτων S με την επιλογή «Normal». ....	110



Εικόνα 34: Απεικονίσεις φάσματος στην περιοχή συχνοτήτων S.....	111
Εικόνα 35.: Φάσμα στην περιοχή συχνοτήτων S με την επιλογή «Average» σε υψηλό ρυθμό δεδομένων. ....	111
Εικόνα 36. Στιγμιότυπο λογισμικού Winbox. Εμφανείς οι απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης και οι χρόνοι υστέρησης. ....	113
Εικόνα 37: Στιγμιότυπο λογισμικού Winbox. Εμφανείς οι απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης και οι χρόνοι υστέρησης. ....	114
Εικόνα 38: Απεικονίσεις εκπομπής στην περιοχή συχνοτήτων UHF .....	115
Εικόνα 39: Απεικονίσεις κεντρικής ζώνης εκπομπής στην περιοχή συχνοτήτων UHF.....	115
Εικόνα 40: Μετρήσεις βασικών καναλιών ελέγχου (roll, pitch,yaw) ανα ενεργοποίηση συστήματος σε εύρος PWM 982-2006 micro second καταγραφικού (log).....	116
Εικόνα 41: Μετρήσεις εμφανών δορυφόρων καταγραφικού (log).....	117
Εικόνα 42: Τυπική απόκλιση οριζόντιου και κάθετου σφάλματος αισθητήρα GPS ΣμηΕΑ (cm).....	117
Εικόνα 43: Μετρήσεις Μαγνητικού πεδίου και Διεύθυνσης καταγραφικού (log). .	118
Εικόνα 44: Τοπολογία ασύρματου δικτύου ΣμηΕΑ και υποστηρικτικών δικτύων (δοκιμή θαλασσίου ελέγχου). ....	121
Εικόνα 45: Διάταξη εξοπλισμού δοκιμών θαλασσίου ελέγχου. ....	122
Εικόνα 46: Τοπολογία ασύρματου δικτύου ΣμηΕΑ και υποστηρικτικών δικτύων (δοκιμή υποστήριξης ομάδων επιχειρήσεων). ....	125
Εικόνα 47: Θαλάσσιοι στόχοι σε διάφορες αποστάσεις πτήσεων. ....	127
Εικόνα 48: Δεδομένα θέσεως αεροχήματος μέσω συστήματος δορυφορικής ναυτιλίας. ....	127
Εικόνα 49: Εικόνα των χαρακτηριστικών του δικτύου από το interface των κόμβων (δοκιμή σεναρίων επιτήρησης θαλασσίων οδών). ....	128
Εικόνα 50: Θέσεις ομάδων χειρσίων επιχειρήσεων (επαναλήπτης αρχηγού ομάδας). ....	128
Εικόνα 51: Ταυτόχρονη ρυθμαπόδοση βίντεο από τους αρχηγούς των ομάδων και τον οπτικό αισθητήρα του αεροχήματος. ....	129

## Κατάλογος Συντομογραφιών

ABS	Aerial Base Stations - Εναέριοι Σταθμοί Βάσης
ACM	Adaptive Coding and Modulation – Προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση
AES	Advanced Encryption Standard
AI	Artificial Intelligence - Τεχνητή νοημοσύνη
AM	Amplitude Modulation – Διαμόρφωση πλάτους
ANSI	American National Standards Institute – Αμερικανικό Εθνικό Ίδρυμα Προτυποποίησης
ASK	Amplitude Shift Keying – Ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους
BS	Base Stations - Σταθμοί Βάσης
C2	Command and Control - Εντολή και Έλεγχος
C3	Command, Control and Communication – Εντολή, Έλεγχος και Επικοινωνίες
C3I	Command, Control, Communication, Intelligence - Εντολή, Έλεγχος, Επικοινωνίες και Πληροφορία
C3ISR	Command, Control, Communication, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance - Εντολή, Έλεγχος, Επικοινωνίες, Ευφυΐα, Επιτήρηση και Αναγνώριση
C4	Command, Control, Communication and Computers - Εντολή, Έλεγχος, Επικοινωνίες και Υπολογιστές
C4ISTAR	Command, Control, Communications, Computers, Information/Intelligence, Surveillance, Targeting Acquisition and Reconnaissance - Εντολή, Έλεγχος, Επικοινωνίες, Υπολογιστές, Ευφυΐα, Επιτήρηση, Απόκτηση Στόχων και Αναγνώριση
CDMA	Code division Multiple Access – Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας
CNSA	Cybersecurity National Security Agency (suite)
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Κωδικοποιημένη ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - Μέθοδο Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση Φέροντος και Αποφυγή Συγκρούσεων
dB	Decibel
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DNS	Domain Name System – Συστήματος ονοματοδοσίας διαδικτύου
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum – Διασπορά φάσματος άμεσης ακολουθίας
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power - Ισοδύναμη Ισότητα Ακτινοβολούμενης Ισχύος
eLAA	Enhanced Licensed Assisted Access Network - Δίκτυο Υποβοηθούμενης Πρόσβασης με Βελτιωμένη Άδεια Χρήσης

EMI	Electromagnetic Interference – Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
EU	European Union - ΕΕ
FEC	Forward Error Correction – Εμπρόσθια διόρθωση λαθών
FHSS	Frequency Hoping Spread Spectrum – Διασπορά φάσματος με αναπήδηση συχνότητας
FM	Frequency Modulation – Διαμόρφωση συχνότητας
FSK	Frequency Shift Keying – Ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας
GEO	Geostationary Earth Orbit - Γεωσύγχρονης ή γεωστατικής τροχιάς
GNSS	Global Navigation Satellite System – Σύστημα παγκόσμιας δορυφορικής ναυτιλίας
GPS	Global Positioning System - Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης, ή Θεσιθεσία
HEO	High Earth Orbit - Άκρως ελλειπτικής γήινης τροχιάς
HF	High Frequency
HMAC	Hash-based message authentication code
IDW	Inverse Distance Weighting - Αντίστροφης Βαρύνουσας Απόστασης
IEC	International Electrotechnical Commission - Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
IGW	Internet Gateways - Κόμβοι διαδικτύου
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Internal Navigation System – Εσωτερικό σύστημα ναυτιλίας (μαγνητικές πυξίδες)
IoT	Internet of Things - Διαδίκτυο των Πραγμάτων
IP	Internet Protocol – Πρωτόκολλο Διαδικτύου
ISO	International Standard Organization – Παγκόσμιος οργανισμός πιστοποίησης
ISR	Intelligent, Surveillance, Recognize
ITU-T	International Telecommunication Union – Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
LEO	Low Earth Orbit - Χαμηλής γήινης τροχιάς
LoS	Line of Sight – Οπτική Επαφή
MANET	Mobile Ad-Hoc Networks – Κινητά Αδόμητα Δίκτυα
MEO	Medium Earth Orbit - Μέσης γήινης τροχιάς
MIMO	Multiple Input Multiple Output – Συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων
MISO	Multiple Input Single Output ή Transmitter Space diversity - Διαφορισμός χώρου στον πομπό
NSA	National Security Agency

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας
OSI	Open Systems Interconnection (model) - Μοντέλο αναφοράς διασύνδεσης ανοιχτών συστημάτων
P2P	peer to peer
PM	Phase Modulation – Διαμόρφωση φάσης
PSK	Phase Shift Keying – Ψηφιακή διαμόρφωση φάσης
PSN	Public Safety Network – Δίκτυο Δημόσιας Ασφάλειας
QAM	Quadrature Amplitude Modulation – Τετραγωνισμένη διαμόρφωση πλάτους
QoS	Quality of Service - Ποιότητα των Παρεχόμενων Υπηρεσιών
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying – Τετραφωνική ψηφιακή διαμόρφωση φάσης
RBW	Resolution Bandwidth – Διακριτικής ικανότητας συχνότητας
RFID	Radio Frequency Identification - Ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων
RTK	Real Time Kinematics
SHA	Secure Hashing Algorithm
SIMO	Single Input Multiple Output ή Receiver Space diversity - Διαφορισμός χώρου στον δέκτη
SNR	Signal to Noise Ratio - Σηματοθορυβικός λόγος,
SS	spread spectrum - διασπορά φάσματος
TDMA	Time-Division Multiple Access - Μέθοδο Πολλαπλής Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου
UAS	Unmanned Aerial System – ΣμηΕΑ
UAV	Unmanned Aerial Vehicle - μηΕΑ
UHF	Ultra High Frequency
VTOL	Vertical take-off and Landing
WLAN	Wireless Local Area Network - ασύρματα τοπικά δίκτυα
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network - ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα
WMN	Wireless Mesh Network - Ασύρματα δίκτυα τοπολογίας πλέγματος
WPAN	Wireless Personal Area Network - ασύρματα προσωπικά δίκτυα
WSN	Wireless Sensors Network – Δίκτυα Ασύρματων Αισθητήρων
WWAN	Wireless Wide Area Network - ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής
EE	Ευρωπαϊκή Ένωση - EU
EMC	Electromagnetic Compatibility - Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα
H/M	Ηλεκτρομαγνητικός
M.O.	Μέσος Όρος
μηΕΑ	μη Επανδρωμένο Αερόχημα (Εναέριο Όχημα) - UAV
ΣμηΕΑ	Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροχήματος - UAS



## 1. Εισαγωγή

«Πάντες άνθρωποι τοῦ εἰδένααι ὀρέγονται φύσει» σύμφωνα με τον Αριστοτέλη, γεγονός που δηλώνει την φυσική τάση του ανθρώπου να αναζητά τη γνώση. Αυτή η ανάγκη διαχρονικά οδήγησε τον άνθρωπο να αναζητά συνεχώς πληροφορίες. Είναι χαρακτηριστικό ότι η απαίτηση της διακίνησης δεδομένων έχει αυξηθεί περίπου κατά 1000 φορές τα τελευταία χρόνια (Saad, Bennis and Chen, 2020). Λόγω της τεχνολογικής προόδου και της προαναφερθείσας ανάγκης μας για συνεχή πρόσκτηση πληροφορίας, ωθούμαστε στη δημιουργία πολυεπίπεδων «ευφών» ασύρματων δικτυακών δομών επικοινωνίας, ώστε να είναι συνεχής και απρόσκοπτη η διαχείριση του όγκου των πληροφοριών. Η υλοποίηση των δομών αυτών πέραν του σταθερού εξοπλισμού χρησιμοποιεί και φορητές συσκευές, μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα / Unmanned Aerial Vehicles (μηΕΑ / UAV) σε ρόλο αναμεταδότη, συσκευές internet of things (IoT). (Kaleem, Ahmad and Duong, 2022).

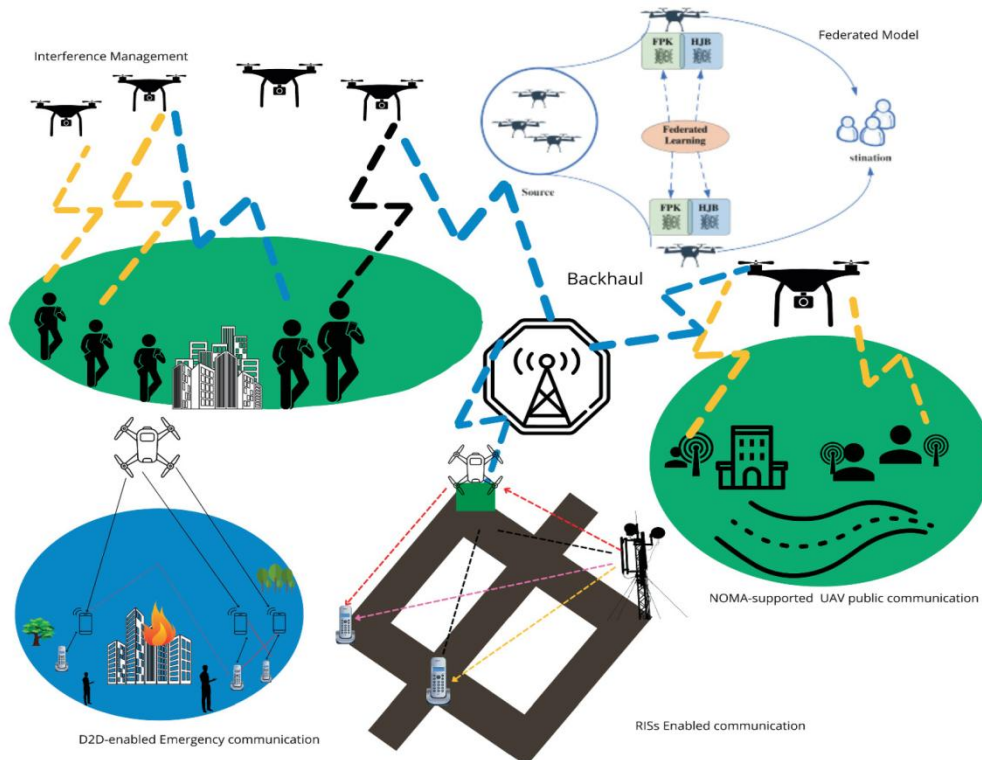
Με τον όρο μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (μηΕΑ - UAV) νοείται κάθε αεροσκάφος που λειτουργεί ή έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί αυτόνομα ή να οδηγείται εξ αποστάσεως, χωρίς χειριστή επί του σκάφους. Αυτός ο ορισμός περιλαμβάνει όλους τους τύπους αεροσκαφών χωρίς χειριστή επί του σκάφους, συμπεριλαμβανομένων των τηλεκατευθυνόμενων αερομοντέλων, με κάμερα επί του σκάφους ή όχι. Οι Κανονισμοί χρησιμοποιούν επίσης τον όρο Σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους / Unmanned Aircraft System (ΣμηΕΑ - UAS) και αναφέρονται σε ένα σύστημα που αποτελείται από μη επανδρωμένο αεροσκάφος και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τη λειτουργία του (π.χ. μονάδα εντολών, πιθανό καταπέλτη για την εκτόξευσή του κ.α.). (*Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems*, 2019)



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Η επικοινωνία που βασίζεται σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα είναι μια αναδυόμενη ερευνητική περιοχή των ασύρματων δικτύων με πολυάριθμες εφαρμογές σε τομείς όπως η δημόσια ασφάλεια, οι υπηρεσίες υγείας, η εποπτεία της κυκλοφορίας, η επιθεώρηση υποδομών, οι στρατιωτικές επικοινωνίες, η έρευνα και διάσωση κ.α. (Kaleem *et al.*, 2019), (Mohamed *et al.*, 2020), (Lee *et al.*, 2020). Τα ελκυστικά χαρακτηριστικά των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων και το ευρύ πεδίο εφαρμογών τους, έχει αποτελέσει αντικείμενο επισταμένης έρευνας, (Guo, Devine and Wang, 2014).



**Εικόνα 1: Σύστημα επικοινωνιών με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Kaleem, Ahmad and Duong, 2022).**

Τα δίκτυα επικοινωνιών αποτελούνται από κόμβους μέσω των οποίων διακινείται η πληροφορία μεταξύ των χρηστών. Σε ένα ασύρματο δίκτυο οι κόμβοι (σταθμοί βάσης) που μεταφέρουν την πληροφορία προς τους τελικούς χρήστες



υλοποιούνται με διατάξεις κεραιών οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε κατάλληλες θέσεις ώστε να επιτυγχάνεται η το δυνατόν καλύτερη κάλυψη μιας περιοχής. Ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα μπορεί να λειτουργεί ως επέκταση σταθμού βάσης, με άριστη συνδεσιμότητα με τον επίγειο σταθμό βάσης, αυξάνοντας το εύρος κάλυψης της ασύρματης επικοινωνίας (καθώς μειώνεται η ύπαρξη εμποδίων μεταξύ του σταθμού και του χρήστη) βελτιώνοντας παράλληλα τη χωρητικότητα και την κάλυψη των ασύρματων δικτύων (Zhang *et al.*, 2016), με ταυτόχρονη συλλογή και μεταφορά πληροφοριών από πολλαπλούς αισθητήρες με σημαντικά οφέλη σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Shakoor *et al.*, 2019). Επίσης μπορεί να αποτελέσει έναν ευέλικτο και γρήγορο σταθμό βάσης σε ασύρματες εφαρμογές (κινητή τηλεφωνία, στρατιωτικές επικοινωνίες κ.α.) (Chang, KALEEM and HUI, 2016) για κάλυψη περιοχών όπου είτε δεν υπάρχει καθόλου δυνατότητα δικτύωσης, είτε αυτή δεν είναι αξιόπιστη (Cai, Dias and Seneviratne, 2014), καθώς και σε περιοχές όπου λόγω φυσικών ή μη καταστροφών έχει καταρρεύσει το υπάρχον δίκτυο (Vo, Duong and Guizani, 2015).

Η υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου αποτελείται από έναν συνδυασμό πολλαπλών παραμέτρων, που για να καταστεί αξιόπιστο, αποτελεσματικό και ασφαλές πρέπει να μελετηθεί ο τρόπος διασύνδεσής του, οι θέσεις των αεροχημάτων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοσή και κατανάλωση ενέργειας του, καθώς και η ευρωστία του (robustness) που το καθιστά λιγότερο ευάλωτο από κάθε μορφής περιοριστικό παράγοντα (παρεμβολές, κακόβουλες ενέργειες) (Shahzadi, Ali and Naeem, 2022).

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας αποτελεί η υπό συγκεκριμένες παραμέτρους ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνιών μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων προσανατολισμένο να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα άμυνας ή ασφάλειας, καθώς και η μελέτη της λειτουργίας του σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές ή/και εσκεμμένες παρεμβολές, για να διαπιστωθεί αν αυτό μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστη λύση για εφαρμογές άμυνας ή ασφάλειας.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

Το παρόν πόνημα χωρίζεται σε έξι ενότητες (κεφάλαια). Οι τρεις πρώτες παρέχουν το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης. Στην πρώτη γίνεται μία σύντομη εισαγωγή για το θέμα και τη δομή της εργασίας. Στη δεύτερη αναλύονται οι παράμετροι των δικτύων επικοινωνιών που υλοποιούνται με μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα. Στην τρίτη αναλύονται οι αποστολές στις οποίες μπορούν τα δίκτυα αυτά να διατεθούν και οι παράμετροι επιλογής για την κατάλληλη αποστολή.

Ακολουθούν οι επόμενες τρεις που αποτελούν την υλοποίηση και επαλήθευση των όσων αναφέρθηκαν σε θεωρητικό επίπεδο για μια συγκεκριμένη πρόταση δικτύου. Αναλυτικότερα στην τέταρτη ενότητα αποδίδεται η πρόταση του συγγραφέα που αφορά στην ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνιών μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων προσανατολισμένου να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα άμυνας ή ασφάλειας και περιγράφονται οι τελικές επιλογές των υποσυστημάτων του. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται η διαδικασία των δοκιμών και αναφέρονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από αυτές. Τέλος στην έκτη και τελευταία ενότητα παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.





## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

#### 2. Δίκτυα Επικοινωνιών μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων

Τα δίκτυα επικοινωνιών που υλοποιούνται με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα είναι μία νέα ερευνητική περιοχή η οποία αναπτύσσεται με γρήγορους ρυθμούς. Από τις αρχές της προηγούμενης εικοσαετίας στη βιβλιογραφική ανασκόπηση συναντάμε επιστημονικά άρθρα που μελετούν την χρησιμότητα και τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων δικτύων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι μελέτες των P. Zhan, K. Yu, and A. L. Swindlehurst (Zhan, Yu and Swindlehurst, 2011), όπου διερευνήθηκε η απόδοση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων που λειτουργούν ως ρελέ για επίγειους κόμβους σε ένα ιεραρχικό ασύρματο δίκτυο, των S. Rohde and C. Wietfeld (Rohde and Wietfeld, 2012) όπου εξετάστηκε η τεχνική τοποθέτησης που χρησιμοποιεί drones ως ρελέ για αντιμετώπιση της υπερφόρτωσης των κυψελών ενός δικτύου και για αντιστάθμιση της διακοπής λειτουργίας του, καθώς και των C. Cambra et al (Cambra *et al.*, 2016) όπου προτάθηκε ένα σύστημα βασισμένο σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα για να βοηθήσει τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης σε καταστάσεις όπου τραυματισμένοι ορειβάτες βρίσκονται σε ειδικά εχθρικά περιβάλλοντα.



Εικόνα 2: Εφαρμογές δικτύων δημόσιας ασφάλειας (PSN) (Shahzadi, Ali and Naeem, 2022).

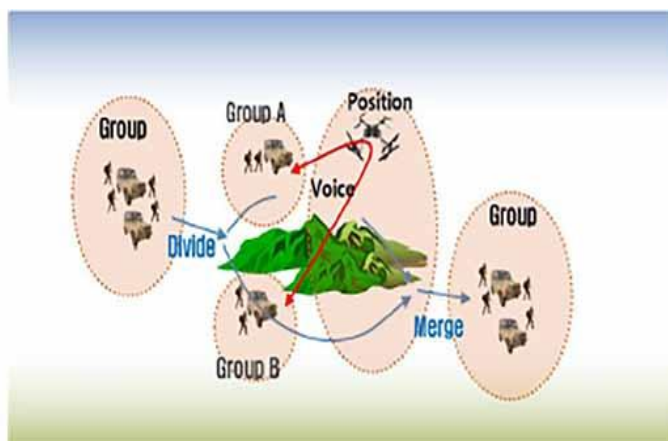


Τα τελευταία χρόνια η αλματώδης ανάπτυξη στον τομέα των μη επανδρωμένων οχημάτων και το χαμηλό κόστος τους, έχει στρέψει το ενδιαφέρον στις εφαρμογές που μπορούν να υλοποιούνται με αυτά. Για τον λόγο αυτό πλέον και η επιστημονική έρευνα γύρω από τα δίκτυα επικοινωνιών που υλοποιούνται με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα είναι εκτεταμένη. Παρουσιάζοντας μέρος της έρευνας αυτής για τη χρήση συγκεκριμένων δικτύων στη δημόσια ασφάλεια έχουμε την εξέταση στο (Bujari and Ronzani, 2017) διάφορων μοντέλων κινητικότητας καθώς και σεναρίων εφαρμογής τους σε δίκτυα MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) τα οποία υλοποιούνται με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα. Στο (Sayeed and Kumar, 2018), παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα του συντονισμού μεταξύ UAV και ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensors Network - WSN). Μία ακόμη μελέτη (Shakoor *et al.*, 2019) συνοψίζει τις βασικές συνεισφορές των εναέριων σταθμών βάσης (Aerial Base Stations – ABS) για τη διευκόλυνση των επικοινωνιών για χρήση στη δημόσια ασφάλεια, στοχεύοντας και στην προοπτική της ενεργειακής απόδοσης. Επιπλέον στο (Kaleem *et al.*, 2019) διερευνήθηκε μια ποικιλία μελλοντικών αρχιτεκτονικών επικοινωνίας τύπου MANET, συμπεριλαμβανομένων των υπάρχουσών ασύρματων τεχνολογιών. Στο άρθρο (Challita *et al.*, 2019) συνοψίζονται κύριες περιπτώσεις χρήσης μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων συνδεδεμένων με κυψέλη. Μία άλλη οπτική που αφορά στην ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών σε «έξυπνες» πόλεις μελετάται στο (Mohamed *et al.*, 2020). Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), τη ρομποτική και τα αυτόνομα συστήματα όπως τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, και θα υλοποιούν εφαρμογές στην έξυπνη διαχείριση της κυκλοφορίας, την ασφάλεια και ασφάλεια, τα έξυπνα μέσα, την έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, την έξυπνη καθοδήγηση κ.α.. Ομοίως και στο άρθρο (Shahzadi *et al.*, 2021) οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η ασύρματη επικοινωνία 5G/B5G (5G και πέρα από 5G) με τη βοήθεια μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων είναι η πρωτοποριακή τεχνολογία της εποχής και παρουσιάζουν τρεις περιπτώσεις χρήσης αυτών σε



ασύρματη επικοινωνία ως ιπτάμενος σταθμός βάσης, ως εξοπλισμός χρήστη και ως ιπτάμενο ρελέ.

Τα δίκτυα αυτά έχουν μεγάλη εφαρμογή και απήχηση για στρατιωτικούς σκοπούς. Ωστόσο, λόγω του διαβαθμισμένου επιπέδου των συστημάτων αυτών υπάρχει μικρός αριθμός δημοσιευμένων επιστημονικών ερευνών. Σε μία από αυτές (Hui, Phillips and Kekirigoda, 2017) παρουσιάζεται μια λύση επέκτασης εμβέλειας πέρα της οπτικής επαφής με τακτικό ασύρματο δίκτυο, χρησιμοποιώντας ένα αυτόνομο UAV. Ενώ σε μία άλλη (Lee *et al.*, 2020) διερευνάται το πρόβλημα κατανομής θυρίδων και τοποθέτησης του μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος για τη μεγιστοποίηση της κάλυψης, προτείνοντας βέλτιστους μηχανισμούς κατανομής θυρίδων και τοποθέτησης του εναέριου οχήματος σε ένα τακτικό MANET. Δεν πρέπει να παραλείψουμε από την αναφορά μας τις μελέτες που αφορούν στη δυνατότητα κάλυψης θαλασσιών περιοχών για εκτέλεση επιχειρήσεων στον τομέα της άμυνας από τον Μ. Ποθητό (Pothis, 2015) στο πλαίσιο επεξεργασίας εικόνων για αναγνώριση στόχου (image fusion for target recognition) και τον Μ. Maurin (Maurin, 2016) στο πλαίσιο διαχείρισης ενός MANET για υποστήριξη παράκτιων επιχειρήσεων (littoral operations), μέρος των οποίων διεξήχθη στο Αιγαίο Πέλαγος.



Εικόνα 3: Tactical MANET (Lee *et al.*, 2020).



## 2.1 Ασύρματα δίκτυα

Ως ασύρματα δίκτυα χαρακτηρίζονται τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN).

Τα ασύρματα δίκτυα στηρίζονται σε διάφορες τεχνολογίες ρυθμιζόμενες από τα πρότυπα του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE). Οι εν λόγω τεχνολογίες μπορούν να προσφέρουν είτε μικρής εμβέλειας επικοινωνία με τεχνολογίες, είτε επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, ανάλογα πάντα με το είδος της κεραίας που χρησιμοποιείται. Τις δημοφιλέστερες ασύρματες τεχνολογίες αποτελούν το WiFi και το WiMAX, οι οποίες βασίζονται στα πρότυπα IEEE 802.11 και IEEE 802.16, αντίστοιχα. (Comer, 2015)

Το πρότυπο IEEE 802.11 είναι μια οικογένεια προδιαγραφών για ασύρματα τοπικά δίκτυα, στο οποίο περιγράφονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε αυτά. Όλα τα πρότυπα που περιλαμβάνει η οικογένεια προτύπων 802.11 χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο Ethernet και τη Μέθοδο Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση Φέροντος και Αποφυγή Συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA), προσδίδοντας χαρακτηριστικά mesh δικτύων στις ομότιμες (peer to peer – P2P) σχέσεις των κόμβων στα υποστηριζόμενα δίκτυα. Ενώ στο WiMAX, οι κινούμενοι κόμβοι δύναται να συνδεθούν με ευρυζωνικά επικοινωνιακά κανάλια αξιοποιώντας τεχνικές διασποράς φάσματος (Spread Spectrum - SS) και ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας



(Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), υποστηρίζοντας μετάδοση βίντεο και ήχου σε πραγματικό χρόνο μέσα από το ίδιο κανάλι. (Comer, 2015), (Proakis and Salehi, 2008)

### 2.1.1 Πλεονεκτήματα ασύρματης δικτύωσης

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών παρουσιάζουν πλεονεκτήματα συγκρινόμενα με τα σταθερά σχήματα επικοινωνιών, τα οποία σχετίζονται με :

- Την ευκολία χρήσης. Στις μέρες μας αποτελεί κοινό τόπο η ύπαρξη συσκευών με δυνατότητα διασύνδεσης σε ασύρματα δίκτυα, παρέχοντας την δυνατότητα στην εύκολη πρόσβαση και εξοικείωση της χρήση των τεχνολογιών αυτών.
- Την φορητότητα. Οι χρήστες του δικτύου μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένοι σε οποιοδήποτε μέρος παρέχεται κάλυψη από αυτό, με οποιαδήποτε συμβατή φορητή ή μη συσκευή εκμεταλλευόμενοι συνεχώς τα δεδομένα που αυτό μπορεί να παρέχει.
- Την παραγωγικότητα. Οι εργαζόμενοι του οργανισμού, που έχει εγκαταστήσει ένα ασύρματο δίκτυο, έχουν εύκολη πρόσβαση στις πληροφορίες και στις βασικές εφαρμογές που απαιτούνται για την διεκπεραίωση των έργων που τους έχουν ανατεθεί. Γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της απόδοσης συνολικά του οργανισμού.
- Την εύκολη ρύθμιση. Εφόσον δεν απαιτείται η τοποθέτηση καλωδίων σε ένα χώρο, η εγκατάσταση μπορεί να ολοκληρωθεί γρήγορα και οικονομικά.
- Την δυνατότητα επέκτασης / κλιμάκωσης. Η περιοχή κάλυψης του δικτύου ενδέχεται να μην εξυπηρετεί τις μελλοντικές απαιτήσεις του οργανισμού που το λειτουργεί. Η επέκταση ενός ασυρμάτου δικτύου όμως είναι πολύ ευκολότερη και γρηγορότερη από την επέκταση ενός δικτύου ενσύρματων επικοινωνιών.



- Το κόστος. Η λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου είναι οικονομικότερη καθώς εξαλείφει ή μειώνει το κόστος εργασιών και υλικών για την εγκατάσταση ενσύρματου εξοπλισμού.

Ωστόσο υπάρχουν θέματα που απαιτούν μεγαλύτερη προσοχή κατά τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και υποστήριξη των ασύρματων δικτύων, τα οποία κυρίως αφορούν:

- Στην ασφάλεια. Ο έλεγχος και η διαχείριση της πρόσβασης στο ασύρματο δίκτυο είναι μέγιστης σημασίας για την επιτυχία του. Οι εξελιγμένες δυνατότητες της τεχνολογίας WiFi προσφέρουν ισχυρή προστασία, ωστόσο οι ασύρματες επικοινωνίες είναι ευκολότερο να βρεθούν στο στόχαστρο κακόβουλων ενεργειών.
- Στην εμβέλεια. Η κυματική φύση της ασύρματης επικοινωνίας υπόκεινται σε φαινόμενα τα οποία την εξασθενούν, μειώνοντας την πραγματική εμβέλεια των συστημάτων αυτών.

### 2.1.2 Τοπολογίες δικτύων

Τοπολογία δικτύου ονομάζεται η γεωμετρική διάταξη των συνδέσεων (ενσύρματων ή ασύρματων) των επικοινωνιακών συσκευών του δικτύου. Οι τοπολογίες διακρίνονται σε φυσικές και σε λογικές και τα κυριότερα είδη τους είναι (Comer, 2015):

- Η τοπολογία διαύλου (bus), στην οποία όλες οι συσκευές του δικτύου συνδέονται με ένα κεντρικό τμήμα του δικτύου, το οποίο αποκαλείται δίαυλος ή σπονδυλική στήλη (bus ή backbone). Στην τοπολογία αυτή, σε περίπτωση που σε κάποιο σημείο του διαύλου διακοπεί η επικοινωνία, το δίκτυο καταρρέει. Μέρος της τοπολογίας διαύλου είναι και η γραμμική (linear) τοπολογία διαύλου, η οποία ονομάζεται έτσι καθώς όλοι οι





## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

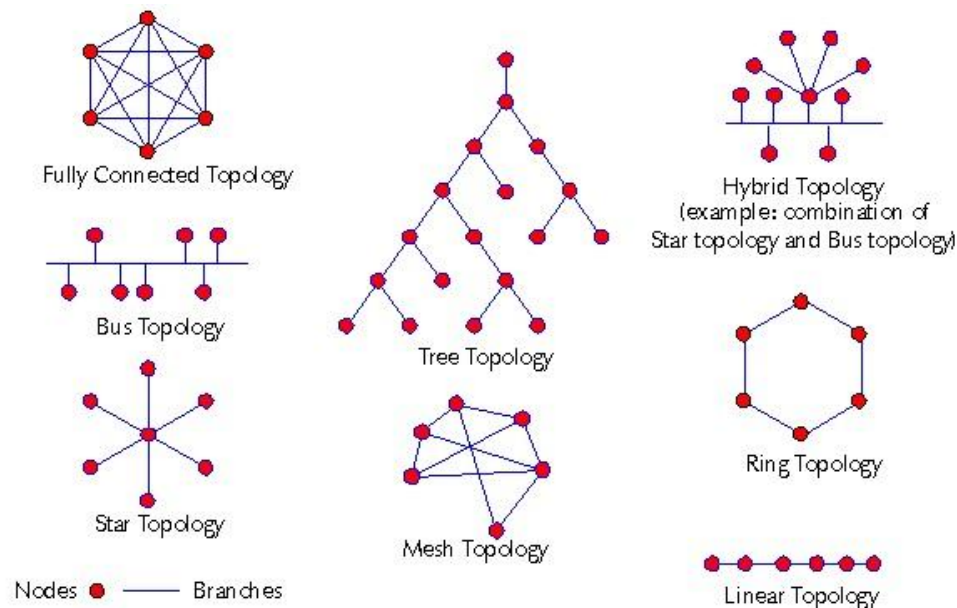
---

συνδεδεμένοι κόμβοι / συσκευές διασυνδέονται με το ίδιο μέσο, ο ένας μετά τον άλλο, σχηματίζοντας μια νοητή ευθεία γραμμή.

- Η τοπολογία τύπου δακτυλίου (ring), όπου κάθε συσκευή συνδέεται άμεσα με δύο άλλες συσκευές, μια από κάθε πλευρά έτσι ώστε όλες οι συσκευές να συνδέονται με μορφή ενός κλειστού βρόχου, (δηλαδή οι κόμβοι του δικτύου σχηματίζουν έναν κύκλο). Μία απώλεια κόμβου ή σύνδεσης οδηγεί και εδώ σε κατάρρευση του δικτύου.
- Η τοπολογία τύπου αστέρα (star). Εδώ όλες οι συσκευές συνδέονται με μια κεντρική συσκευή (hub). Σε αυτή την τοπολογία η βλάβη των κόμβων ή των συνδέσεων δεν οδηγεί σε κατάρρευση το δίκτυο, παρά μόνο η βλάβη της κεντρικής συσκευής.
- Η τοπολογία δένδρου, που αποτελεί συνδυασμό της τοπολογίας διαύλου και αστέρα, ενώ το όνομά της προέρχεται από την μορφή ανεστραμμένου δένδρου που έχει το διάγραμμά της. Στην τοπολογία αυτή υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος που ονομάζεται κεφαλή ή ρίζα, στον οποίο συνδέονται κόμβοι του δικτύου και οι οποίοι με την σειρά τους συνδέονται με άλλους κόμβους. Η σύνδεση των κόμβων δεν δημιουργεί κλειστούς βρόχους. Η μετάδοση των μηνυμάτων περνά από την κεφαλή η οποία λειτουργεί σαν αναμεταδότης, γεγονός που αποτελεί και το βασικό αδύνατο σημείο καθώς αν παρουσιάσει βλάβη στην κεφαλή σταματά η λειτουργία όλου του δικτύου.
- Η πλήρως καταναμημένη τοπολογία –πλέγμα (total mesh/ net/ full connected) Στην τοπολογία τύπου πλέγματος (mesh) κάθε κόμβος του δικτύου συνδέεται με κάθε άλλο (κάθε κόμβος είναι και τελική συσκευή και συσκευή προώθησης), δημιουργώντας μια σύνδεση σημείου προς σημείο μεταξύ κάθε συσκευής στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται υψηλό επίπεδο πλεονασμού, ώστε εάν ένα τμήμα του δικτύου αποτύχει, τα δεδομένα να έχουν πάντοτε μια εναλλακτική διαδρομή για να φτάσουν στον προορισμό τους.
- Η καταναμημένη τοπολογία/ πλέγμα (mesh/plex). Η τοπολογία αυτή ουσιαστικά αποτελεί υποπερίπτωση της πλήρους καταναμημένης τοπολογίας,



όταν για διάφορους λόγους ένα τμήμα του δικτύου της αποτύχει, οπότε δεν είναι εφικτή η απευθείας διασύνδεση όλων των κόμβων μεταξύ τους.



Εικόνα 4: Τοπολογίες Δικτύων (Pothitos, 2015)

- Η υβριδική τοπολογία (hybrid), η οποία συνδυάζει τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται σε δύο ή περισσότερες γραμμικές κυρίως τοπολογίες. Για παράδειγμα ένα δίκτυο με υβριδική τοπολογία διαύλου/αστέρα αποτελείται από ένα διάυλο ή αρτηρία (bus) ευρείας ζώνης, που καλείται backbone «σπονδυλική στήλη», και συνδέει επιμέρους δίκτυα υπολογιστών με τοπολογία αστέρα και χαμηλή ταχύτητα (ενδέχεται να υπάρχουν και τα τρία είδη σε διάφορα σημεία του δικτύου). (Comer, 2015)

### 2.1.3 Κόμβοι δικτύων

Οι τύποι κόμβων που μπορούν να αποτελούν μέρος ενός MANET ή WMN είναι πολυάριθμοι και μπορούν να επεκταθούν από μεμονωμένους ανθρώπους έως μη επανδρωμένα συστήματα και δορυφόρους. Οι δορυφόροι και τα μη επανδρωμένα συστήματα λειτουργώντας ως κόμβοι μπορούν να αποδειχθούν εξαιρετικά ωφέλιμα





## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

για αυτούς τους τύπους δικτύων αναλαμβάνοντας πολλαπλούς ρόλους (ενεργώντας ως ρελέ για την επέκταση του δικτύου και επίσης ως πλατφόρμες για μεταφορά αισθητήρων). Ορισμένα κύρια χαρακτηριστικά και δυνατότητες των πιο σημαντικών κόμβων περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους:

α. **Μικροί δορυφόροι.** Τα τελευταία χρόνια, έχει δοθεί έμφαση στην έρευνα και ανάπτυξη μικρών δορυφόρων. Γενικά οι δορυφόροι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις τροχιές τους (χαμηλής γήινης τροχιάς (LEO), μέσης γήινης τροχιάς (MEO), γεωσύγχρονης ή γεωστατικής τροχιάς της γης (GEO) και άκρως ελλειπτικής γήινης τροχιάς (HEO)) και βάση του βάρους τους (μεγάλοι, μεσαίοι, μικροί). (Maini and Agrawal, 2011)

Ένα είδος μικρών δορυφόρων είναι οι δορυφόροι Cube ή Cubesats, συνήθως με μάζα μικρότερη από 100 κιλά (kg), είναι πολλά υποσχόμενοι λόγω του μικρού τους μεγέθους και του χαμηλού κόστους κατασκευής τους. Πλεονεκτήματά τους αποτελούν η δυνατότητά τους να εκτοξεύονται σε ομάδες από πλατφόρμες διαφορετικές από τους παραδοσιακούς πυραύλους έχοντας μικρότερο χρόνο για να τεθούν σε υπηρεσία, η δυνατότητα συνδυασμού των δομικών στοιχείων τους (κύβων) για τον σχηματισμό μεγαλύτερου δορυφόρου, η διαθεσιμότητα πληθώρας κατάλληλων συμβατών εξαρτημάτων στην αγορά επιτρέποντας την κατασκευή τους χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένο εργαστήριο, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος και οι μικρότερες καθυστερήσεις στην επικοινωνία (λόγω της τοποθέτησής τους στην χαμηλή γήινη τροχιά).

Φυσικά, το μικρό τους μέγεθος και, κατά συνέπεια, το ωφέλιμο φορτίο τους περιορίζουν τις δυνατότητές τους όσον αφορά την ισχύ, τους αισθητήρες ή τις κεραίες που μπορεί να τοποθετηθεί σε αυτά. Όμως η τεχνολογία αυτή αντιμετωπίζει προβλήματα όπως η λιγότερο ακριβής τροχιακή πιστότητα, ο περιορισμένος έλεγχος προσανατολισμού και η ανακριβής κατάδειξη τα οποία περιορίζουν τις δυνατότητές και την ασφάλεια των Cubesats. Κατά την σχεδίαση του επικοινωνιακού δικτύου θα



πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως ο χρόνος επανεπίσκεψης, η κάλυψη, το προσδόκιμο ζωής, ο αριθμός και η θέση των επίγειων σταθμών και το υψόμετρο εντός της εμβέλειας του LEO, που είναι περίπου 200 έως 2000 χιλιόμετρα (km) (Pothitos, 2015).

β. **Μη επανδρωμένα συστήματα.** Ιδιαίτερη αναφορά θα πραγματοποιηθεί στην παρούσα εργασία στην χρήση μη επανδρωμένων συστημάτων (Ειδικότερα η χρήση μη επανδρωμένων αεροχημάτων (μηΕΑ)). Τα τελευταία χρόνια η χρήση των μηΕΑ επεκτείνεται ραγδαία στον εμπορικό τομέα καθώς και στις ένοπλες δυνάμεις κυρίως χάρη στις προόδους στους μικροεπεξεργαστές και την τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence - AI) (Adnan, Nordin and Bahrudin, 2019) γεγονός που δημιουργεί σημαντικά πλεονεκτήματα όπως το χαμηλό κόστος και η υψηλή χρηστικότητα (Boukoberine, Zhou and Benbouzid, 2019). Ειδικότερα σε εφαρμογές άμυνας συμβάλουν στη μείωση του φόρτου των μαχητών και αυξάνουν την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητά τους, παρέχουν καλύτερη επικοινωνιακή κάλυψη (κυρίως τα αεροχήματα) σε σχέση με τις σταθερές κεραίες επικοινωνιών, έχουν μεγάλη ευελιξία και κινητικότητα καλύπτοντας με τον τρόπο αυτό ευκολότερα και γρηγορότερα τις περιοχές ενδιαφέροντος, έχοντας χαμηλή ανιχνευσιμότητα από τους αντιπάλους. Στον αντίποδα ο χρόνος λειτουργίας (κυρίως των μικρών σε μέγεθος μονάδων) και τα κενά ασφαλείας που μπορεί να δημιουργήσει η ασύρματη ζεύξη των μη επανδρωμένων συστημάτων αποτελούν μειονέκτημα κυρίως σε εφαρμογές άμυνας και ασφάλειας (Suojanen, 2018).

Τα ανωτέρω πλεονεκτήματα έχουν οδηγήσει τη χρήση των μη επανδρωμένων συστημάτων σε ευρύ πεδίο εφαρμογών τόσο σε στρατιωτικό όσο και σε μη στρατιωτικό (πολιτικό) επίπεδο (Chamola *et al.*, 2021). Σε τέτοια συστήματα ανατίθενται διάφορες αποστολές ανάλογα με το λειτουργικό τους περιβάλλον. Σε περιβάλλοντα άμυνας και ασφάλειας τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές συλλογής πληροφοριών, επιτήρησης και αναγνώρισης (Intelligent Surveillance Recognize - ISR), δημιουργίας τοπικά κατανεμημένο δίκτυο

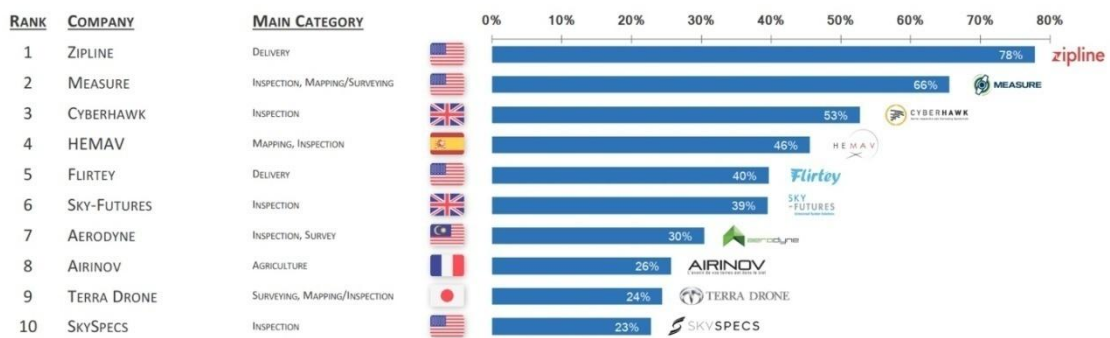


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

επικοινωνιών στην περιοχή ενδιαφέροντος σε περίπτωση που αυτό δεν υπάρχει ή έχει υποστεί ζημιές, χαρτογράφησης, έρευνας - διάσωσης, διοικητικής μέριμνας - υποστήριξης (Logistics) και εμπλοκής (Engagement) (Suojanen, 2018). Σε μη στρατιωτικές εφαρμογές τα έργα με την μεγαλύτερη χρήση μη επανδρωμένων αεροχημάτων είναι η παράδοση, η επιθεώρηση, η χαρτογράφηση, η επιτήρηση και οι γεωργικές χρήσεις ('The Top 20 Drone Service Provider Ranking', 2018). Ωστόσο υπάρχουν ακόμη πολλοί τομείς όπου η τεχνολογία αυτή βρίσκει εφαρμογή.

**Πίνακας 1: Οι Δέκα σημαντικότεροι χρήστες μηΕΑ ('The Top 20 Drone Service Provider Ranking', 2018)**



Feb. 2018, basis of assessment: The ranking is based on the following indicators with different emphasis stated in brackets: Size of company (1), number of followers (1), amount of funding (1), number of partnerships (0.5), and the extend of web activity (two different categories with an emphasis of 1.5). The highest scoring company in each dimension receives a rating of 100%, while all other drone companies receiving a lower percentage in linear relation to the score of the highest ranking company. The total score is an average of all four measured dimensions. A company can reach an index of 100% if he leads all considered sources.

Τα χαρακτηριστικά και οι διαμορφώσεις των μηΕΑ ποικίλλουν ευρέως ανάλογα με τις απαιτήσεις της αποστολής. Για το λόγο αυτό υπάρχουν και διαφορετικοί τύποι ταξινομήσεων που επικεντρώνονται σε διαφορετικές παραμέτρους (Hassanalian and Abdelkefi, 2017; Shakhathreh *et al.*, 2019). Οι ταξινομήσεις αυτές βασίζονται είτε στο μέγιστο βάρος απογείωσης  $W_{to}$  (nano  $W_{to} < 250\text{gr}$ , micro  $250\text{gr} < W_{to} < 2\text{kgr}$ , small  $2\text{kgr} < W_{to} < 25\text{kgr}$ , medium  $25\text{kg} < W_{to} < 150\text{kgr}$ , large  $W_{to} > 150\text{kgr}$ ), είτε στο ύψος πτήσης και την εμβέλεια (hand-held, close, NATO, tactical, MALE, HALE), είτε στον τρόπο σχεδίασης (σταθερών πτερύγων, μονού έλικα - ελικόπτερο, πολλαπλών ελίκων – πολυκόπτερο, υβριδικά σταθερών πτερύγων με δυνατότητα κάθετης από – προσγείωσης (VTOL)) (Dalamagkidis, 2015), είτε ανάλογα με την επικινδυνότητα της πτήσης (ανοιχτή



κατηγορία, ειδική κατηγορία, πιστοποιημένη κατηγορία) (ΕΚΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΕ) 2019/947 ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ της 24ης Μαΐου 2019 για τους κανόνες και τις διαδικασίες που διέπουν τη λειτουργία μη επανδρωμένων αεροσκαφών, 2019). Οι προαναφερθείσες κατηγορίες έχουν και αυτές υποδιαίρεσεις οι οποίες ποικίλουν.

γ. **Άλλοι κόμβοι.** Όπως θα αναφερθεί εκτενώς και στη συνέχεια τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να δικτυώσουν διάφορους κόμβους και να επεκτείνουν τα υπάρχοντα επίγεια ή δορυφορικά δίκτυα. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πλεονέκτημα ειδικά σε παράκτια περιβάλλοντα για τη δικτύωση επανδρωμένων ή μη επανδρωμένων πλατφορμών και επίγειων σταθμών. Ομάδες αποστολών, μεμονωμένοι μαχητές, υποβρύχια συστήματα ή ακόμα και δύτες θα μπορούσαν επίσης να γίνουν μέρος του δικτύου χρησιμοποιώντας πλωτές πλατφόρμες και ασύρματες συσκευές (Pothitos, 2015). Με αυτόν τον τρόπο, οι ομάδες επιχειρήσεων μπορούν να εκμεταλλευτούν αυτά τα ασύρματα δίκτυα για την ανταλλαγή πληροφοριών.

#### 2.1.4 Είδη ασύρματων δικτύων (MANET, WMN)

Η χρήση ασύρματων δικτύων επικοινωνιών που υλοποιούνται από μη επανδρωμένα αεροχήματα είναι ιδιαίτερα προσοδοφόρα, κυρίως επειδή οι υπάρχουσες εφαρμογές παρέχουν μεγαλύτερη ελαστικότητα, εμβέλεια και δυνατότητες. Οι εφαρμογές τους επικεντρώνονται σε περιπτώσεις όπου οι ήδη υπάρχουσες υποδομές είτε απαιτούν επέκταση, είτε έχουν υποστεί καταστροφές, αλλά και σε περιοχές όπου δεν υφίστανται υποδομές επικοινωνίας.

Ωστόσο, η υλοποίηση επιχειρησιακά αξιοποιήσιμων ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών από μη επανδρωμένα αεροχήματα δεν είναι εύκολη υπόθεση. Η υψηλή κινητικότητα των φορέων των κόμβων του δικτύου οδηγεί σε συνεχή μεταβολή των πόρων του δικτύου (τοπολογία του δικτύου, περιορισμοί ισχύος, ποιότητα



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

ασύρματης ζεύξης, απώλειες διάδοσης, παρεμβολές) καθώς οι κόμβοι εισέρχονται και εξέρχονται δυναμικά σε αυτό. Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση κατάλληλων πρωτόκολλων δρομολόγησης ώστε να υποστηριχθεί απρόσκοπτα η λειτουργία αυτών των υψηλής κινητικότητας δυναμικών δικτύων. Τα είδη εφαρμογών ασυρμάτων δικτύων που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην υλοποίηση δικτύων επικοινωνιών μη επανδρωμένων συστημάτων, αποτελούν υποομάδα των ασυρμάτων multi – hop δικτύων και είναι τα κάτωθι:

**α. Mobile ad – hoc network (MANET).** Τα MANET είναι ασύρματα δίκτυα τα οποία σχηματίζονται από συσκευές, οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους, χωρίς να απαιτούνται εγκαταστάσεις, σταθμοί βάσης ή διαμόρφωση δικτύου. Διαφορετικές τεχνικές και πρωτόκολλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προώθηση και αναμετάδοση των πακέτων των δεδομένων, μέσω του MANET. Κατά τη διάρκεια της δρομολόγησης, κάθε κινητός κόμβος αυτών των δικτύων ενεργεί αμφοτέρωθεν ως τερματικό ή ως δρομολογητής, ο οποίος προωθεί τη λαμβανόμενη πληροφορία στους υπόλοιπους κόμβους εντός της εμβέλειάς του. Με τον τρόπο αυτό τα μηνύματα διαδίδονται μέσα σε ένα προκαθορισμένο μονοπάτι, αναπηδώντας από κόμβο σε κόμβο μέχρι να φτάσουν στον επιθυμητό προορισμό. Στην περίπτωση όπου κατά τη διάδοση του μηνύματος η επικοινωνία μεταξύ κόμβων διακοπεί, το δίκτυο βρίσκει άλλο τρόπο μετάδοσης των πληροφοριών μέσω των λοιπών υπάρχοντων διαθέσιμων κόμβων, καταδεικνύοντας το χαρακτηρισμό των δικτύων του τύπου ως αυτό-ιασώμενα. Ο καθορισμός των κόμβων που θα συνεισφέρουν στο δίκτυο είναι εξαιρετικά δυναμική διαδικασία, καθιστώντας τα MANET δυναμικά δίκτυα. Γι' αυτό το λόγο, όλη η δραστηριότητα του δικτύου (η ανακάλυψη της τοπολογίας και η μετάδοση των πληροφοριών) ελέγχεται από κάθε κόμβο ξεχωριστά (Comer, 2015).

**β. Ασύρματα δίκτυα τοπολογίας πλέγματος (Ασύρματα Mesh Δίκτυα Wireless Mesh Networks - WMNs).** Τα ασύρματα mesh δίκτυα αποτελούν συγκεκριμένο τύπο των προαναφερόμενων MANET δικτύων. Επομένως αυτά



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

κληρονομούν τα χαρακτηριστικά του αυτό – σχηματισμού, της αυτό – οργάνωσης και της αυτό - ίασης. Η διαφορά τους εντοπίζεται στις δυνατότητες των κόμβων των WMNs. Σε αυτούς υπάρχει, από κατασκευής, η προοπτική για διασύνδεση και με άλλα δίκτυα, καθώς διαθέτουν πύλες (gateways), οι οποίες συνυπάρχουν στους δρομολογητές πλέγματος, που τους επιτρέπουν την διασύνδεση με άλλα συμβατά δίκτυα. Η τοπολογία των WMNs είναι η πλήρως καταναμημένη τοπολογία – πλέγμα που αναφέρθηκε παραπάνω (Misra, Misra and Woungang, 2009).

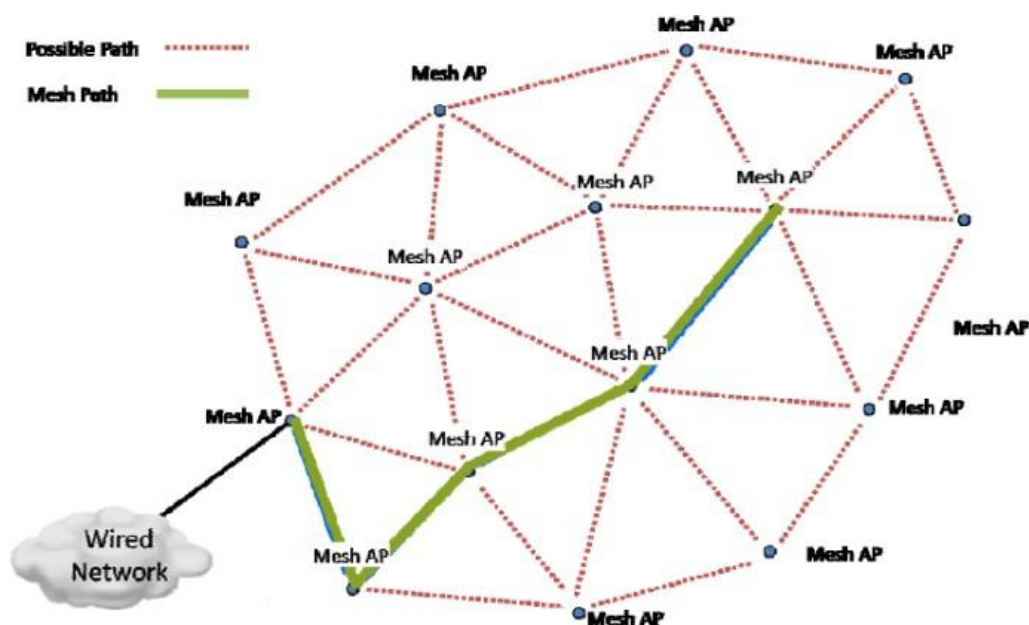
Στο πεδίο εφαρμογών, ωστόσο, μια πλήρης καταναμημένη τοπολογία – πλέγμα είναι εξαιρετικά δύσκολο να πραγματοποιηθεί και να διατηρηθεί, εφόσον τα εν λόγω δίκτυα χαρακτηρίζονται από υψηλή κινητικότητα και οι κόμβοι εισέρχονται και εξέρχονται δυναμικά του δικτύου. Αυτό είναι εύκολα κατανοητό άλλωστε, αν αναλογιστεί κανείς πως σε δίκτυο που υλοποιείται με μηΕΑ, οι φορείς των επικοινωνιακών κόμβων κινούνται με υψηλές ταχύτητες στο χώρο. Παρόλα αυτά, η συμμετοχή των κόμβων των δικτύων αυτών ως κόμβων διαδικτύου (Internet Gateways - IGWs) προσδίδει την ικανότητα για παροχή διασύνδεσης με τα υπάρχοντα δίκτυα όπως είναι τα επίγεια, τα δορυφορικά και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (4G – 5G και μελλοντικά 6G), καταδεικνύοντας τις εξαιρετικές προοπτικές για το σχηματισμό επεκτάσιμου και υψηλής κινητικότητας ευρυζωνικού δικτύου σε τοποθεσίες όπου δεν υφίσταται υποδομή. Επιπλέον, η χρήση δορυφόρων χαμηλής τροχιάς ως κόμβων στα WMNs μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση της διακίνησης των δεδομένων (latency) στις μεσαίες και μακρινές αποστάσεις επικοινωνίας (Jerome, 2011).

Για την λειτουργία των ανωτέρω περιγραφέντων δικτύων (MANETs, WMNs) χρησιμοποιούνται τρεις κατηγορίες δρομολόγησης, η προκαθορισμένη από πίνακες ή προενεργοποιημένη (proactive) δρομολόγηση, η κατ' απαίτηση (on – demand) ή reactive δρομολόγηση και η υβριδική δρομολόγηση που αποτελεί συνδυασμό των προηγούμενων δύο κατηγοριών. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο κύριων κατηγοριών δρομολόγησης είναι ότι στην προκαθορισμένη από πίνακες,





υπάρχει η απαίτηση οι πληροφορίες της δρομολόγησης να αποθηκεύονται απ' όλους τους δρομολογητές, ακόμα και από εκείνους που είναι αδρανείς, ενώ στην κατ' απαίτηση δρομολόγηση αποθηκεύονται μόνο στους ενεργούς κόμβους. Αναμφισβήτητα, τα υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι αυτά που συχνά επιτυγχάνουν καλύτερες επιδόσεις, λόγω της συνεχώς μεταβαλλόμενης φύσης των κόμβων και του γεγονότος ότι κάθε κόμβος σε ad – hoc δίκτυο δρα ταυτόχρονα ως εξυπηρετητής (host) και ως δρομολογητής (router).



Εικόνα 5: Τοπολογία – Δρομολόγηση Mesh Δικτύου (Jerome, 2011).

Τα δίκτυα αυτά (MANETs και WMNs) βρίσκουν εφαρμογή στην υλοποίηση επικοινωνιακών δικτύων που χρησιμοποιούνται σε ποικίλες αποστολές όπως έρευνας διάσωσης, δημόσιας ασφάλειας, αντιμετώπισης καταστροφών και σε στρατιωτικές εφαρμογές επικοινωνιών. Εξειδικεύοντας όμως τη χρήση τους σε περιβάλλοντα άμυνας και ασφάλειας τα WMNs παρουσιάζουν επιχειρησιακά πλεονεκτήματα συγκρινόμενα με τα MANETs, ως κάτωθι (Comer, 2015):



- Δυνατότητα δημιουργίας μικρών ad – hoc δικτύων αποτελούμενων από ποικίλες μονάδες (ανθρώπους, μη Επανδρωμένα Συστήματα, ναυτικές μονάδες κλπ.).
- Δεν απαιτείται η χρησιμοποίηση υποδομών ( infrastructure ).
- Επιτυγχάνεται άμεση διασύνδεση των κόμβων με διαφορετικές πλατφόρμες, χωρίς την απαίτηση χρήσης ειδικού εξοπλισμού.
- Επιτυγχάνεται μεγάλος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων (ρυθμαπόδοση - throughput) ώστε να μπορεί να υποστηριχθεί η μετάδοση video, εικόνας, ήχου και δεδομένων.
- Αναπτύσσεται εύκολα στο πεδίο των επιχειρήσεων.
- Η φορητότητα των συσκευών που χρησιμοποιούνται επιτρέπει να γίνουν μέρος του δικτύου ακόμα και μεμονωμένα άτομα (π.χ. δυνάμεις καταδρομών, δύτες κ.ο.κ.).
- Οι συσκευές διαθέτουν ενσωματωμένη ασφάλεια.
- Εκπέμπουν με χαμηλή ισχύ, επομένως είναι δύσκολο να γίνουν αντιληπτά από τους αντιπάλους και να υποκλαπούν δεδομένα.

## 2.2 Υλοποίηση δικτύου επικοινωνιών μηΕΑ

Η μελέτη της επιστημονικής αρθρογραφίας για τα δίκτυα επικοινωνιών μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων που προέκυψε από τις βιβλιογραφικές αναζητήσεις, οδήγησε στη διαπίστωση ότι η υλοποίησή τους βασίζεται σε τρεις τομείς, α. στη διαχείριση των παραμέτρων/πόρων του δικτύου, β. στη διαχείριση ενέργειας και γ. στην ευρωστία, οι οποίοι παρουσιάζονται στα παρακάτω υποκεφάλαια.

### 2.2.1 Διαχείριση των παραμέτρων/πόρων του δικτύου

Ο πρώτος από τους τρεις τομείς στους οποίους γίνεται ιδιαίτερη αναφορά κατά την υλοποίηση δικτύων επικοινωνιών με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα



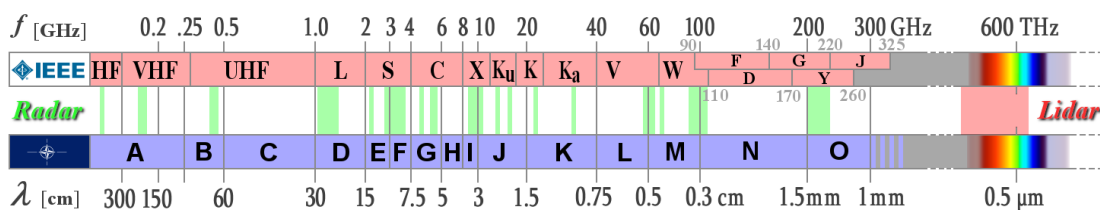


είναι αυτός της διαχείρισης των παραμέτρων του δικτύου. Ένα δίκτυο έχει πολλές παραμέτρους (συχνότητα, εύρος ζώνης, ρυθμαπόδοση δεδομένων, χωρητικότητα, διαμορφώσεις σήματος, ισχύ εκπομπής, κάλυψη, ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, μοντέλα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μηχανισμοί διόρθωσης σφαλμάτων κ.α.), τις οποίες πρέπει οι σχεδιαστές του να λάβουν υπόψη, ώστε αυτό να καταστεί λειτουργικό, αποδοτικό και αξιόπιστο. Αναλυτικότερα αυτά παρουσιάζονται στις επόμενες τέσσερις υποενότητες.

### 2.2.1.1 Μεγέθη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Μερικά από τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τα οποία χαρακτηρίζουν ή διαμορφώνουν τα ασύρματα δίκτυα είναι:

- Η συχνότητα (frequency,  $f$ ), η οποία είναι ο ρυθμός με τον οποίο επαναλαμβάνεται το σήμα και μετριέται σε Hz. Ανάλογα με την συχνότητά τους τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα χαρακτηρίζονται και παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες.



Εικόνα 6: Συχνότητες και μήκη κύματος ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

- Το μήκος κύματος (wavelength,  $\lambda$ ), που είναι η απόσταση που καλύπτεται από το σήμα σε ένα πλήρη κύκλο του. Η τιμή της δίνεται από τον τύπο  $\lambda = \frac{c}{f}$  ( $c$ : ταχύτητα του φωτός, 300.000 Km/sec).
- Το φάσμα (spectrum), είναι η περιοχή συχνοτήτων που περιέχει ένα σήμα.
- Το σήμα βασικής ζώνης. Έτσι ονομάζεται το σήμα της πληροφορίας προς μετάδοση και συνήθως είναι σε χαμηλές συχνότητες.



- Το φέρον σήμα, το οποίο είναι το υψίσυγχο σήμα δια του οποίου μεταδίδεται το σήμα πληροφορίας.
- Το εύρος ζώνης (bandwidth, B). Με τον όρο αυτό αποκαλούμε το εύρος του φάσματος του σήματος, το οποίο μετράται σε Hz. Στην πράξη θεωρείται η περιοχή συχνοτήτων που παρέχεται το σύνολο σχεδόν (όση απαιτείται για την εκάστοτε εφαρμογή) της ισχύος του σήματος.
- Η ρυθμαπόδοση δεδομένων (throughput, C), που είναι ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας και μετράται σε bps (bits per second).
- Ο λόγος ισχύος σήματος προς την ισχύ του θορύβου (σηματοθορυβικός λόγος, Signal to Noise Ratio – SNR). Είναι ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος σήματος προς την ισχύ θορύβου και στην πράξη μας δείχνει πόσο δυνατότερο είναι το σήμα σε σχέση με τον θόρυβο. Είναι αδιάστατο μέγεθος και η τιμή του δίνεται από τον τύπο:

$$SNR = \frac{W_S}{W_N} \text{ (για πράξεις σε W)} \quad \text{ή} \quad W_S - W_N \text{ (για πράξεις σε dB)}$$

Η σχέση των τριών τελευταίων μεγεθών (εύρος ζώνης, ρυθμαπόδοση, SNR) δίνεται από το θεώρημα Shannon – Hartley ως κάτωθι (Πάλλης *et al.*, 2021):

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

### 2.2.1.2 Μοντέλα διάδοσης

Οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές υφίστανται απώλειες, οι οποίες οφείλονται σε διάφορους λόγους. Ορισμένες από τις απώλειες είναι σταθερές, ενώ άλλες δυναμικές (οι οποίες οφείλονται κυρίως στις καιρικές συνθήκες).

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ακολουθεί κάποια μοντέλα διάδοσης. Αυτά περιγράφουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλον ελεύθερο από εμπόδια (π.χ. δέντρα, βουνά, κτήρια κ.ο.κ.), περιβάλλον με εμπόδια και περιβάλλον επιφορτισμένο με H/M παρεμβολές. Εν συνεχεία θα



αναλυθούν τα μοντέλα διάδοσης καθώς επίσης θα πραγματοποιηθεί αναφορά και στις υπόλοιπες μορφές απωλειών.

Πίνακας 2: Απώλειες Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών (Capela, 2012).

<b>TRANSMISSION LOSSES</b>	<b>PROPAGATION LOSSES</b>	FREE SPACE LOSSES			
		ATMOSPHERIC LOSSES	Ionospheric effects	Faraday rotation Scintillation effects	
			Tropospheric effects	Attenuation	Rain attenuation
				Gas absorption	Depolarization
				Sky noise	
				Local effects	
		POINTING LOSSES			
	<b>LOCAL LOSSES</b>	EQUIPMENT LOSSES	Feeder losses		
		ENVIRONMENT LOSSES	?????		

α. **Ηλεκτρομαγνητικός Ορίζοντας (radar horizon).** Το μοντέλο αυτό μελετά την απόσταση «οπτικής επαφής» / ραδιοορίζοντα μεταξύ πομπού και δέκτη ή μεταξύ ραντάρ και στόχου, λαμβάνοντας υπόψη την καμπυλότητα της γης και την επίδραση της ατμόσφαιρας.

$$D_{max} = \sqrt{2kR_e}(\sqrt{H} + \sqrt{h}) \quad (1)$$

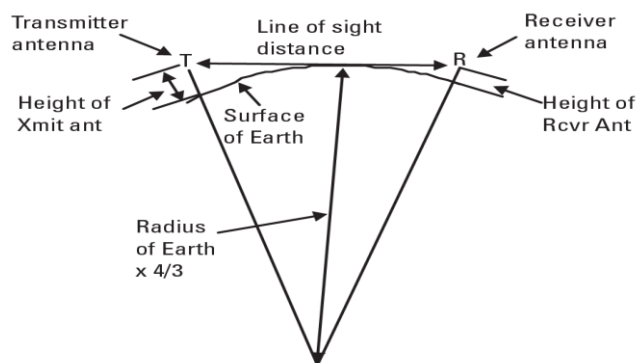
Όπου :

- $k = 4/3$  (συντελεστής καμπυλώσεως ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας λόγω ατμοσφαιρικής διαθλάσεως), με διακυμάνσεις γύρω από αυτή την τιμή αναλόγως των καιρικών συνθηκών
- $R_e = 6378 \text{ Km}$  - μέση ακτίνα Γής
- $H =$  Υψόμετρο ασυρμάτου πομπού / ραντάρ
- $h =$  Υψόμετρο ασυρμάτου δέκτη / στόχου

Ο τύπος αποδεικνύεται με την εφαρμογή του Πυθαγορείου θεωρήματος και ισχύει για διάδοση μεταξύ τηλεπικοινωνιακών ασυρμάτων πομποδεκτών ή για διάδοση μεταξύ ραντάρ και στόχου (βλέπε σχήμα) για όλες τις ζώνες συχνοτήτων, πλην της ζώνης HF όπου υπάρχει ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από

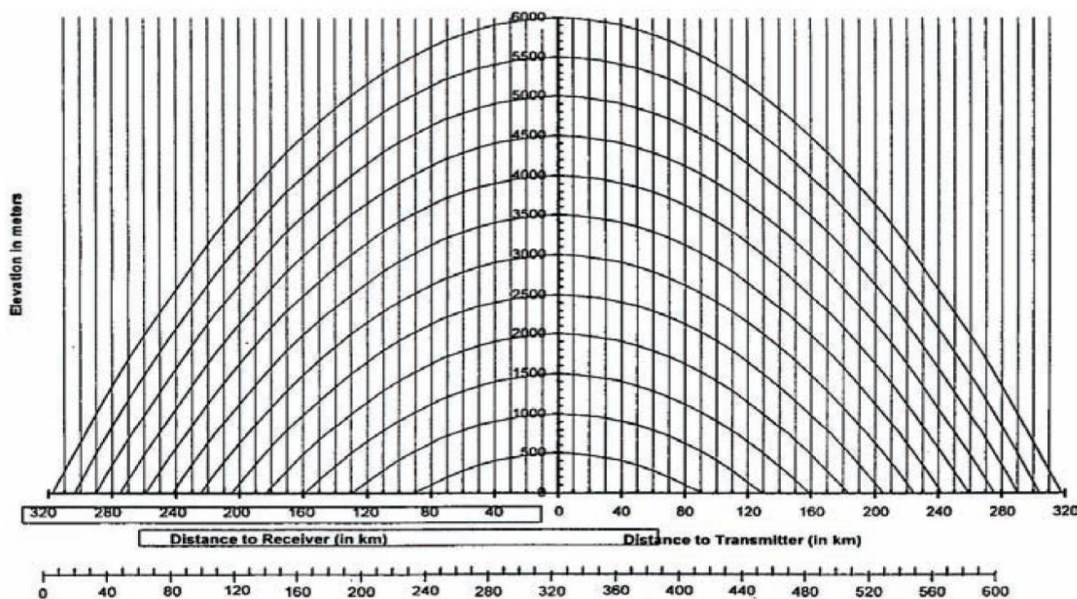


την ιονόσφαιρα. Εξάιρεση επίσης αποτελούν και τα φαινόμενα της επιφανειακής κυματοδότησης (ducting) και της τροποσκέδασης (troposcatter).



Εικόνα 7: Ηλεκτρομαγνητικός Ορίζοντας (Adamy, 2009).

Έχουν αναπτυχθεί διαγράμματα που διευκολύνουν τον άμεσο υπολογισμό (κατά προσέγγιση) των αποστάσεων αυτών. Στα διαγράμματα αυτά η ισοϋψής καμπύλες για το ύψος του πομπού και για το ύψος του δέκτη καταλήγουν σε μία τιμή απόστασης για το καθένα από αυτά, οι οποίες προστιθέμενες μας δίνουν την απόσταση του ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα για τα συγκεκριμένα ύψη.



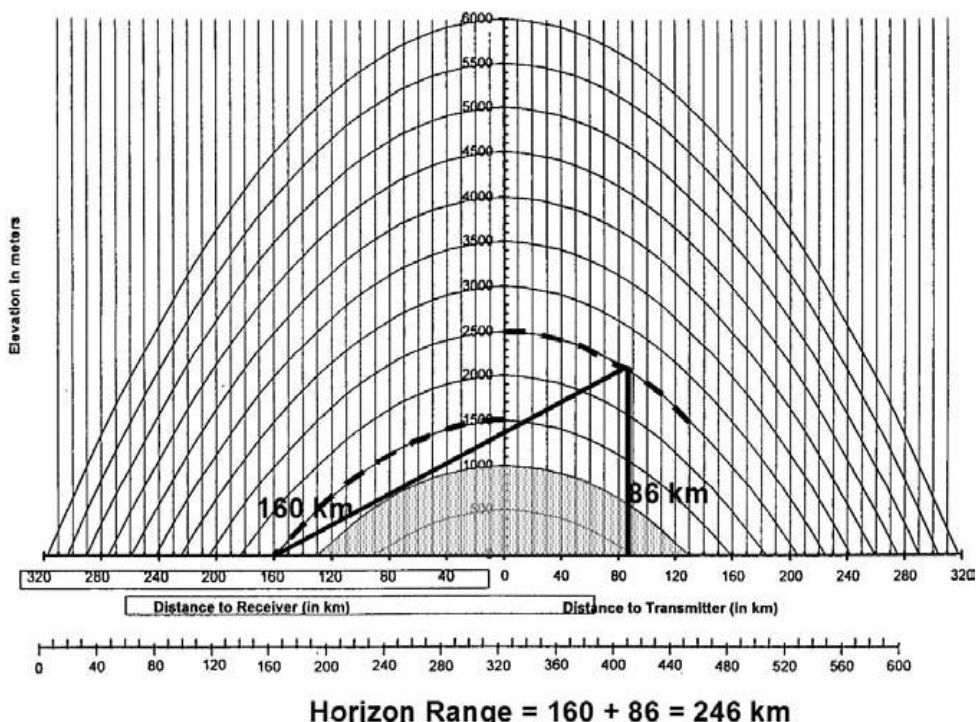
Εικόνα 8: Γράφημα υπολογισμού Ηλεκτρομαγνητικού Ορίζοντα (Adamy, 2009).



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση που στην καμπυλότητα της γης υπάρχουν εμπόδια (π.χ. βουνά, νησιά). Τότε για τον υπολογισμό του ορίζοντα δημιουργείται στο γράφημα ένα τρίγωνο το οποίο ορίζεται από το σημείο που η ισοϋψής του πομπού τέμνει τον άξονα των αποστάσεων, το σημείο στο οποίο το ευθύγραμμο τμήμα που ξεκινά από το σημείο τομής της ισοϋψούς του πομπού με τον άξονα των αποστάσεων και εφαπτόμενο στην ισοϋψή του εμποδίου τέμνει την ισοϋψή του δέκτη, και την προβολή του σημείου τομής της ισοϋψούς του δέκτη στον άξονα των αποστάσεων. Η πλευρά του τριγώνου που εφάπτεται στον άξονα των αποστάσεων (από το σημείο τομής της ισοϋψούς του πομπού με τον άξονα των αποστάσεων έως το σημείο της προβολής του σημείου τομής της ισοϋψούς του δέκτη στον άξονα των αποστάσεων) είναι ο ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας, όπως μπορούμε να δούμε και στο παράδειγμα που ακολουθεί (ύψος πομπού 1500m, ύψος δέκτη 2500m και ύψος εμποδίου 1000m) (Adamy, 2009).

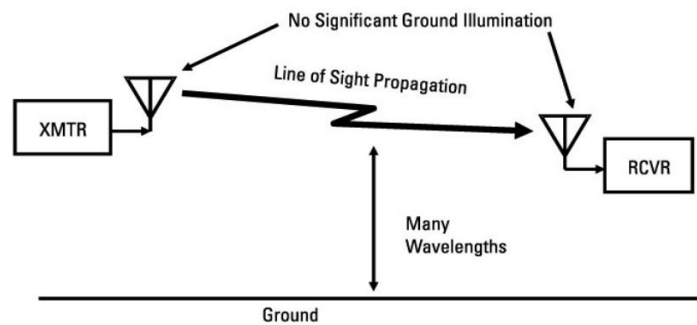


Εικόνα 9: Γράφημα υπολογισμού Ηλεκτρομαγνητικού Ορίζοντα με εμπόδιο (Adamy, 2009).





β. **Απώλειες ελεύθερου χώρου (Free space losses).** Το μοντέλο απωλειών ελεύθερου εφαρμόζεται σε πεδία, όπου στον χώρο μεταξύ του πομπού και του δέκτη δεν παρεμβάλλονται εμπόδια ή σημαντικές ανακλάσεις και το έδαφος βρίσκεται σχετικά μακριά από τον πομπό και τον δέκτη.



Εικόνα 10: Μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου (Adamy, 2009).

$$L(w) = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

Όπου:

R : Απόσταση μονοπατιού διάδοσης (m) (συναντάται και ως D, d)

$\lambda$  : Μήκος κύματος (m)

Ο τύπος προκύπτει μέσα από τη μελέτη των σημάτων κεραίας εκπομπής που εκπέμπονται ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις (ισοτροπική κεραία). Η σφαιρική αυτή εκπομπή ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός έως ότου φτάσει στην κεραία λήψης. Οι απώλειες υπολογίζονται διαιρώντας την επιφάνεια της σφαίρας ( $S = 4\pi R^2$ ) με την περιοχή λήψης της κεραίας ( $\frac{\lambda^2}{4\pi}$ ).

Αν μετατρέψουμε το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) σε συχνότητα (F) μέσω του τύπου της ταχύτητας του φωτός  $c = \lambda F$  ( $c = 3 \times 10^8$  m/sec), τότε ο παραπάνω τύπος (2) θα γίνει :

$$L(w) = \left(\frac{4\pi RF}{c}\right)^2 \quad (3)$$



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

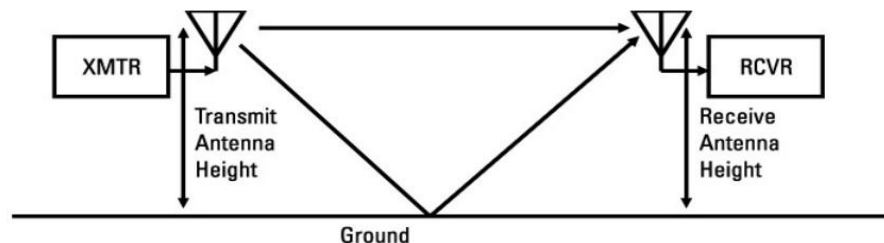
Αν η απόσταση εισαχθεί σε χιλιόμετρα (Km), η συχνότητα σε Megahertz (Mhz) και γίνουν οι απαραίτητοι μετασχηματισμοί, το τελικό αποτέλεσμα να εξαχθεί σε decibels (dB). Οπότε έχουμε :

$$L(dB) = 32,44 + 20 \log_{10} R + 20 \log_{10} F \quad (4)$$

Η σταθερά 32,44 προκύπτει από τη μετατροπή των  $\pi$  και  $c$  σε decibels (Adamy, 2009).

#### γ. Απώλειες διάδοσης δύο ακτίνων (Two ray propagation losses).

Όταν η κεραία εκπομπής ή η κεραία λήψης βρίσκεται κοντά σε μια ανακλώμενη επιφάνεια (π.χ. επίπεδο στάθμης της θάλασσας, έδαφος κ.ο.κ.) και το μοτίβο διάδοσης (radiation pattern) της κεραίας είναι αρκετά ευρύ, τότε το κυριότερο φαινόμενο απωλειών δημιουργείται από την άφιξη στο δέκτη δύο ηλεκτρομαγνητικών σημάτων ένα με απευθείας διάδοση του εκπεμπόμενου σήματος από τον πομπό στον δέκτη και ένα εξ ανακλάσεως. Η συμβολή των δύο αυτών σημάτων στον δέκτη (το ανακλώμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα που φτάνει στον δέκτη είναι ουσιαστικά το ίδιο σήμα με αυτό που διαδίδεται απευθείας, αλλά με διαφορά φάσης από αυτό) δημιουργεί ένα σήμα εξασθενημένο ως προς το σήμα απευθείας διάδοσης κατ' αναλογία με την διαφορά φάσης του από το ανακλώμενο σήμα (φαινόμενο ακυρωτικής συμβολής - phase cancelation). Αν αυτά τα δύο κύματα έχουν  $\Delta\phi = 180^\circ$  τότε έχουμε πλήρως ακυρωτική συμβολή και ο δέκτης ουσιαστικά δεν λαμβάνει σήμα, σε κάθε άλλη περίπτωση υπάρχει μερική απώλεια του σήματος.



Εικόνα 11: Φαινόμενο απωλειών διάδοσης δύο ακτίνων (Adamy, 2009).



Για τον προσδιορισμό των απωλειών αυτών χρησιμοποιείται το μοντέλο δύο ακτίνων, ως εξής :

$$L(dB) = 120 + 40 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(h_T) - 20 \log_{10}(h_R) \quad (5)$$

Όπου :

$d$  : Απόσταση πομπού / δέκτη

$h_T$  : Ύψος πομπού (m)

$h_R$  : Ύψος δέκτη (m)

Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, το αν πρέπει να χρησιμοποιείται το εν λόγω μοντέλο ή εκείνο των απωλειών ελεύθερου εξαρτάται από το ύψος πομπού / δέκτη και τη συχνότητα της ακτινοβολίας. (Adamy, 2009)

δ. **Ζώνη και έλλειψη Fresnel.** Ο Γάλλος φυσικός Augustin-Jean Fresnel (10 Μαΐου 1788 – 14 Ιουλίου 1827) μελέτησε οπτικά φαινόμενα. Λόγω της κυματικής φύσης του φωτός αποδείχτηκε στην συνέχεια ότι τα φαινόμενα αυτά παρουσιάζονται και στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (*Augustin-Jean Fresnel*, no date). Ένα από τα μοντέλα που ανέπτυξε αφορά στην απόσταση στην οποία το φαινόμενο ακυρωτικής συμβολής (phase cancellation) κυριαρχεί έναντι των απωλειών ελεύθερου χώρου σε περιβάλλον χωρίς εμπόδια και ονομάστηκε ζώνη Fresnel. Η απόσταση της ζώνης Fresnel δίνεται από τον τύπο :

$$FZ = \frac{4\pi H_t H_r}{\lambda} \quad (6)$$

Όπου :

$H_t$  : Ύψος Πομπού (Tx) (m)

$H_r$  : Ύψος δέκτη (Rx) (m)

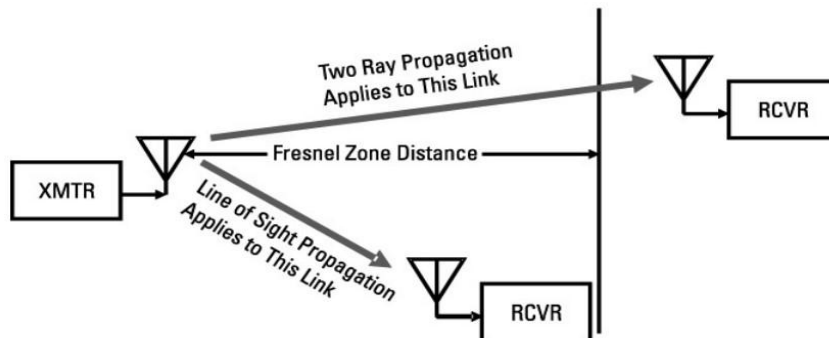
$\lambda$  : Μήκος κύματος εκπεμπόμενου σήματος (m)

Μετατρέποντας το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) σε συχνότητα ( $F$ ) μέσω του τύπου της ταχύτητας του φωτός  $c = \lambda F$  ( $c = 3 \times 10^8$  m/sec) και αντικαθιστώντας τις τιμές του  $\pi$  και  $c$ , τότε ο παραπάνω τύπος (6) θα δίνει την απόσταση της ζώνης σε χιλιόμετρα (Adamy, 2009) ως κάτωθι:





$$FZ = \frac{H_t H_r F}{24000} \quad (7)$$



Εικόνα 12: Ζώνη Fresnel (Adamy, 2009).

Η έλλειψη Fresnel είναι ένα ακόμη μοντέλο που αφορά στην απόσταση στην οποία το φαινόμενο ακυρωτικής συμβολής (phase cancellation) κυριαρχεί έναντι των απωλειών ελεύθερου χώρου σε περιβάλλον με εμπόδια. Η ακτίνα σε κάθε σημείο της έλλειψης από την διαδρομή του σήματος μεταξύ πομπού και δέκτη (R) δίνεται από τον τύπο της έλλειψης Fresnel:

$$R = \sqrt{\frac{n d_1 d_2 \lambda}{d_1 + d_2}} \quad (8)$$

Όπου :

$d_1$  : Απόσταση πομπού από εμπόδιο (m)

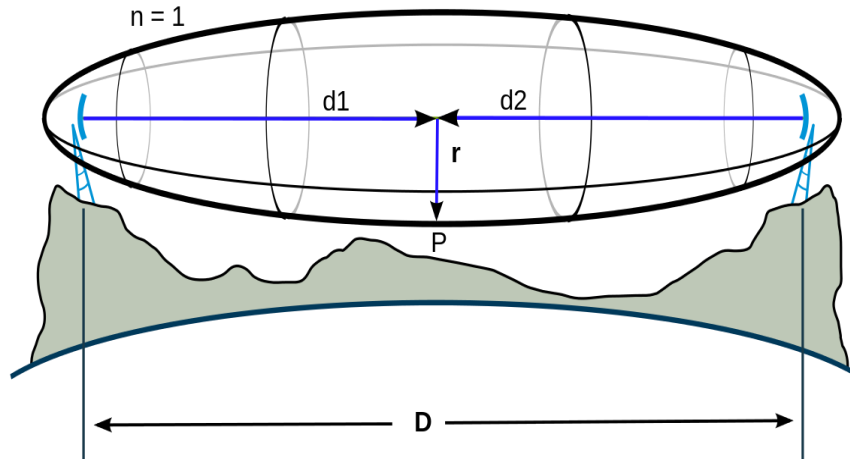
$d_2$  : Απόσταση δέκτη από εμπόδιο (m)

$\lambda$  : Μήκος κύματος εκπεμπόμενου σήματος (m)

$n$  : Αριθμός έλλειψης

Για την πρώτη έλλειψη ( $n=1$ ), αντικαθιστώντας το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) με τον τύπο της ταχύτητας του φωτός  $c = \lambda f$  ( $c = 3 \times 10^8$  m/sec) και για μέγιστη απόσταση R (στο κέντρο της έλλειψης όπου  $d_1 = d_2 = D$ ) σε μέτρα ο τύπος γίνεται (απόσταση D σε χιλιόμετρα και συχνότητα σε GHz).

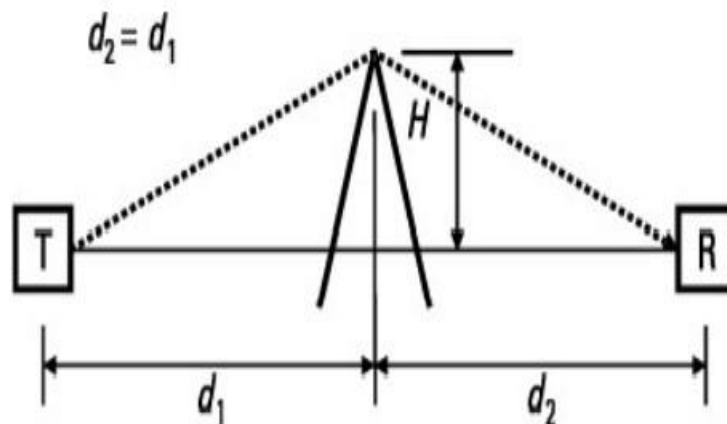
$$R = 17,31 \times \sqrt{\frac{D}{4f}} \quad (9)$$



Εικόνα 13: Έλλειψη Fresnel (Dancraggs, 2007).

Αν η πρώτη έλλειψη είναι κατά 80% ελεύθερη από εμπόδια, τότε οι απώλειες του εκπεμπόμενου σήματος υπολογίζονται με μοντέλο απωλειών ελεύθερου χώρου (Rappaport, 2002).

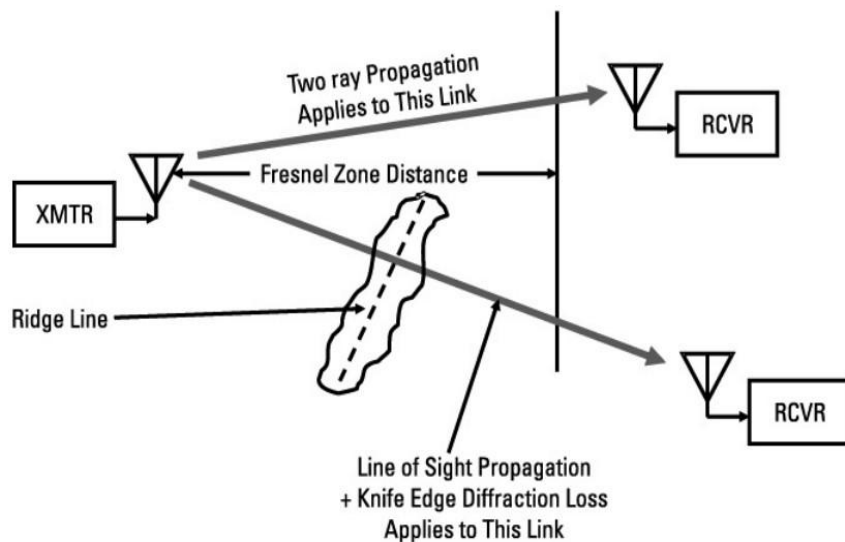
ε. **Περίθλαση από ευθεία ακμή (Knife – Edge Diffraction).** Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διέρχεται οριακά από ένα εμπόδιο. Τότε παρατηρείται η ελαφρά κύρτωση αυτής προς τον χώρο πίσω από το εμπόδιο (Adamy, 2009).



Εικόνα 14: Περίθλαση από ευθεία ακμή (γεωμετρικά στοιχεία) (Adamy, 2009)



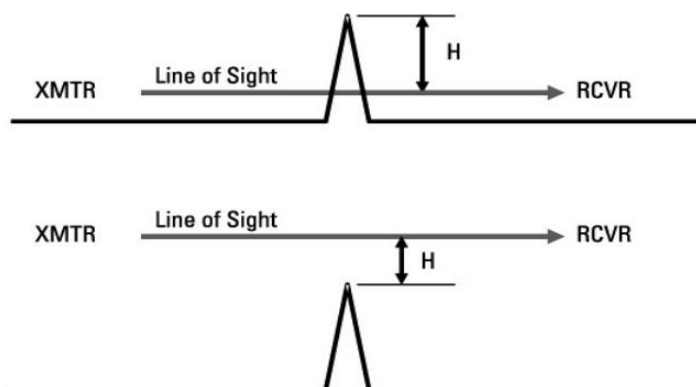
Για τη μελέτη του μοντέλου αυτού η απόσταση από την κορυφή της αιχμηρής επιφάνειας του εμποδίου έως την ευθεία διάδοσης με την παραδοχή ότι δεν υπήρχε η ακμή αυτή ορίζεται ως  $H$ . Η απόσταση του πομπού (T) έως την αιχμηρή επιφάνεια ονομάζεται  $d_1$  και αντίστοιχα η απόσταση από την τελευταία έως τον δέκτη (R)  $d_2$ . Βασική προϋπόθεση εφαρμογής του μοντέλου είναι οι δύο αυτές αποστάσεις  $d_1, d_2$  να είναι ίσες. Στην περίπτωση όπου ο δέκτης είναι πιο κοντά απ' ότι ο πομπός τότε δημιουργείται τυφλή ζώνη.



Εικόνα 15: Περίθλαση από ευθεία ακμή πέραν της ζώνης Fresnel (Adamy, 2009)

Η εξασθένιση του σήματος από το μοντέλο περίθλασης από ευθεία γραμμή προστίθεται σε εκείνο του απωλειών ελευθέρου χώρου σαν να μην υπήρχε το εν λόγω επιφορτισμένο περιβάλλον και εφαρμόζεται ακόμη και αν η απόσταση του πομπού από τον δέκτη είναι μεγαλύτερη της ζώνης Fresnel.

Έχει παρατηρηθεί επίσης πως η αιχμηρή επιφάνεια επιφέρει απώλειες ακόμα και όταν έχουμε ζεύξη οπτικής επαφής πολλά μήκη κύματος πάνω από την εν λόγω επιφάνεια. (Adamy, 2009)



Εικόνα 16: Περίθλαση από ευθεία ακμή (περιοχή εμφάνισης του φαινομένου) (Adamy, 2009)

στ. **Ατμοσφαιρικές απώλειες.** Αυτού το είδους οι απώλειες οφείλονται κυρίως στην απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, την ατμοσφαιρική εξασθένηση (atmospheric attenuation) και την ατμοσφαιρική απορρόφηση (atmospheric absorption). Η κύρια διαφορά τους είναι η προέλευση, καθώς η εξασθένηση οφείλεται στις καιρικές συνθήκες ενώ η απορρόφηση παρατηρείται και με αίθριο καιρό χωρίς νεφοκάλυψη.

Άλλη μία ομαδοποίηση των απωλειών της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παρατηρούνται λόγω της διέλευσής της από την ατμόσφαιρα της γης σχετίζεται με τα στρώματα της ατμόσφαιρας και είναι η κάτωθι:

(1) **Ιονοσφαιρικά φαινόμενα.** Αυτά λαμβάνουν χώρα στο ανώτερο στρώμα τις ατμόσφαιρας, την ιονόσφαιρα, στο οποίο υπάρχουν ιονισμένα σωματίδια (λόγω της ηλιακής δραστηριότητας). Το γεγονός αυτό έχει σημαντικές επιδράσεις στην διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Maini and Agrawal, 2011). Τα φαινόμενα που παρατηρούνται είναι:

- Αλλαγή πολικότητας εκπεμπόμενου σήματος κατά  $\Theta_F$  (Polarization rotation)



- Φαινόμενα ταλάντωσης (Scintillation effects)
- Απορρόφηση (Absorption)
- Τροποποίηση (Variation in the direction of arrival)
- Καθυστέρηση κατά τη διάδοση (Propagation delay)
- Διασπορά σήματος (Dispersion)
- Αλλαγή συχνότητας (Frequency change)

(2) Τροποσφαιρικά φαινόμενα. Είναι φαινόμενα που παρατηρούνται στην τροπόσφαιρα λόγω της σύστασής της. Αυτή αποτελείται από μόρια διαφορετικών ενώσεων, χαλάζι, σταγόνες βροχής και άλλα ατμοσφαιρικά αέρια. Τα ραδιοκύματα που περνούν από την τροπόσφαιρα επηρεάζονται σημαντικά από αυτά και υπόκεινται στα κάτωθι φαινόμενα (Maini and Agrawal, 2011) :

- Εξασθένηση κατά τη διάσχιση της τροπόσφαιρας (Attenuation)
- Εξασθένηση λόγω βροχής, και πιο συγκεκριμένα λόγω των σταγονιδίων (Rain attenuation)
- Απορρόφηση από ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας όπως N, O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O (Gas absorption)
- Πόλωση λόγω της διαφορετικής πόλωσης των κεραιών Tx και Rx (Polarization)

ζ. **Απώλειες ευθυγράμμισης (Pointing Losses).** Το είδος των απωλειών αυτών αφορά σε κεραιές εκπομπής / λήψης μεγάλης κατευθυντικότητας και προκαλούνται από μεγάλες αποκλίσεις ευθυγράμμισης της κεραιάς εκπομπής με αυτή της λήψης.

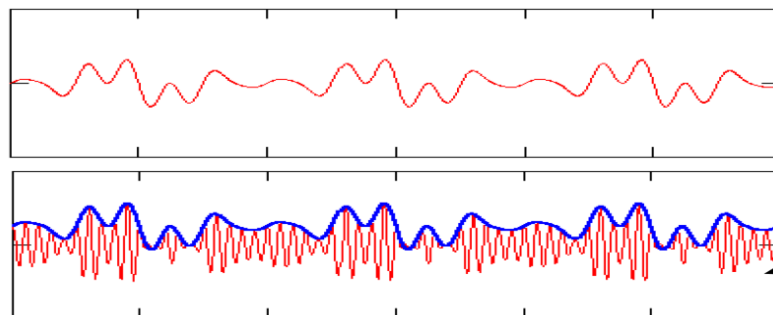
η. **Απώλειες Συστήματος.** Πρόκειται για απώλειες στα στοιχεία των κυκλωμάτων των συστημάτων, για θερμικές απώλειες των κυκλωμάτων (λευκός θόρυβος) και για απώλειες των κεραιών ( π.χ. feeder losses).



### 2.2.1.3 Διαμορφώσεις σημάτων

Σε ένα επικοινωνιακό σύστημα οι πληροφορίες προς μετάδοση μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα, η τιμή της συχνότητας του οποίου συνήθως είναι πολύ χαμηλή και δεν δύναται με την μορφή που έχει να διέλθει επιτυχώς και με χαμηλό κόστος από το δίκτυο επικοινωνιών. Για να ξεπεραστούν λοιπόν αυτά τα προβλήματα γίνεται χρήση μίας διαδικασίας που ονομάζεται διαμόρφωση, οπότε σε ένα υψίσυχνο σήμα, με κατάλληλα επιλεγμένη συχνότητα, μεταβάλλεται ένα ή περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του σύμφωνα με το σήμα πληροφορίας. Οι διαμορφώσεις χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το είδος του σήματος πληροφορίας (αναλογικό ή ψηφιακό), η κάθε μία από τις οποίες υποδιαιρείται σε άλλες ανάλογα με το μέγεθος του φέροντος σήματος που μεταβάλλεται κατά τη διαμόρφωση (πλάτος, συχνότητα, φάση). Τα είδη αναλυτικά είναι:

- α. Αναλογικές διαμορφώσεις:
- Διαμόρφωση πλάτους (Amplitude Modulation – AM). Είναι η απλούστερη αναλογική διαμόρφωση και σε αυτή η πληροφορία μεταβάλλει το πλάτος του φέροντος.



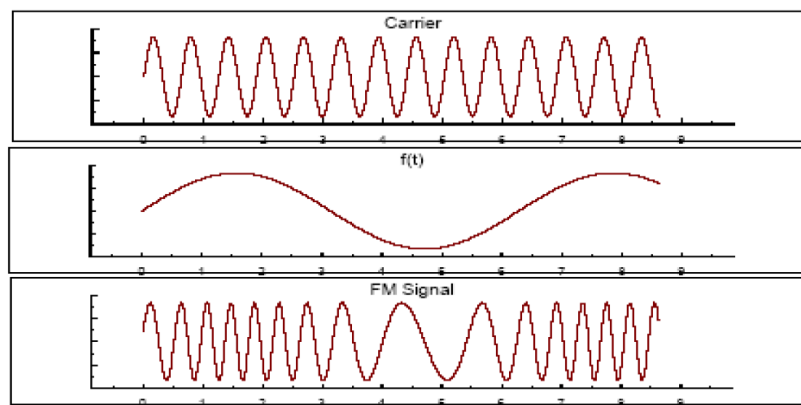
Εικόνα 17: Διαμόρφωση πλάτους (Πάλλης *et al.*, 2021)



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

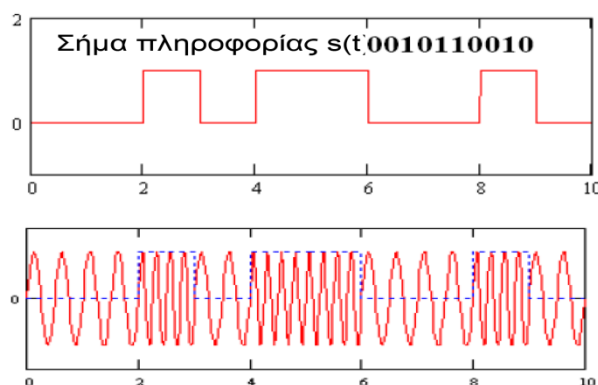
- Διαμόρφωση φάσης (Phase Modulation – PM). Σε αυτή το διαμορφωμένο σήμα, στα σημεία που επηρεάζεται από την πληροφορία, παρουσιάζει διαφορά φάσης σε σχέση με το φέρον σήμα.
- Διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation – FM). Αποτελεί την αναλογική διαμόρφωση που βελτιώνει περισσότερο από τις υπόλοιπες την επίδοση του συστήματος ως προς τον θόρυβο. Σε αυτή η πληροφορία μεταβάλλει την συχνότητα του φέροντος κύματος.



Εικόνα 18: Διαμόρφωση συχνότητας (Πάλλης *et al.*, 2021)

β. Ψηφιακές διαμορφώσεις:

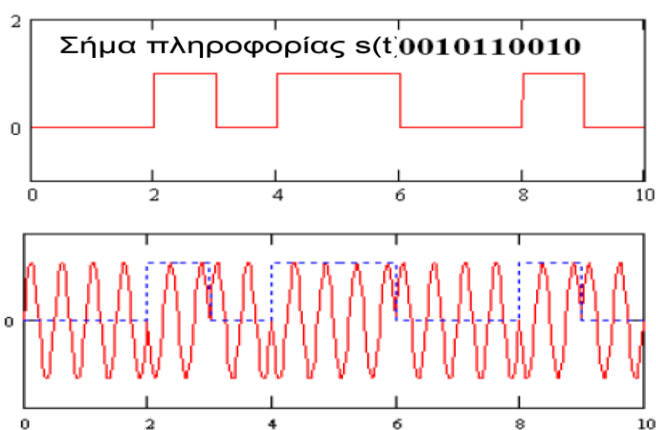
- Ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Shift Keying – FSK), όπου αντιστοιχεί μία τιμή συχνότητας για το λογικό 1 και μία άλλη για το λογικό 0.



Εικόνα 19: Ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας (Πάλλης *et al.*, 2021)

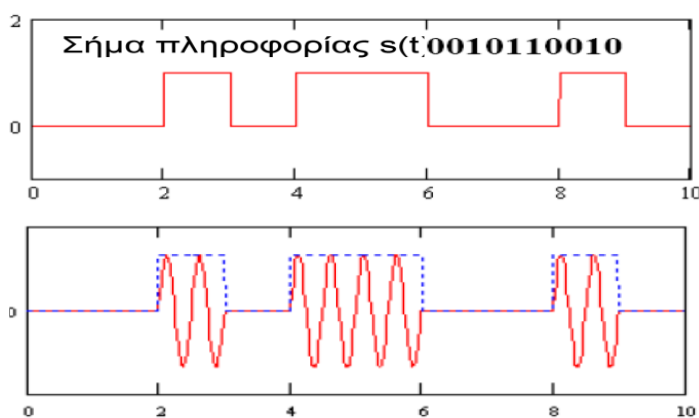


- Ψηφιακή διαμόρφωση φάσης (Phase Shift Keying – PSK). Το επηρεαζόμενο μέγεθος της φέρουσας σε αυτή τη διαμόρφωση είναι η φάση όπου αντιστοιχεί μία τιμή φάσης για το λογικό 1 και μία άλλη για το λογικό 0. Η συνεχής εξέλιξη της μεθόδου έχει οδηγήσει στην δημιουργία των τύπων QPSK (Quadrature PSK) και 8-PSK (Ο αριθμός μπροστά δηλώνει τον αριθμό των bits που μπορεί να μεταφέρει ανά σύμβολο).



Εικόνα 20: Ψηφιακή διαμόρφωση φάσης (Πάλλης *et al.*, 2021)

- Ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους (Amplitude Shift Keying – ASK). Στην διαμόρφωση αυτή αντιστοιχεί μία τιμή πλάτους για το λογικό 1 και μία άλλη για το λογικό 0.



Εικόνα 21: Ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους (Πάλλης *et al.*, 2021)





Με την χρήση αυτής της μεθόδου αναπτύχθηκε και άλλη πολυπλοκότερη τεχνική η τετραγωνισμένη διαμόρφωση πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation – QAM), η οποία επιτρέπει την αποστολή μεγαλύτερου αριθμού δεδομένων σε κάθε παλμό. Η συνεχής εξέλιξη της μεθόδου QAM έχει οδηγήσει στην δημιουργία των τύπων 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM, 512-QAM και 1024-QAM. Ο αριθμός μπροστά δηλώνει τον αριθμό των bits που μπορεί να μεταφέρει ανά παλμό (σύμβολο). Όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταδιδόμενων δεδομένων σε κάθε παλμό τόσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων της διαμόρφωσης, αλλά και το επίπεδο ευαισθησία του σήματος στον θόρυβο κάνοντας πολλές φορές απαγορευτική την χρήση διαμορφώσεων με πολύ υψηλό αριθμό μετάδοσης δεδομένων ανά παλμό (512-QAM και 1024-QAM) (Πάλλης *et al.*, 2021).

#### 2.2.1.4 Μηχανισμοί διόρθωσης σφαλμάτων

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα σφάλματα (παραμορφώσεις, διαλείψεις κ.α), κατά τη διαδικασία της εκπομπής, μεταφοράς και λήψεως των σημάτων σε ένα ασύρματο δίκτυο έχουν αναπτυχθεί οι κάτωθι τεχνικές:

α. Εμπρόσθια διόρθωση λαθών (Forward Error Correction – FEC), είναι μία τεχνική κατά την οποία προστίθεται ένας κώδικας πλεονάζουσας πληροφορίας σε κάθε πακέτο πληροφορίας που μεταδίδεται από τον πομπό, σύμφωνα με το οποίο παρέχεται η δυνατότητα στον δέκτη να εντοπίσει και να διορθώσει σφάλματα τα οποία έχουν συμβεί στην μετάδοση. Η συχνότερα χρησιμοποιούμενη κωδικοποίηση FEC είναι η Reed Solomon. (Πάλλης *et al.*, 2021)

β. Προσαρμοστική ισοστάθμιση (adaptive equalization). Εφαρμόζεται σε μεταδόσεις τόσο αναλογικής όσο και ψηφιακής πληροφορίας για την



καταπολέμηση του φαινομένου της διασυμβολικής παρεμβολής (διαταραχή σήματος, όπου ένα σύμβολο παρεμβάλλεται με τα επόμενα). Περιλαμβάνει την συλλογή και τον ανασχηματισμό της διασκορπισμένης ενέργειας των συμβόλων στο αρχικό χρονικό διάστημα, χρησιμοποιώντας είτε αναλογικά κυκλώματα, είτε πολύπλοκους αλγόριθμους. (Πάλλης *et al.*, 2021)

γ. Προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση (Adaptive Coding and Modulation – ACM). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην προγενέστερη γνώση της περιοχής εκπομπών σχετικά με την ποιότητα καναλιού εκπομπής (φαινόμενα διαλείψεων και ολίσθησης), ώστε ο πομπός αξιοποιώντας τες να τροποποιεί την διαμόρφωση και την κωδικοποίηση του εκπεμπόμενου σήματος ανάλογα (Πάλλης *et al.*, 2021).

δ. Διαφορισμός (diversity techniques) είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται για την μείωση του ρυθμού των σφαλμάτων κατά την επικοινωνία μεταξύ πομπού κα δέκτη χρησιμοποιώντας πολλά κανάλια μετάδοσης, στέλνοντας ένα μόνο τμήμα του σήματος από κάθε ξεχωριστό κανάλι. Οι παράγοντες που πρέπει να ισχύουν για να υπάρξει διαφορισμός είναι η ύπαρξη πολλών διαδρομών (καναλιών) μετάδοσης, ο χαρακτηρισμός της κάθε μίας από αυτές από ανεξάρτητες διαλείψεις και η ικανότητα επεξεργασίας των καναλιών αυτών προκειμένου να μειωθούν οι πιθανότητες διαλείψεων. Τα πολλαπλά σήματα που λαμβάνονται κατά τον διαφορισμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν, είτε επιλέγοντας από αυτά το καλύτερο (επιλεκτικός διαφορισμός – selection diversity), είτε συνδυάζοντας το καλύτερο με άλλα βελτιώνοντάς το (συνδιαστικός διαφορισμός – diversity combining). Ο διαφορισμός επίσης μπορεί να συνδυαστεί και με άλλες τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων. Τα τρία είδη του είναι (Πάλλης *et al.*, 2021):

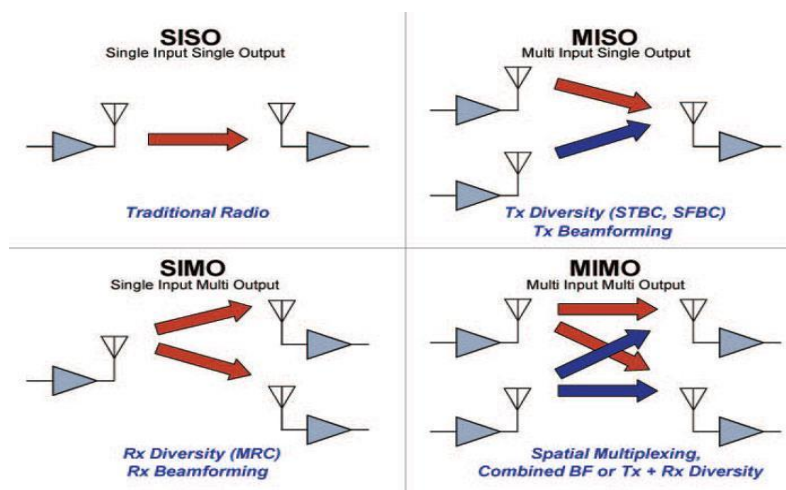
1) Διαφορισμός χρόνου (Time diversity), στον οποίο υπάρχει διασπορά των δεδομένων στον χρόνο στοχεύοντας στο δυνατόν μικρότερο



επηρεασμό από ριπές θορύβου. Με τον τρόπο όμως αυτό μειώνεται ο ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης.

2) Διαφορισμός χώρου (Space diversity) είναι το είδος του διαφορισμού στο οποίο η φυσική διαδρομή του επικοινωνιακού σήματος χωρίζεται σε πολλές διαφορετικές διαδρομές. Στην τεχνική αυτή απαιτείτε επιπλέον εξοπλισμός (κεραίες). Ανάλογα με τον τρόπο που τοποθετούνται οι κεραίες έχουμε:

- Διαφορισμό χώρου στον δέκτη (Receiver Space diversity ή Single Input Multiple Output - SIMO), όπου χρησιμοποιείται αριθμός διαφορετικών κεραιών στον δέκτη προκειμένου να συλλεχθούν ανεξάρτητα σήματα διαλείψεων.
- Διαφορισμό χώρου στον πομπό (Transmitter Space diversity ή Multiple Input Single Output - MISO), ορίζουμε την τεχνική όπου χρησιμοποιείται αριθμός διαφορετικών κεραιών στον πομπό προκειμένου να σταλούν ανεξάρτητα σήματα μέσα από ανεξάρτητα κανάλια στον δέκτη.
- Συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output – MIMO), στα οποία υπάρχουν πολλές κεραίες και στον πομπό και στον δέκτη και πολλές διαδρομές μετάδοσης. Στα συστήματα αυτά τα δεδομένα είτε κωδικοποιούνται και εκπέμπονται τα ίδια από πολλαπλές κεραίες (χωρικός διαφορισμός - spatial diversity) αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την ισχύ στο κανάλι εκπομπής, είτε η εκπομπή τους κατανέμεται μεταξύ πολλαπλών κεραιών (χωρική πολυπλεξία - spatial multiplexing) κερδίζοντας χωρητικότητα στο κανάλι εκπομπής η οποία είναι ανάλογη του αριθμού των κεραιών. Αποτελούν βασικό μέρος της τεχνολογίας του προτύπου IEEE 802.11 (Πάλλης *et al.*, 2021).



Εικόνα 22: Μορφές διαφορισμού χώρου (Πάλλης *et al.*, 2021)

3) Διαφορισμός συχνότητας (Frequency diversity), όπου το σήμα διασκορπίζεται σε ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων ή μεταφέρεται με πολλές φέρουσες συχνότητες. Τα σημαντικότερα παραδείγματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), κατά την οποία ένα σήμα διαχωρίζεται σε πολλές ροές χαμηλότερου ρυθμού δεδομένων. Αυτές μεταδίδονται μέσω φερουσών που είναι τοποθετημένες σε ισαπέχουσες συχνότητες. Η εξέλιξη της οδήγησε στην κωδικοποιημένη ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνοτήτων (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing - COFDM) (Proakis and Salehi, 2008)
- Η διασπορά φάσματος (Spread Spectrum – SS) μεταβάλλει ένα σήμα με τέτοιο τρόπο ώστε αυτό να έχει τουλάχιστον εκατονταπλάσιο εύρος ζώνης και χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος σε κάθε συχνότητα. Οι τεχνικές διασποράς φάσματος που χρησιμοποιούνται είναι η διασπορά φάσματος με αναπήδηση συχνότητας (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS), η διασπορά φάσματος άμεσης ακολουθίας (Direct Sequence Spread Spectrum –



DSSS) και η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Code division Multiple Access – CDMA) (Πάλλης *et al.*, 2021).

Οι τεχνικές διαφορισμού χώρου και διαφορισμού συχνότητας καθώς παρουσιάζουν αντοχή σε υποκλοπές, παρεμβολές και έχουν ιδιότητες που καθιστούν την εκπομπή δύσκολα ανιχνεύσιμη από τους αντιπάλους. Γι' αυτό βρίσκουν εφαρμογή σε αρκετά σύγχρονα επικοινωνιακά συστήματα που χρησιμοποιούνται στον τομέα της άμυνας. Η χρήση των τεχνικών αυτών μπορεί να είναι είτε μεμονωμένη, είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους (π.χ. OFDM - MIMO) (Li, Song and Liang, 2018).

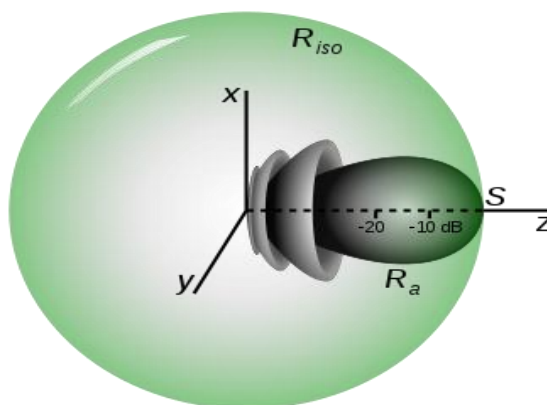
### 2.2.2 Διαχείριση ενέργειας

Ένας ακόμη τομέας στον οποίο δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα για την υλοποίηση δικτύων επικοινωνιών με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα είναι αυτός της διαχείρισης ενέργειας. Η ενέργεια που είναι διαθέσιμη για τον κάθε ιπτάμενο κόμβο του δικτύου είναι συγκεκριμένη και εξαρτάται πρωτίστως από το αερόχημα φορέα του κόμβου και δευτερευόντως από την ισχύ που καταναλώνει ο κόμβος. Για τις δυνατότητες εξέλιξης στα συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και διαχείρισης ενέργειας ενός ιπτάμενου μέσου δεν θα γίνει μνεία στην παρούσα μελέτη. Στον τομέα της διαχείρισης της ισχύος που καταναλώνει ένας επικοινωνιακός κόμβος, η ισχύς εκπομπής αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα, καθώς είναι ίσως το βασικότερο στοιχείο για την επίτευξη της επιθυμητής εμβέλειας για το εκπεμπόμενο σήμα, μπορώντας ωστόσο να δημιουργήσει και αρκετά προβλήματα, είτε στον τομέα της διαχείρισης ενέργειας του μη επανδρωμένου αεροσκάφους, είτε στην ασφάλεια και βιωσιμότητα του συστήματος.

Η επιστημονική κοινότητα προσπαθεί εδώ και καιρό να αναλύσει το πρόβλημα αυτό (Thibbotuwawa *et al.*, 2019) και να βελτιώσει την ενεργειακή κατανάλωση των κόμβων ενός εναέριου δικτύου αναπτύσσοντας αλγόριθμους για



λύσεις που βασίστηκαν στην ταυτόχρονη προσπάθεια βελτιστοποίησης της κατανομής ισχύος και της διαδρομής που εκτελούν τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Jiang *et al.*, 2018), στην επίτευξη της βέλτιστης ισχύος εκπομπής. (Li and Xu, 2018), στην βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων του δικτύου από τους χρήστες (Do-Duy *et al.*, 2021) και στην επιλογή σχήματος εκπομπής (Khan, Qureshi and Khanzada, 2019).



Εικόνα 23: Γεωμετρική απεικόνιση EIRP (πράσινη σφαίρα) με το μοτίβο μια συγκεκριμένης κεραίας.

Η ισχύς ( $P$ ) ως φυσικό μέγεθος συμβολίζει το ποσό της ενέργειας ( $dW$ ) που καταναλώνεται στη μονάδα του χρόνου ( $dt$ )  $P = \frac{dW}{dt}$ . Η μονάδα μέτρησής της είναι τα Watt (W). Στις επικοινωνίες για τον υπολογισμό της ισχύος των σημάτων συναντάμε τους όρους στιγμιαία ισχύς  $W(t) = x^2(t)$  και μέση ισχύς  $W_T = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt$ , και χρησιμοποιούμε ως μονάδα μέτρησης και τα decibel (dB). Όμως περισσότερο από τους παραπάνω όρους για την ισχύ, στη μελέτη των συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών, χρησιμοποιείται ο όρος της Ισοδύναμης Ισότροπα Ακτινοβολούμενης Ισχύος (Effective Isotropic Radiated Power - EIRP). Αυτή είναι η ισχύς που θα πρέπει να ακτινοβολεί μία υποθετική ισοτροπική κεραία, έτσι ώστε να λαμβάνει το ίδιο ακριβώς επίπεδο σήματος στην κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας μιας συγκεκριμένης κεραίας. Η τιμή της δίνεται από τον τύπο



$EIRP = Pt - L + G$  (Pt: ισχύς πομπού, L: απώλειες συστήματος, G: ενίσχυση κεραίας) (Πάλλης *et al.*, 2021).

Αρχικά η εκπεμπόμενη ισχύς θα έπρεπε να συμμορφώνεται με την υπάρχουσα νομοθεσία. Σύμφωνα με αυτή (Νόμος 4635/2016 – ΦΕΚ Α' 167/30-10-2019) για να μην απαιτείται αδειοδότηση για ένα σύστημα επικοινωνιών, η συνολική ιστροπική εκπεμπόμενη ισχύς EIRP δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 164W καθώς και η λαμβανόμενη ισχύς ανά κεραία του συστήματος δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2W (ΝΟΜΟΣ 4635/2019 (Κωδικοποιημένος) - ΦΕΚ Α 167/30.10.2019, no date).

Επίσης η διαχείριση της ισχύος εκπομπής αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα επιλογής. Ένας κόμβος ο οποίος μεταφέρεται από μη επανδρωμένο αεροχέιμα, τροφοδοτείται από την πηγή ενέργειας του αεροχήματος. Όσο καλύτερη διαχείριση γίνεται στις εκπομπές του, τόσο περισσότερη ενέργεια εξοικονομείται προς όφελος του αεροχήματος, γεγονός το οποίο συνήθως μεταφράζεται σε αύξηση του χρόνου παραμονής σε πτήση. Οπότε η μεγάλη ισχύ εκπομπής καταναλώνει πόρους από την ενέργεια του συστήματος κομβος – ΣμηΕΑ χωρίς να είναι ισάξιο το κέρδος σε εμβέλεια, όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια. Ως λύσεις σε αυτό το πρόβλημα έχουν προταθεί η διακοπή ή ελάττωση ισχύος εκπομπής όταν δεν υπάρχουν πληροφορίες προς μεταφορά, καθώς και η προσαρμογή της ισχύος εκπομπής ανάλογα με την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη.

### 2.2.3 Ευρωστία

Ως ευρωστία σε επικοινωνιακά συστήματα, ορίζεται η δυνατότητα που εξασφαλίζει ότι οι θεωρητικές επιδόσεις του οποιουδήποτε συστήματος, σύμφωνα με τον κατασκευαστή του, θα αποδίδονται αδιαλείπτως, εξασφαλίζοντας τη συνεχή και ασφαλή διεκπεραίωση των πληροφοριών που διακινούνται από αυτό. Από τον ορισμό αυτό γίνεται αντιληπτό ότι η ευρωστία περικλείει δύο άλλες έννοιες αυτές της αξιοπιστίας και της ασφάλειας, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.





### 2.2.3.1 Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία είναι ένα χαρακτηριστικό των συστημάτων το οποίο διασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία τους, αλλά και την γρήγορη αντιμετώπιση / επίλυση των προβλημάτων που παρουσιάζονται σε αυτά. Αναλυτικότερα αφορά στο επίπεδο ανθεκτικότητας του συστήματος ή ενός μεμονωμένου εξαρτήματός τους, τόσο σε φυσικό επίπεδο (αντοχή σε καιρικές συνθήκες, κραδασμούς, καταπόνηση), όσο και σε ψηφιακό (δυνατότητα διασύνδεσης και διαλειτουργικότητας με άλλα δίκτυα, αντοχή σε παρεμβολές οι οποίες προκαλούνται ακούσια από τη λειτουργία συσκευών), στη δυνατότητα αποκατάστασης / επιτυχούς αντιμετώπισης των προβλημάτων που παρουσιάζονται (αναδρομολόγηση επικοινωνίας σε περίπτωση απώλειας κάποιου κόμβου, ευκολία αντικατάστασης βεβλαμμένων εξαρτημάτων) και στην ύπαρξη εφεδρείας.

Για την πιστοποίηση των ανωτέρω δυνατοτήτων η διεθνής κοινότητα έχει θεσπίσει διαδικασίες και πρωτόκολλα. Πολλοί διεθνείς ή εθνικοί οργανισμοί, έχουν προβεί στην έκδοση τέτοιων πρωτοκόλλων / διαδικασιών. Οι σημαντικότεροι, σχετιζόμενοι με τα ασύρματα επικοινωνιακά δίκτυα είναι ο παγκόσμιος οργανισμός πιστοποίησης (International Standard Organization – ISO), η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission - IEC), η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – ITU-T), το Αμερικανικό Εθνικό Ίδρυμα Προτυποποίησης (American National Standards Institute – ANSI), το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE), τα πρότυπα του Υπουργείου Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (United States Defense Standard – MIL-STD) και τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Standard – EN).

Για την πιστοποίηση των φυσικών χαρακτηριστικών μιας επικοινωνιακής συσκευής υπάρχουν διάφορα πρότυπα με σημαντικότερα τα:





## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

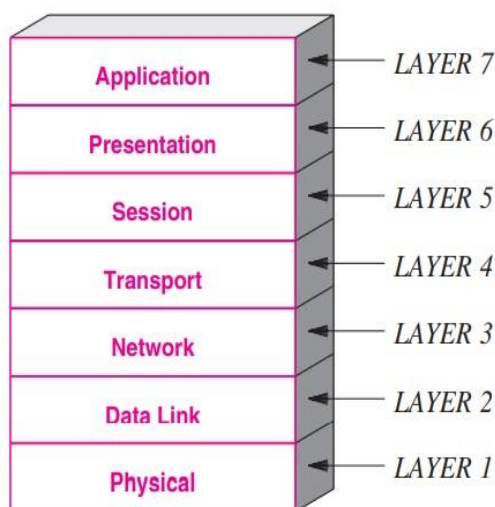
- ISO 9001, το οποίο διασφαλίζει την τήρηση των προβλεπόμενων διαδικασιών παραγωγής από το εργοστάσιο που θα παράγει τα εξαρτήματα ή την επικοινωνιακή συσκευή (*ISO - ISO 9001 and related standards — Quality management, 2021*).
- IEC / EN 60529, το οποίο είναι το διεθνές πρότυπο κατηγορία προστασίας. Με αυτό κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την προστασία εισόδου στερεών και υγρών, αλλά και με την αντοχή σε κρούση οι διάφορες συσκευές / εξαρτήματα (*IP ratings / IEC, no date*).
- MIL-STD-810, το οποίο πιστοποιεί για στρατιωτικές εφαρμογές την αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις (*Krdzalic, no date*).
- MIL-STD-461F, το οποίο πιστοποιεί για στρατιωτικές εφαρμογές την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) της συσκευής, ώστε να μην παρουσιάζονται ακούσιες παρεμβολές κατά τη λειτουργία της δίπλα σε άλλες συσκευές (*MIL-STD-461 F INTERFACE REQUIREMENTS CONTROL INTERFERENCE, no date*).

Αντίστοιχα όσον αφορά στα ψηφιακά χαρακτηριστικά, ένα αξιόπιστο επικοινωνιακό σύστημα, για δυναμικά δίκτυα υψηλής κινητικότητας, καλείται να διασφαλίσει την απρόσκοπτη λειτουργία του και την διασύνδεση και διαλειτουργικότητα με άλλες συσκευές ή με υπάρχοντα δίκτυα. Η λειτουργία των σύγχρονων επικοινωνιακών δικτύων, τα οποία μπορούν να μεταφέρουν βίντεο, εικόνα, ήχο και δεδομένα, βασίζεται στο μοντέλο αναφοράς διασύνδεσης ανοιχτών συστημάτων (Open Systems Interconnection model - OSI model). Κατά συνέπεια οι επικοινωνιακές συσκευές που το υλοποιούν θα πρέπει να υποστηρίζουν λειτουργίες του μοντέλου OSI με δυνατότητες αδιάλειπτης συνδεσιμότητας στα επίπεδα:

- Διασύνδεσης δεδομένων (data link layer – επίπεδο 2) (Seamless layer 2 network connectivity) προσφέροντας βέλτιστη απόδοση στην εσωτερική λειτουργία του δικτύου.



- Δικτύου (network layer – επίπεδο 3) για εφικτότητα διασύνδεσης με διάφορα απομακρυσμένα δίκτυα μέσω του διαδικτύου (Internet) ή άλλων ιδιωτικών δικτύων (Comer, 2015).



Εικόνα 24: Τα επίπεδα του μοντέλου OSI όπως ορίστηκαν από τον ISO (Comer, 2015).

Επιπλέον οι επικοινωνιακές συσκευές θα πρέπει να είναι συμβατές με το σύστημα ονοματοδοσίας / αριθμοδότησης που έχει καθιερωθεί για την αναγνώριση των συσκευών αυτών στα επικοινωνιακά δίκτυα και στο διαδίκτυο. Οι διευθύνσεις καθορίζεται σύμφωνα με το πρωτόκολλο IP (Internet Protocol) του οποίου είναι εν ισχύ η έκδοση 4 και 6 (IPv4 και IPv6). Πέραν αυτού, λόγω της δυναμικής φύσης των δικτύων που υλοποιούνται με μη επανδρωμένα αεροχήματα, ο κάθε κόμβος θα πρέπει να έχει δυνατότητες παροχής και ελέγχου των διευθύνσεων αυτών στο τμήμα του δικτύου που υποστηρίζει. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση στην συσκευή κατάλληλου διακομιστή DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol server), ώστε αυτή να δύναται αυτόματα να διανέμει διευθύνσεις IP εντός του δικτύου στους «πελάτες» (αισθητήρες, άλλοι κόμβοι) και να πραγματοποιεί τις κατάλληλες ρυθμίσεις λειτουργίας (διαμόρφωση της κατάλληλης μάσκας υποδικτύου, της προεπιλεγμένης πύλης και των πληροφοριών του διακομιστή



(server) για το συστήματος ονοματοδοσίας διαδικτύου (Domain Name System – DNS) στη συσκευή) (Comer, 2015).

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο η καταλληλότερη τοπολογία για τα δίκτυα επικοινωνιών που υλοποιούνται με μη επανδρωμένα αεροχήματα είναι η πλήρως κατανεμημένη ή τοπολογία πλέγματος (Mesh), ώστε να παρέχεται η δυνατότητα αναδρομολόγησης των δεδομένων σε περίπτωση απώλειας ενός κόμβου του δικτύου, με ότι συνεπάγεται αυτό για τις δυνατότητες των επικοινωνιακών συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν.

Ολοκληρώνοντας την αναφορά στις δυνατότητες που απαιτείται να έχουν οι συσκευές ενός επικοινωνιακού δικτύου ώστε να είναι αξιόπιστες, δεν πρέπει να παραλείψουμε την διανομή των δεδομένων των αισθητήρων που συνδέονται στο επικοινωνιακό κόμβο, σε πολλαπλούς τελικούς χρήστες. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση κατάλληλων αλγορίθμων για την πολλαπλή διανομή (multicast) των δεδομένων, ώστε να επιτυγχάνεται η αδιάλειπτη χρήση τους από όσους χρήστες επιθυμούν να έχουν πρόσβαση σε αυτά.

#### **2.2.3.2 Ασφάλεια**

Τα ασύρματα δίκτυα που υλοποιούνται μέσω μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων παρέχουν δυνατότητες διασύνδεσης με αυτά σε μία ποικιλία χρηστών και αισθητήρων, καθώς και σε άλλα δημόσια ή ιδιωτικά δίκτυα. Οι πληροφορίες που διακινούνται μέσα από αυτά, ιδίως στις περιπτώσεις της άμυνας και τη δημόσιας ασφάλειας, είναι ευαίσθητες και χαρακτηρίζονται τουλάχιστον ως εμπιστευτικές. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η συντήρηση της ασφάλειας μεταξύ αυτού του τύπου ανόμοιων χαρακτηριστικών κόμβων είναι μια μεγάλη πρόκληση. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται έχουν επισημανθεί (Wang *et al.*, 2018) (Krishna and Murphy, 2017) (Zhi *et al.*, 2020) και αφορούν κυρίως σε διάφορα είδη κυβερνο-επιθέσεων,



στην ασφάλεια στο φυσικό επίπεδο του δικτύου και σε απειλές από τους αισθητήρες και τις επικοινωνίες.

Για την ενίσχυση της ασφάλειας λαμβάνονται μέτρα σε δύο κατευθύνσεις. Αφενός στην ενσωμάτωση στις συσκευές κατάλληλα πιστοποιημένων υλικών και δυνατοτήτων και αφετέρου στη ασφαλή χρήση και εποπτεία των δικτύων κατά την λειτουργία τους.

Στον τομέα της χρήσης πιστοποιημένων υλικών και δυνατοτήτων, βιβλιογραφικά έχουν προταθεί λύσεις όπως χρήση αλγορίθμων αξιολόγησης - εμπιστοσύνης βασισμένους σε τεχνολογία Q-learning (Su, 2021), χρήση firewalls και κρυπτογράφησης (Li, Song and Liang, 2018) και τεχνικές επεξεργασίας σήματος (Carlson and Crilly, 2010). Για την κρυπτογράφηση των δεδομένων έχουν αναπτυχθεί από διεθνείς οργανισμούς κατάλληλα πρωτόκολλα που πιστοποιούν την το επίπεδο ασφαλείας των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων. Τα γνωστότερα από αυτά είναι:

- Advanced Encryption Standard (AES) σύμφωνα με το πρότυπο ISO/IEC 18033-3 ή και FIPS PUB 197 (U.S. National Institute of Standards and Technology), το οποίο πιστοποιεί το επίπεδο κρυπτογράφησης για προστασία πληροφοριών. Η κρυπτογράφηση AES-256 είναι η ασφαλέστερη στις μέρες μας, εξασφαλίζοντας μεταφορά πληροφοριών έως και επιπέδου άκρως απόρρητο (ISO/IEC 18033-1:2021(en), *Information security — Encryption algorithms — Part 1: General*, no date).
- Secure Hashing Algorithm (SHA) σύμφωνα με το πρότυπο ISO/IEC 18031:2011 ή και FIPS PUB 180-4 (U.S. National Institute of Standards and Technology), το οποίο πιστοποιεί το επίπεδο κρυπτογράφησης ελέγχου ταυτότητας μηνύματος πακέτου δεδομένων. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την τεχνική κρυπτογράφησης HMAC (Hash-based message authentication code) η οποία είναι ασφαλέστερη από οποιουδήποτε άλλη τεχνική



παραγωγής κωδικών ελέγχου ταυτότητας, καθώς εμπεριέχει τεχνικές κατακερματισμού και κώδικα ελέγχου ταυτότητας μηνύματος. Τα επίπεδα κρυπτογράφησης HMAC-SHA-384 και HMAC-SHA-512 είναι τα ασφαλέστερα, εξασφαλίζοντας μεταφορά πληροφοριών έως και επιπέδου άκρως απόρρητο (Dang, 2015).

- Ομάδα αλγορίθμων CNSA 2.0 (Cybersecurity Advisory, September 22) η οποία αντικαθιστά σταδιακά τη Suite – B (Hankerson and Menezes, 2011). Αυτές αποτελούν ομάδες αλγορίθμων (περιλαμβάνουν και τους προαναφερόμενους AES και SHA) οι οποίοι κρίνονται κατάλληλοι για διασφάλιση δεδομένων και διεργασιών υψηλής διαβάθμισης σύμφωνα με την Εθνική Υπηρεσία Ασφαλείας των ΗΠΑ (National Security Agency – NSA).

Η απόδοση όμως των επεξεργαστών γενικής χρήσης δεν μπορεί να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες των κρυπτογραφικών αλγορίθμων. Για το λόγο αυτό οι συσκευές που προορίζονται για κρυπτογράφηση διαθέτουν ειδικό επεξεργαστή (κρυπτογραφικό επιταχυντή), ώστε να εκτελούνται οι κρυπτογραφικές λειτουργίες, γρηγορότερα και πιο αποτελεσματικά.

Η τεχνολογία κρυπτογράφησης αυτή καθεαυτή αποτελεί από την φύση της ένα ευαίσθητο δεδομένο υψηλής διαβάθμισης, οπότε οι συσκευές που την ενσωματώνουν, πέραν της υψηλής φυσικής ασφάλειας, διαθέτουν λειτουργίες και τεχνολογίες οι οποίες δεν θα επιτρέψουν την διαρροή των ευαίσθητων αυτών δεδομένων και μηχανισμούς που θα αποτρέψουν τους εισβολείς να αποκτήσουν πρόσβαση σε αυτά. Τέτοιες λειτουργίες είναι:

- Over-the-Air Rekey, που παρέχει τη δυνατότητα ενημέρωσης / αλλαγής των κλειδών κρυπτογράφησης (Rekeying), σε ασφαλή συστήματα πληροφοριών, με τη μεταφορά των κλειδών μέσω κρυπτογραφημένων καναλιών ηλεκτρονικής επικοινωνίας (Over the air) διαμέσου του δικτύου.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

- Key Zero η οποία διαγράφει / μηδενίζει τις κρίσιμες παραμέτρους της κρυπτασφάλισης και των κρυπτογραφικών κλειδών σε περίπτωση πιθανής απώλειας ή αιχμαλωσίας του επικοινωνιακού κόμβου.

Για να προσδιοριστεί το επίπεδο ασφάλειας που παρέχει η κάθε συσκευή έχει καθιερωθεί από τον Αμερικάνικο οργανισμό προτύπων και τεχνολογίας η πιστοποίηση FIPS 140-2. Το πρότυπο αυτό για την κατηγοριοποίηση του επιπέδου ασφαλείας των συσκευών, λαμβάνει υπόψη τη φυσική ασφάλεια τους και τους μηχανισμούς που διαθέτουν για την αποτροπή των εισβολέων να αποκτήσουν πρόσβαση των κρίσιμων παραμέτρων της κρυπτασφάλισης που βρίσκονται εντός της κρυπτογραφικής μονάδας τους (Technology, 2002).

Άλλη μία τεχνολογική δυνατότητα που προσφέρει μεγαλύτερη ασφάλεια στις επικοινωνιακές συσκευές είναι η χρήση κατάλληλων διαμορφώσεων στα εκπεμπόμενα σήματα, ώστε να είναι δυσκολότερος ο εντοπισμός, η υποκλοπή και η παρεμβολή τους. Οι τεχνική που χρησιμοποιείται περισσότερο για το σκοπό αυτό είναι η διασπορά φάσματος (Spread Spectrum), η οποία επιτυγχάνεται με τεχνικές διαπίδωσης συχνοτήτων (Frequency Hopping), με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό αναπηδήσεων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ενεργοποίηση για πολύ μικρό χρόνο των καναλιών επικοινωνίας, καθιστώντας πολύ δύσκολό τον εντοπισμό των συχνοτήτων εκπομπής και του μοτίβου διαπίδωσης, ώστε να δημιουργηθεί από αντιπάλους κατάλληλο σήμα για να παρεμβάλει ή να μεταδώσει επιβλαβή δεδομένα στο δίκτυο. Σε συνδυασμό με την χαμηλή ισχύ εκπομπής το σήμα ως προς το χρόνο μοιάζει με θόρυβο, ο οποίος πάντοτε υπάρχει σε όλες τις επικοινωνιακές συσκευές, κάνοντας την εκπομπή πρακτικά μη ανιχνεύσιμη, καθώς ο εντοπισμός και μόνο της διεύθυνσης της εκπομπής θα πρόδιδε τη θέση του επικοινωνιακού κόμβου στους αντιπάλους (Li, Song and Liang, 2018).

Για την ασφαλή χρήση και εποπτεία των δικτύων κατά την λειτουργία τους έχουν προταθεί λύσεις όπως χρήση / ενεργοποίηση firewalls (Li, Song and Liang,



2018) και εφαρμογής κατάλληλης πολιτικής εκπομπών (Suojanen, 2018). Στην σύγχρονη εποχή η υπεροχή πληροφοριών, η οποία σχετίζεται με την ακρίβεια, την αξιοπιστία και εγκαιρότητά τους, επιτρέπει τη λήψη καταλληλότερων αποφάσεων σε όλους τους τομείς της χρήσης ασύρματων δικτύων. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την απαίτηση για δίκτυα επικοινωνιών συνεχώς ενεργά ώστε οι χρήστες τους να διαμοιράζονται συνεχώς πληροφορίες. Οι συνεχείς εκπομπές όμως δημιουργούν κενό ασφαλείας, καθώς εκθέτουν για μεγάλο χρονικό διάστημα το επικοινωνιακό σχήμα στον κάθε επιβουλέα, παρέχοντάς του τη δυνατότητα να προβεί σε ενέργειες (υποκλοπή, παρεμβολή, κυβερνο-επίθεση) που έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο επίπεδο ευπάθειας του συστήματος επικοινωνιών. Είναι λοιπόν σημαντικό από τους διαχειριστές του επικοινωνιακού συστήματος να εξασφαλίζεται η κατάλληλη πολιτική επικοινωνιών / εκπομπών (να παρέχονται σαφείς οδηγίες και να απελευθερώνονται οι κατάλληλες δυνατότητες), ώστε να χρησιμοποιούνται τα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα εκπομπών ραδιοσυχνοτήτων για τη μεταφορά της μέγιστης δυνατής πληροφορίας. Στις στρατιωτικές επικοινωνίες ιδιαίτερα, η μετάδοση πληροφοριών θα πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη λειτουργική ασφάλεια του δικτύου ενώ οι περιττές μεταδόσεις πληροφοριών περιορίζουν τη διεκπεραίωση του δικτύου, καθώς οι πόροι του φάσματος είναι συχνά κοινόχρηστοι και περιορισμένοι (Suojanen, 2018).



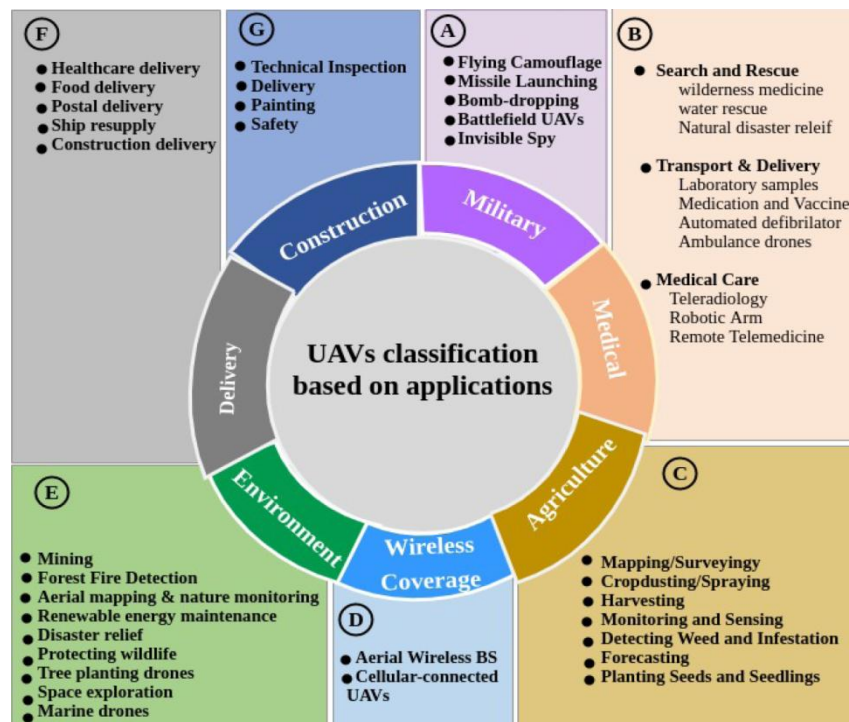


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

#### 3. Καθορισμός Αποστολής

Τα ασύρματα δίκτυα που υλοποιούνται με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, λόγω των αρκετών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών ενδεικτικά αναφέρονται οι έξυπνες πόλεις, η διαχείριση κυκλοφορίας, οι κατασκευές, οι μεταφορές, οι εφαρμογές στον τομέα της γεωργίας, οι περιβαλλοντικές εφαρμογές, οι εφαρμογές δημόσιας ασφάλειας και οι εφαρμογές άμυνας.



Εικόνα 25: Εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται UAV. (Pasandideh *et al.*, 2022)

Ειδικότερα σε εφαρμογές άμυνας ή / και ασφάλειας, όπου η ανάγκη για επικοινωνία προκύπτει από την απαίτηση για :

- ενημέρωση επί σημαντικών συμβάντων ή της εικόνας μιας κατάστασης,
- διευκόλυνση λήψης αποφάσεων στα υψηλότερα επίπεδα διοίκησης και μεταφορά εντολών στα κατώτερα επίπεδα,





- αναφορές από τα χαμηλότερα επίπεδα διοίκησης σε υψηλότερα επίπεδα,
- ενημερώσεις πληροφοριών μεταξύ παρόμοιων επιπέδων διοίκησης, ώστε να δημιουργηθεί μια πιο λεπτομερής εικόνα της κατάστασης σε τομείς ευθύνης (συνείδηση της κατάστασης και εμπλοκή),
- καθώς και για την έγκαιρη προειδοποίηση ξαφνικών αλλαγών στην περιοχή της αποστολής που ενδέχεται να μεταβάλλουν το σχέδιο επιχειρήσεων (προστασία).

Λόγω της σπουδαιότητας των ανωτέρω απαιτήσεων, αλλά και της ιδιαίτερης φύσης των αποστολών σε περιβάλλοντα άμυνας και ασφάλειας, απαιτούνται ειδικά τακτικά δίκτυα επικοινωνιών για τις ανάγκες των δυνάμεων που επιχειρούν, τα οποία δύναται να τους παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια και ευρωστία. Λαμβάνοντας όμως ως δεδομένα ότι τα σταθερά δίκτυα κορμού είναι σχεδόν αδύνατο να επεκταθούν (σε οποιαδήποτε τοποθεσία) στο πεδίο επιχειρήσεων, καθώς επίσης ότι μέρος τους είναι πιθανό να εξουδετερωθεί από εχθρικές ενέργειες, η δε αποκατάστασή τους απαιτεί αρκετό χρόνο, η επιλογή επικοινωνιών με χρήση προσωρινών ρελέ στον αέρα μεταξύ των μονάδων επικοινωνίας κερδίζει συνεχώς έδαφος ως βέλτιστη λύση.

Για να γίνει λοιπόν αντιληπτός ο τρόπος καθορισμού αποστολών, για ένα ασύρματο δίκτυο που υλοποιείται με μη επανδρωμένα αεροχήματα που επιχειρούν σε περιβάλλον άμυνας ή / και ασφάλειας, αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου οι λειτουργίες που ενδείκνυνται σε αποστολές, οι παράγοντες που δύναται να τις επηρεάσουν καθώς και η φιλοσοφία σχεδίασής τους.

### **3.1 Λειτουργίες που Εξυπηρετεί το Δίκτυο σε Περιβάλλοντα Άμυνας και Ασφάλειας.**

Στις μορφές των επιχειρήσεων που θα χρησιμοποιηθεί το εν λόγω δίκτυο (επιχειρήσεις σε περιβάλλον ασφάλειας και / ή άμυνας), οι σχέσεις μεταξύ των



εμπλεκόμενων δυνάμεων είναι ιεραρχικά δομημένες και αυστηρά καθορισμένες. Αυτό ως συνέπεια έχει την απαίτηση διαβίβασης / εκτέλεση συγκεκριμένων εντολών / λειτουργιών από το μελετώμενο δίκτυο, σύμφωνα με τη δομή διοίκησης των μονάδων / ομάδων που επιχειρούν. Επίσης την ανάθεση έργων και την κατανομή πόρων, από τη διοίκηση προς τα κατώτερα κλιμάκια, οι επικεφαλής των οποίων βρίσκονται στο θέατρο επιχειρήσεων, με σκοπό την επίτευξη των στόχων που αυτή έθεσε.

Από τα ανωτέρω συμπεραίνουμε ότι οι βασικές λειτουργίες της διοίκησης είναι η εντολή και ο έλεγχος (Command and Control - C2). Ο όρος εντολή αναφέρεται στο δικαίωμα ενός διοικητή να χρησιμοποιεί την εξουσία του για να δίνει εντολές στον οργανισμό για τον οποίο είναι υπεύθυνος. Είναι δηλαδή μια πράξη λήψης αποφάσεων. Ο έλεγχος είναι η εποπτεία των στόχων που δίνονται στα κατώτερα επίπεδα ενός οργανισμού για την αποστολή μαζί με τις εντολές αλλαγής τους ώστε να προσαρμόζονται στις διαμορφούμενες κάθε φορά συνθήκες. Αποτελεί την ανατροφοδότηση, από τα κατώτερα επίπεδα της οργάνωσης που υποστηρίζουν την εκτέλεση της αποστολής, υλοποιώντας τους στόχους του διοικητή. (Suojanen, 2018)

Τα συστήματα που αναπτύχθηκαν για να υποστηρίξουν τις ανωτέρω λειτουργίες μεταφέρουν πληροφορίες με τη μορφή δεδομένων, φωνής, εικόνων και βίντεο. Για να επιτευχθεί όμως αυτή η υπεροχή των πληροφοριών αυτών, απαιτείται συνεχής συλλογή, φιλτράρισμα, ταξινόμηση και ανάλυση δεδομένων, διάδοση και παράδοση αυτών καλύτερα, ασφαλέστερα και γρηγορότερα από τους αντιπάλους. Όπως γίνεται αντιληπτό η σημαντικότητα των λειτουργιών που επιτελεί το σύστημα C2 προϋποθέτει αξιοπιστία, ασφάλεια, προσαρμοστικότητα, ευελιξία και επεκτασιμότητα, υποστηρίζοντας παράλληλα την κινητικότητα των δυνάμεων, τη διαλειτουργικότητα, και τη σύνδεση με άλλα δίκτυα, παρέχοντας υπηρεσίες συνεχούς και αδιάλειπτης επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών χωρίς υπερβολικό κόστος (Frater and Ryan, 2001).



Η εξέλιξη της τεχνολογίας, οδηγεί στην ανάπτυξη συστημάτων για εκτέλεση πολυπλοκότερων επιχειρήσεων που σχετίζονται άμεσα με την ικανότητα C2. Οι ικανότητες των συστημάτων αυτών είναι οι κάτωθι και προσδιορίζονται από τις λειτουργίες:

- Εντολή, Έλεγχος και Επικοινωνίες (Command, Control and Communication – C3)
- Εντολή, Έλεγχος, Επικοινωνίες, Ευφυΐα, Επιτήρηση και Αναγνώριση (Command, Control, Communication, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance - C3ISR)
- Εντολή, Έλεγχος, Επικοινωνίες και Υπολογιστές (Command, Control, Communication and Computers - C4)
- Εντολή, Έλεγχος, Επικοινωνίες, Υπολογιστές, Ευφυΐα, Επιτήρηση, Απόκτηση Στόχων και Αναγνώριση (Command, Control, Communications, Computers, Information/Intelligence, Surveillance, Targeting Acquisition and Reconnaissance - C4ISTAR). (Suojanen, 2018)

### 3.2 Αποστολές: Μελέτη - Σχεδίαση

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών που υλοποιούνται με μη επανδρωμένα αεροχήματα και υποστηρίζουν τις λειτουργίες C2, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, χρησιμοποιούνται για εφαρμογές /αποστολές:

- μεταφοράς της εικόνας της επικρατούσας κατάστασης στις μονάδες που καλύπτουν την περιοχή επιχειρήσεων,



- συλλογής αναφορών κατάστασης από τις φίλιες δυνάμεις, την ανάλυση των πληροφοριών αυτών για την σύνθεση μιας βελτιωμένης εικόνας της επικρατούσας κατάστασης,
- λειτουργίας ως σταθμός αναμετάδοσης επικοινωνιών, εξασφαλίζοντας την εξομάλυνση των προκλήσεων που δημιουργεί το ανάγλυφο του εδάφους, μεταδίδοντας ήχο και δεδομένα σε διαδρομές Line of Sight (LoS),
- λειτουργίας ως πύλη για τη σύνδεση διαφορετικών συστημάτων επικοινωνιών (π.χ. διαφορετικά ασύρματα δίκτυα, δορυφορικό δίκτυο) (U.S. Army UAS Center of Excellence, 2010).

Για την βελτιστοποίηση του αποτελέσματος οι αποστολές αυτές θα πρέπει να μελετηθούν με μια ολιστική άποψη, καθώς η διαφορετικότητα των εναλλακτικών λύσεων πρέπει να προσαρμοστούν σε ένα μείγμα λειτουργιών που να ταιριάζει με την κατάσταση του πλαισίου των επιχειρησιακών σεναρίων που αναμένεται να αντιμετωπίσει ο οργανισμός, λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι το λειτουργικό περιβάλλον και η τεχνολογία αλλάζουν συνεχώς. Οι λύσεις αυτές πρέπει να προσομοιωθούν στο σύνολο των πιθανών σεναρίων που αντιπροσωπεύουν τα καθήκοντα της δύναμης, καθώς οι επιχειρήσεις σε περιβάλλοντα άμυνας και ασφάλειας απαιτούν προετοιμασία για το απροσδόκητο. Οι επικρατούσες τάσεις μελέτης και σχεδίασης των αποστολών αυτών είναι:

α. **Μελέτη – Σχεδίαση βάση απειλών.** Ο σχεδιασμός με βάση τις απειλές, βασίζεται στην αναγνώριση των πιο σημαντικών απειλών, υλοποιείται δε δημιουργώντας αντίμετρα και στρατηγικές μετριασμού των. Καλύπτει τις κρισιμότερες απειλές για τις επιχειρήσεις που αναλαμβάνονται, εστιάζοντας στην αντιμετώπιση πρωτογενών και δευτερευουσών απειλών. Δεδομένου ότι ο σχεδιασμός αυτός απαιτεί προσεκτική ανάπτυξη ικανοτήτων που ήδη χρησιμοποιούνται από οργανισμούς, μπορεί να παρέχει ισχυρές λύσεις σε γνωστές απειλές. Ωστόσο είτε οι εξελισσόμενες, είτε οι νέες απειλές μπορεί να



δημιουργήσουν προκλήσεις. Ως εκ τούτου, η σχεδίαση των αποστολών θα πρέπει να πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η ευκολότερη ενσωμάτωση νέων φιλοσοφιών ή τεχνολογιών που αναπτύσσονται για την αντιμετώπιση αυτών των απειλών.

β. **Μελέτη βάση ικανότητας – σεναρίου.** Η προσέγγιση αυτής της μελέτης και σχεδίασης αποστολών αναλύει την ικανότητα εκτέλεσης επιχειρήσεων βασιζόμενη στη μελέτη όλων των πιθανών σεναρίων μίας αποστολής. Η αξιολόγηση βάσει σεναρίων είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την περιγραφή των λειτουργικών περιβαλλόντων μακροπρόθεσμα. Στην καλύτερη περίπτωση, οι μέθοδοι που βασίζονται σε μελέτη σεναρίων απεικονίζουν σημαντικές πτυχές και απαιτήσεις για τον εξοπλισμό που λειτουργεί σε διαφορετικά λειτουργικά περιβάλλοντα. Ως εκ τούτου θα πρέπει να επικεντρωθεί στην αξιολόγηση των εναλλακτικών τεχνολογικών λύσεων για δυνάμεις που δεν έχουν σταθερή θέση ή συνεχή πρόσβαση σε ένα ασφαλές δίκτυο, καθώς και των δομών δυνάμεων που θα χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικά λειτουργικά περιβάλλοντα και των επιπτώσεων των διαφορετικών εναλλακτικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη διοίκηση των δυνάμεων αυτών. Ωστόσο ο αδυναμία κατανόησης από πλευράς μελετητών, κατά τον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, της παγκόσμιας κατάστασης, της διαθεσιμότητας πόρων, του επιπέδου των τεχνολογιών, του πολιτισμού, της κοινωνίας και των αλλαγών στον τρόπο ζωής τα επόμενα 20-30 χρόνια, ισοδυναμεί απώλεια του μακροπρόθεσμου οράματος. Σε αυτή την περίπτωση τα οικονομικά κόστη θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε δυσεπίλυτα προβλήματα τον οργανισμό. (Suojanen, 2018)

### 3.3 Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Σχεδίαση Αποστολών

Ανεξάρτητα από την φιλοσοφία της σχεδίασης που θα επιλεγεί για τις αποστολές, υπάρχουν παράγοντες που την επηρεάζουν. Οι παράγοντες αυτοί είναι οι δυνατότητες των υφιστάμενων τεχνολογιών σε θέματα επικοινωνιών και μη



επανδρωμένων αεροχημάτων, το φυσικό περιβάλλον, το κόστος, οι δυνατότητες υποστήριξης των αποστολών, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος των επιχειρήσεων και αναλύονται ως ακολούθως:

α. Οι δυνατότητες των υφιστάμενων τεχνολογιών σε θέματα επικοινωνιών και μη επανδρωμένων αεροχημάτων δύναται να επηρεάσουν με διάφορους τρόπους την σχεδίαση – εκτέλεση της επιχείρησης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί η μεταφορά των δεδομένων (ραδιοζεύξη, επικοινωνίες ορατού φωτός, σύνδεση RFID ή με φυσική σύνδεση τοπικά) μεταξύ επίγειων κόμβων και του αεροχημάτων, το είδος των κεραιών (πανκατευθυντική, μονοκατευθυντική) που χρησιμοποιούνται από τους κόμβους του δικτύου, ο χρόνος πτήσης των αεροχημάτων, η ενεργειακή χωρητικότητα των αεροχημάτων και η διαχείριση της, οι δυνατότητες / πόροι του δικτύου (εύρος ζώνης, ρυθμός ρυθμαπόδοσης δεδομένων, συχνότητα εκπομπής), καθώς και οι ικανότητες του υπολογιστικού και επικοινωνιακού συστήματος των αεροχημάτων.

β. Το φυσικό περιβάλλον στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η επιχείρηση, συμπεριλαμβανομένων των επικρατουσών καιρικών συνθηκών (επίπεδο υγρασίας, θερμοκρασία, βροχόπτωση) και του ανάγλυφου του εδάφους το οποίο θέτει περιορισμούς στο κανάλι επικοινωνίας, είτε λόγω της ύπαρξης εμποδίων φυσικών (λόφοι, βουνά) ή ανθρωπογενών (κτίρια).

γ. Το κόστος που απαιτείται για την απόκτηση των απαιτούμενων τεχνολογικών μέσων ή την κινητοποίηση αυτών. Οι συνήθως περιορισμένοι προϋπολογισμοί (συγκρινόμενοι με το κόστους κτήσης ή χρήσης των υλικών αυτών), οδηγούν στην προμήθεια μικρού αριθμού συστημάτων και κατ' επέκταση στη χρήση αυτών σε περισσότερες από μίας αποστολές.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

δ. Οι δυνατότητες υποστήριξης των αποστολών. Οι βασικοί παράγοντες που τις επηρεάζουν είναι:

- Η διαθεσιμότητα υποδομής σταθερών επικοινωνιών.
- Η διαθεσιμότητα συνδέσεων τακτικών δεδομένων σε επίγειες επικοινωνίες (αεροσκάφη, μη επανδρωμένες εναέριες πλατφόρμες, αερόστατα ή άλλες μορφές εναέριων σταθμών αναμετάδοσης).
- Το επίπεδο άμεσης ή έμμεσης απειλής για τις φίλιες δυνάμεις.
- Ο διαθέσιμος χρόνος για μετάδοση πληροφοριών σε άλλες μονάδες (προστασία).
- Η διαθεσιμότητα πλατφορμών που μπορούν να μεταφέρουν μηνύματα (αεροπορικές και χερσαίες πλατφόρμες) εκτιμώντας το επίπεδο κινδύνου και την κρισιμότητα των πληροφοριών.
- Η πιθανότητα μεταφοράς ασφαλών μηνυμάτων σε συγκεκριμένες τοποθεσίες όπου φίλιες μονάδες μπορούν να ανιχνεύουν και να διαβάζουν μηνύματα αυτά, συνυπολογιζόμενου του κινδύνου είτε να μην ανιχνευθούν από τις φίλιες δυνάμεις, είτε οι εχθρικές δυνάμεις να βρουν ή να αλλοιώνουν τα μηνύματα αυτά.
- Η πολιτική εκπομπών που θα ακολουθηθεί (πότε, πού και τι θα εκπεμφθεί) κατά τη χρήση του δικτύου.

ε. Τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος επιχειρήσεων, όπως:

- Η παρουσία ή μη, και το ποσοστό, μη εμπλεκόμενων με το περιστατικό πολιτών / αμάχων στο λειτουργικό / επιχειρησιακό περιβάλλον.
- Η δυνατότητα των τρομοκρατών / αντιπάλων να κρυφτούν ανάμεσα στο πλήθος και να εκτελούν τις επιχειρήσεις τους.





- Το επίπεδο πυκνότητας επικοινωνιών (Ο αριθμός των πραγματοποιούμενων ανά μονάδα χρόνου εκπομπών, σε όλο το εύρος του φάσματος).
- Η χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (πυκνότητα εκπομπών που δεν σχετίζονται υποχρεωτικά με περιστατικά ασφάλειας ή άμυνας).
- Η ευκολία ή μη εντοπισμού των επικοινωνιών των τρομοκρατών / αντιπάλων λόγω του υψηλού επιπέδου χρήσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.
- Το επίπεδο της απειλής διεξαγωγής ηλεκτρονικού πολέμου.
- Τα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης των ασυρμάτων επικοινωνιών στο περιβάλλον επιχειρήσεων.
- Η δυνατότητα επίτευξης ζεύξεων Line of Sight και η ασφάλεια των θέσεων του επικοινωνιακού εξοπλισμού.
- Το επίπεδο που η επίθεση σε υποδομές στο πεδίο επιχειρήσεων παρεμποδίζουν την κίνηση και τον εφοδιασμό του μονάδων του επικοινωνιακού δικτύου.
- Η δυνατότητα απόκρυψης πλατφορμών, κέντρων εντολών, άλλων βασικών μονάδων του δικτύου επικοινωνιών, καθώς των υπόλοιπων επιχειρησιακών μονάδων.
- Η δυνατότητα συνδεσιμότητας του δικτύου με άλλα δίκτυα που χρησιμοποιούνται από τις μονάδες που επιχειρούν (πχ. σταθερά στρατιωτικά δίκτυα, δίκτυα δορυφορικών επικοινωνιών, δίκτυα σωμάτων ασφαλείας κτλ)
- Η δυνατότητα εντοπισμού των UAV που υλοποιούν το δίκτυο επικοινωνιών.
- Η απόσταση από τα κέντρα εφοδιασμού και την δυνατότητα ασφαλούς μεταφοράς των απαιτούμενων κατά περίπτωση εφοδίων. (Suojanen, 2018)





#### 4. Δίκτυο Επικοινωνιών ΣμηΕΑ για Περιβάλλοντα Άμυνας και Δημόσιας Ασφάλειας

Η μελέτη και ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνιών που υλοποιείται κυρίως με συστήματα μη επανδρωμένων αεροχημάτων είναι μία διαδικασία που απαιτεί λεπτομερή ανάλυση των απαιτήσεων επικοινωνίας, των παραγόντων που επηρεάζουν τη λειτουργία του, ιδίως δε όταν το δίκτυο αυτό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές δημόσιας ασφάλειας και άμυνας, όπου οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας, αξιοπιστίας και ασφάλειας του δικτύου είναι ιδιαίτερα υψηλές.

Η μελέτη του δικτύου σε θεωρητικό επίπεδο θα ξεκινήσει με τον καθορισμό των απαιτήσεων και των αποστολών που θα χρειαστεί να υποστηρίξει το εν λόγω δίκτυο, θα συνεχιστεί με την μελέτη των τεχνικών παραμέτρων / πόρων αυτού και θα ολοκληρωθεί με την μελέτη του επιπέδου ασφαλείας που αυτό θα δύναται να παρέχει στους χρήστες του.

##### 4.1 Προτάσεις Αποστολών

Το μελετώμενο δίκτυο διαθέτοντας τις ελάχιστες δυνατότητες C2 (Εντολή και Έλεγχος), θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές μεταφοράς εικόνας της επικρατούσας κατάστασης στην περιοχή επιχειρήσεων, συλλογής αναφορών κατάστασης από τις φίλιες δυνάμεις, λειτουργίας ως σταθμός αναμετάδοσης επικοινωνιών, λειτουργίας ως πύλη για τη σύνδεση διαφορετικών συστημάτων επικοινωνιών. Ωστόσο για να επιλεγούν οι ακριβείς δυνατότητες του συστήματος θα πρέπει να μελετηθούν τα πιθανά σενάρια αποστολών για τις οποίες προορίζεται το συγκεκριμένο σύστημα, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.2.2 της παρούσης.

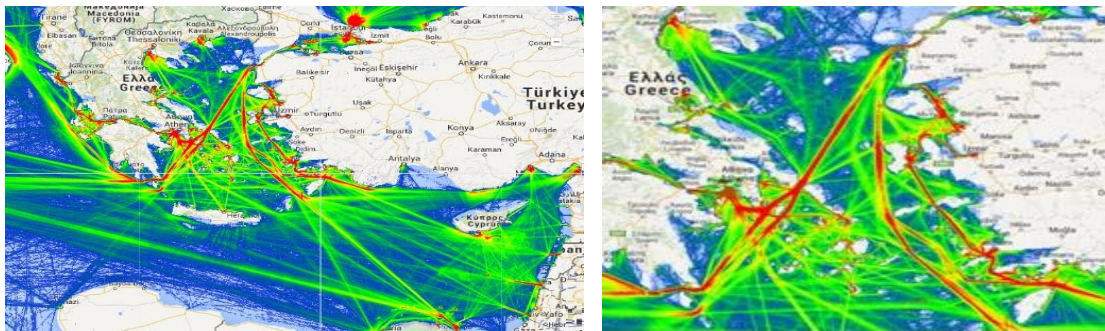
Η γεωστρατηγική θέση της Ελλάδας στην ανατολική Μεσόγειο, και η δεσπόζουσα θέση του Αιγαίου πελάγους αποτελεί σημαντικό κόμβο του διεθνούς εμπορίου, που το καθιστούν ζωτικής σημασίας ως προς τον έλεγχο του. Η απόκτηση εποπτείας των πλοίων που ταξιδεύουν στις Ελληνικές θάλασσες (κυρίως στο Αιγαίο)



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

καθώς και των θαλάσσιων γραμμών επικοινωνίας, λειτουργεί πολλαπλασιαστικά στη δημιουργία αναγνωρισμένης εικόνας στα διάφορα κέντρα επιχειρήσεων. Από τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτό ότι το βασικό σενάριο στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί το μελετώμενο δίκτυο είναι η επιτήρηση όλων των θαλασσιών οδών, είτε για λόγους άμυνας, είτε για λόγους δημόσιας ασφάλειας. Οι δυνατότητες του δίκτυο, το οποίο θα υποστηρίξει αυτή την αποστολή, θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο επιπέδου C3ISR, ενώ μέγιστη απαίτηση αποτελεί το επίπεδο C4ISTAR.



α. Ανατολική Μεσόγειος

β. Αιγαίο Πέλαγος

Εικόνα 26: Χάρτης πυκνότητας κυκλοφορίας ναυτιλίας.(*AEGEAN SEA Ship Traffic Live Map / Marine Vessel Traffic, no date*)

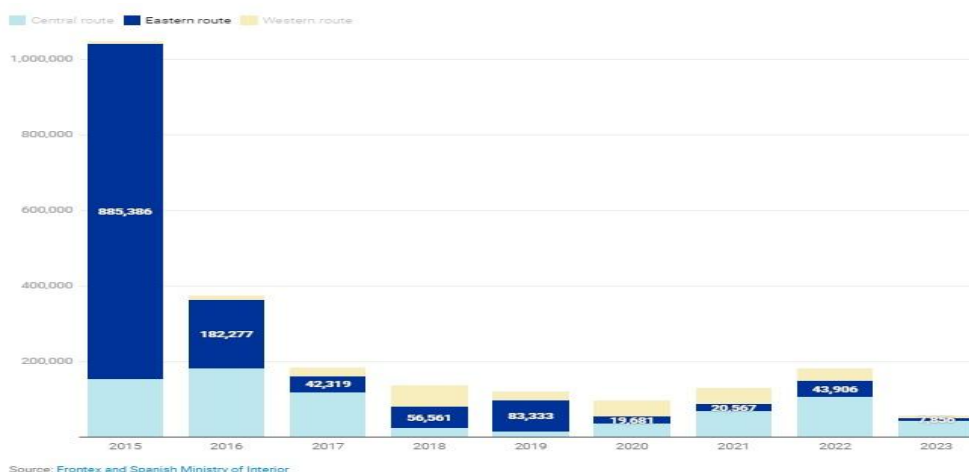
Η Ελλάδα αποτελείται από περισσότερα από 2.500 νησιά, περί τα 15.000 χιλιόμετρα ακτογραμμής, και περισσότερα από 2.000 χιλιόμετρα θαλασσιών συνόρων. Κατά συνέπεια ένα ακόμα σημαντικό σενάριο αποστολής, το οποίο θα κληθεί να υποστηρίξει το υπό μελέτη δίκτυο, είναι η επιτήρηση των θαλασσιών συνόρων της χώρας, δεδομένου ότι τα σύνορα της Ελλάδας αποτελούν ταυτόχρονα και τα ανατολικά σύνορα της Ευρώπης.

Την σπουδαιότητα της αποστολής αυτής συνεπικουρεί και η συνεχιζόμενη προσπάθεια παράνομης εισόδου προς την Ευρώπη ικανού αριθμού μεταναστών, ένα μεγάλο μέρος του οποίου διέρχεται από τα θαλάσσια σύνορα της χώρας μας (Easternroute). Οι δυνατότητες του δικτύου, που απαιτούνται για υποστήριξη αυτού του είδους των αποστολών είναι επιπέδου C3ISR.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



Εικόνα 27: Μεταναστευτικές ροές 2015 – 2023 (το μπλε χρώμα και τα νούμερα αφορούν Αιγαίο και ανατολική Μεσόγειο). (Migration flows: Eastern, Central and Western routes, 2023)

Ο έλεγχος του υδάτινου τμήματος της χώρας, εκτός από τις ανωτέρω εφαρμογές, αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην επιτυχή έκβαση επιχειρήσεων έρευνας και διάσωσης. Συνυπολογίζοντας την αύξηση των συμβάντων που οφείλονται στην παράνομη μετανάστευση, η μεταφορά εικόνας προς στα κέντρα επιχειρήσεων θα συμβάλει καθοριστικά στην καλύτερη επιτήρηση και οργάνωση των αποστολών αυτών. Για την υποστήριξη αυτών των αποστολών το δίκτυο επικοινωνιών πρέπει να έχει δυνατότητες επιπέδου C3I (Εντολή, Έλεγχος, Επικοινωνίες και Πληροφορία).

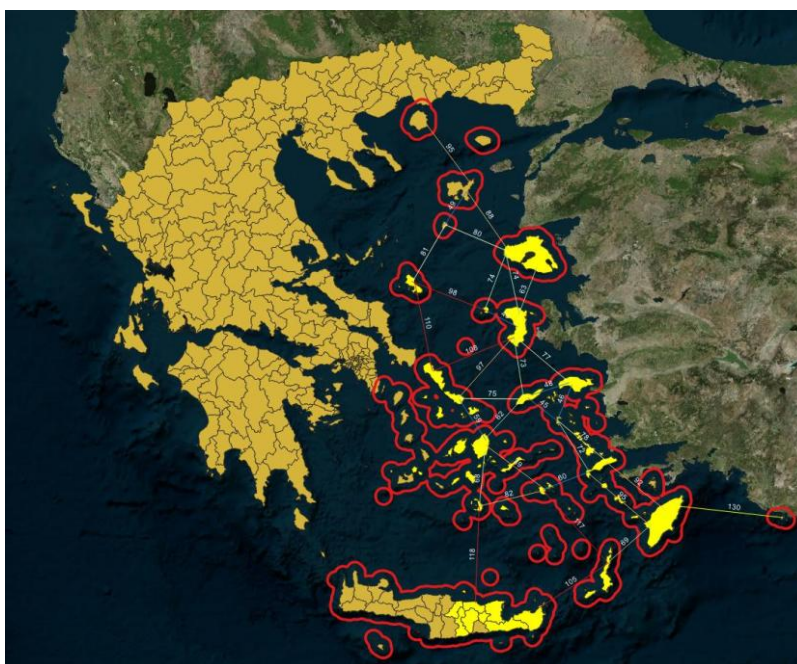


Εικόνα 28: Διασώσεις μεταναστών στη θάλασσα 2015 – 2023 (η επιχείρηση Poseidon αφορά Αιγαίο και ανατολική Μεσόγειο). (Lives saved in EU Mediterranean operations (2015-2023), 2023)

Προφανώς για να είναι αποτελεσματικές οι οποιασδήποτε μορφής επιχειρήσεις, θα πρέπει να παρέχεται συνεχής επικοινωνιακή κάλυψη ανεξάρτητα της γεωγραφικής περιοχής που λαμβάνουν χώρα οι επιχειρήσεις αυτές. Γεγονός το



οποίο είναι αρκετά δύσκολο να πραγματοποιηθεί σε όλο το εύρος της Ελληνικής επικράτειας με τα υπάρχοντα επικοινωνιακά δίκτυα. Οπότε ένα ασύρματο επικοινωνιακό δίκτυο υλοποιούμενο με μη επανδρωμένα αεροχήματα, μπορεί να προσφέρει γρήγορη, αξιόπιστη, χαμηλού κόστους και υψηλής ετοιμότητας λύση. Αναλόγως του είδους των επιχειρήσεων οι δυνατότητες του δικτύου υποστήριξης μπορεί να είναι από C2 έως και C4, με επικρατέστερη αυτή του C3.



Εικόνα 29: Χάρτης χωρικών υδάτων και αποστάσεων νησιών στο Αιγαίο.

#### 4.2 Επίπεδο Τεχνολογίας

Συγκρίνοντας όλες τις απαιτήσεις για τις δυνατότητες του δικτύου επικοινωνιών, όπως αυτές παρουσιάζονται στην ανάλυση αποστολών της προηγούμενης υποενότητας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι απαιτητές δυνατότητες θα πρέπει να είναι επιπέδου κατ' ελάχιστον C3ISR. Γίνεται δε αντιληπτό ότι από το εν λόγω δίκτυο θα διακινηθούν δεδομένα απλού κειμένου, ήχος, εικόνες και βίντεο υψηλής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, αυξάνοντας τις απαιτήσεις για ρυθμαπόδοση δεδομένων (throughput) σε μερικές δεκάδες Mbrps.



Δεδομένη πρέπει να θεωρείται επίσης και η δυνατότητα διασύνδεσης του δικτύου αυτού με άλλα δίκτυα, έτσι ώστε η πληροφορία που διακινείται απ' αυτό να καταλήγει στα κέντρα επιχειρήσεων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα του είναι η δυνατότητα διασύνδεσης μεγάλου αριθμού εναέριων κόμβων (μεγαλύτερος των εκατό), γεγονός το οποίο σε συνδυασμό με την ικανοποιητική εμβέλεια ζεύξης τους, θα εξασφαλίζει την πλήρη κάλυψη της γεωγραφικής περιοχής ενδιαφέροντος, αποβλέποντας στην κάλυψη ακόμη και ολόκληρου του Αιγαίου πελάγους. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι συσκευές που θα υλοποιήσουν το εν λόγω δίκτυο, θα φέρονται από μη επανδρωμένα αεροχήματα, το βάρος και το μέγεθός τους καθίσταται σημαντικός παράγοντας στην απόδοση του αεροχήματος. Καταλήγοντας, η διακίνηση διαβαθμισμένων πληροφοριών από το μελετώμενο δίκτυο δημιουργεί την απαίτηση για υψηλό επίπεδο ασφάλειας σε αυτό.

Από τις ανωτέρω απαιτήσεις, γίνεται αντιληπτό ότι το υπό μελέτη δίκτυο θα πρέπει να ανήκει στην κατηγορία ασυρμάτων mesh δικτύων (WMN), ώστε να παρέχει με ευκολία και αμεσότητα διασύνδεση μεγάλου αριθμού κόμβων επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα μεγάλες ταχύτητες ρυθμαπόδοσης δεδομένων. Η ανάπτυξη τέτοιων δικτύων σε παράκτια περιβάλλοντα είχε έως τώρα ως σκοπό την υποστήριξη της ναυτιλίας, με περιορισμένο όμως αριθμό εφαρμογών. Παρόλα αυτά υπάρχει αριθμός εταιριών, οι οποίες προσφέρουν επικοινωνιακές λύσεις για υλοποίηση τέτοιων δικτύων προσανατολισμένων σε εφαρμογές άμυνας και ασφάλειας, των οποίων τα προϊόντα μελετήθηκαν για το αναπτυσσόμενο δίκτυο και είναι οι κάτωθι:

- Airborne Innovations (<https://www.airborneinnovations.com/ai/>)
- Communication Security Technologies CST Advanced Systems (<https://cstindia.com>)
- Domo Tactical Communications - DTC (<https://www.domotactical.com/products/ip-mesh-solutions/>)
- IFLY (<https://www.hk-ifly.com/>)





- JVC (<http://pro.jvc.com/splash.jsp>)
- L3Harris Technologies (<https://www.l3harris.com/>)
- LinkAV Technology Co (<https://www.videowirelesstransmitters.com/>)
- Persistent Systems (<https://www.persistentsystems.com/>)
- Rajant Corporation (<https://rajant.com/>)
- Shanghai ZIZU Network Technology Co (<http://en.nexfi.cn/>)
- Shenzhen Safe Guard Co (<https://www.asmag.com/wirelessvideosender.co>)
- Silvus Technologies (<https://silvustechnologies.com/products/>)
- Sovereign Systems (<https://sovsys.co/>)
- Suntor Electronics Co (<https://www.hksuntor.com/ip-mesh-radio-solutions/>)
- TrellisWare Technologies (<https://www.trellisware.com/>)
- Triand RF Systems (<https://triandrf.com/>)

Για την άντληση της βέλτιστης επιλογής, ανάμεσα από την διαφορετικότητα λύσεων ή εναλλακτικών επιλογών που είναι διαθέσιμες στο εμπόριο, θα ακολουθήσει διεξοδική μελέτη έτσι ώστε να καλυφθούν πλήρως οι επιθυμητές δυνατότητες / χαρακτηριστικά για το υπό ανάπτυξη δίκτυο.

#### 4.3 Θεωρητική Μελέτη Τεχνικών Χαρακτηριστικών Δικτύου

Η ανάπτυξη δικτύου επικοινωνιών με τα χαρακτηριστικά τα οποία περιγράφηκαν προηγουμένως, έτσι ώστε να υποστηριχθούν επιχειρήσεις επιτήρησης συνόρων, θαλασσίων οδών, έρευνας και διάσωσης, καθώς και ειδικών δυνάμεων στη γεωγραφική περιοχή του Αιγαίου πελάγους, θα μελετηθεί σε θεωρητικό επίπεδο στην παρούσα υποενότητα. Για τον προσδιορισμό των προς μελέτη μεγεθών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κάτωθι:

- Όλα τα επικοινωνιακά συστήματα προς μελέτη χρησιμοποιούν τεχνολογίες διασποράς φάσματος και συγκεκριμένα συστήματα πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου (MIMO) τα οποία εφαρμόζουν τεχνικές χωρικής



πολυπλεξίας ή πολυπλεξίας διαίρεσης χώρου (spatial multiplexing) και ορθογώνιας πολυπλεξίας συχνότητας .

- Οι πληροφορίες που αφορούν στις ακριβείς συχνότητες εκπομπής, στον εφαρμοζόμενο ψευδοκώδικα εκπομπής και στο κόστος απόκτησης των συσκευών εμπίπτουν στο εταιρικό απόρρητο, αποτελώντας εμπορικό μυστικό των εταιριών, δεν υπάρχουν σε ανοιχτές πηγές και προφυλάσσονται από την νομοθεσία πνευματικής ιδιοκτησίας.

Κατά συνέπεια τα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να μελετηθούν είναι:

- Ο ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας (radar horizon)
- Η περιοχή συχνοτήτων εκπομπής (για τους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθεί η μεσαία τιμή της περιοχής συχνοτήτων)
- Η ισχύ εκπομπής
- Οι απώλειες του εκπεμπόμενου σήματος και ο θόρυβος, αναλόγως του εύρους ζώνης του σήματος και των χρησιμοποιούμενων διατάξεων κεραιών, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η λειτουργική απόστασης μεταξύ των κόμβων του (link budget),

#### 4.3.1 Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας (radar horizon)

Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές επικοινωνίας έχουν δυνατότητα ευθύγραμμης διάδοσης του σήματος (LoS). Για το λόγο αυτό η καμπυλότητα της Γης αποτελεί παράγοντα απώλειας της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του μελετώμενου δικτύου. Ο τύπος (1) του δεύτερου κεφαλαίου μας δίνει την απόσταση που συμβαίνει αυτό ανάλογα με τα ύψη των δύο κόμβων.

Η απόσταση αυτή μελετήθηκε θεωρώντας την επιφάνεια της Γής λεία, χωρίς εξογκώματα (βουνά, λόφους, νησιά). Σε περίπτωση εξογκώματος ο



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

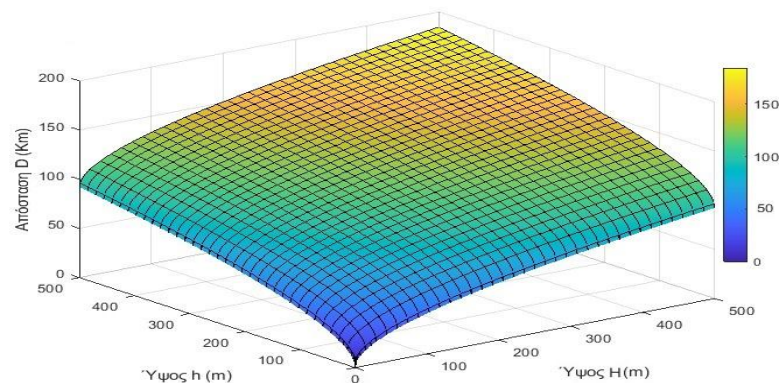
### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας μειώνεται και θα πρέπει να μελετηθεί ξεχωριστά για την κάθε περίπτωση. Η μελέτη εστίασε στα κάτωθι ύψη :

- α.  $H = 16\text{m}$  (ύψος ιστού περιπολικού σκάφους)
- β.  $H = 25\text{m}$  (ύψος ιστού φρεγάτας)
- γ.  $H = 200\text{m}$  (ύψος τυχαίου παρατηρητηρίου)
- δ.  $H = 420\text{m}$  (το σύνηθες ύψος πτήσης του UAV)
- ε.  $H = 600\text{m}$  (ύψος τυχαίου παρατηρητηρίου ή κορυφογραμμής στο Αιγαίο)
- στ.  $H = 1.000\text{m}$  (ύψος κορυφογραμμής στο Αιγαίο)

Πίνακας 3: Ηλεκτρονικός Ορίζοντας (RadarHorizon).

		Ύψος κόμβου (H)					
		16m	25m	200m	420m	600m	1.000m
Ύψος κόμβου (h)	16m	33.000m	37.117m	74.820m	101.014m	117.515m	146.911m
	25m	37.117m	41.241m	78.944m	105.139m	121.639m	151.035m
	200m	74.820m	78.944m	116.646m	142.842m	159.342m	188.738m
	420m	101.014m	105.139m	142.842m	169.037m	185.537m	214.933m
	600m	117.515m	121.639m	159.342m	185.537m	202.038m	231.433m
	1.000m	146.911m	151.035m	188.738m	214.933m	231.433m	260.829m



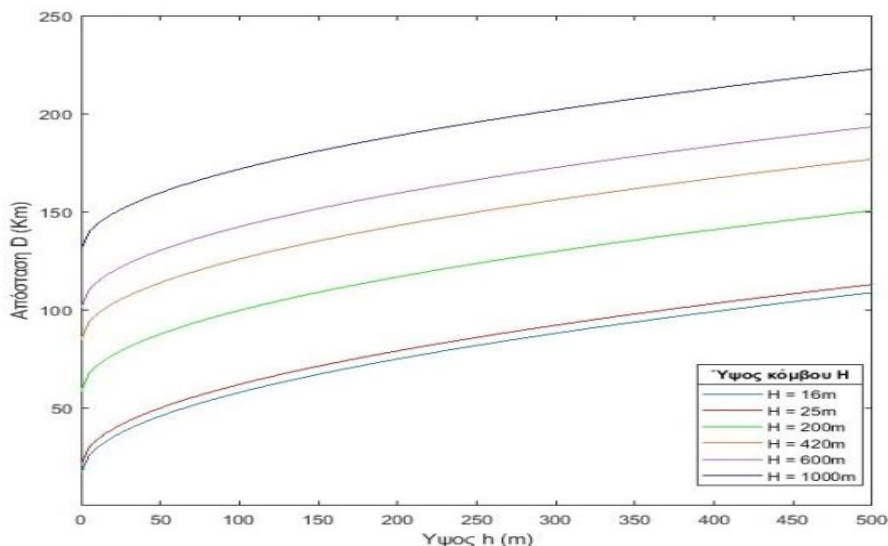
α. Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας συναρτήσει ύψους των 2 κόμβων





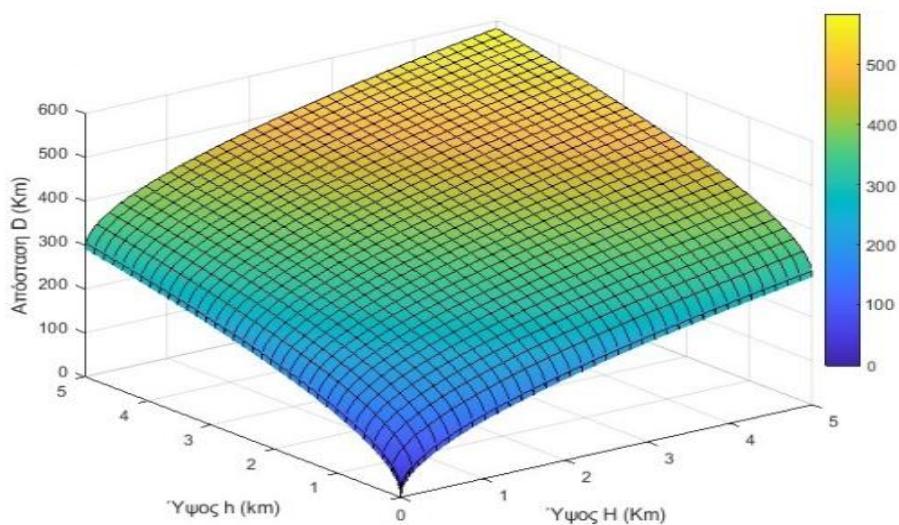
## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

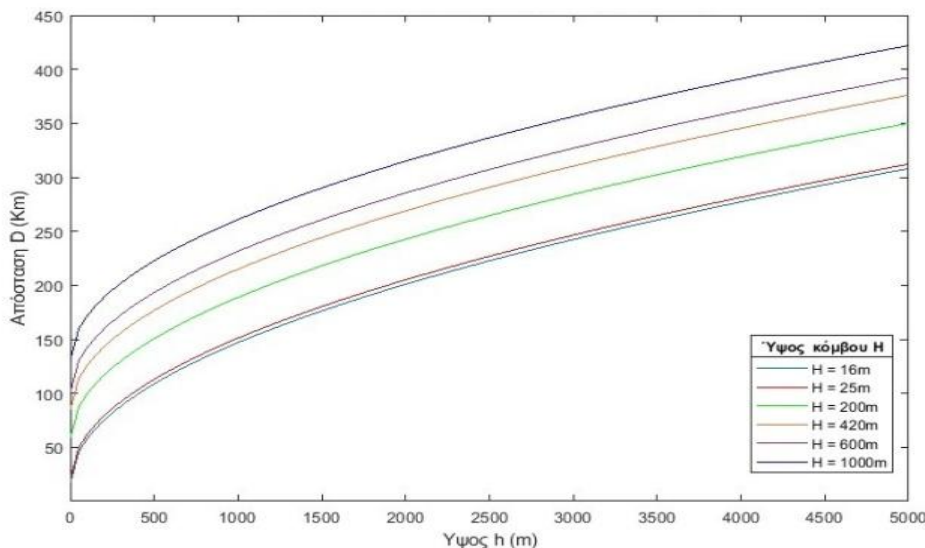


**β. Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας συναρτήσει ύψους του 1 κόμβου**  
Διάγραμμα 1: Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας για ύψη κόμβων από 0 έως 500m

Εξ αυτών απορρέει ότι ο ελάχιστος ηλεκτρονικός ορίζοντας (οι δύο κόμβοι σε ιστό περιπολικού σκάφους) υπολογίστηκε σε απόσταση  $D_{max}=33\text{Km}$ , ο μέγιστος (και οι δύο κόμβοι σε κορυφογραμμή στο Αιγαίο) σε απόσταση  $D_{max}=260,8\text{Km}$ , ενώ για συνήθης αποστολές η απόσταση μεταξύ δύο εναέριων κόμβων είναι  $D_{max}=169\text{Km}$ .



**α. Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας συναρτήσει ύψους των 2 κόμβων**



β. Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας συναρτήσει ύψους του 1 κόμβου  
Διάγραμμα 2: Ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας για ύψη κόμβων από 0 έως 5000m

#### 4.3.2 Περιοχή συχνοτήτων εκπομπής (frequency band)

Οι διατιθέμενες επικοινωνιακές συσκευές έχουν δυνατότητα να εκπέμπουν σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων, κυρίως στις L (1 – 2 GHz), S (2 – 4 GHz), C (4 – 8 GHz), και κάποιες στην περιοχή UHF (300 MHz - 1 GHz). Για την επιλογή του κατάλληλου επικοινωνιακού συστήματος είναι επιβεβλημένη η επιλογή της περιοχής συχνοτήτων στην οποία θα εκπέμπει το εν λόγω δίκτυο. Η επιλογή αυτή εξαρτάται από τις απώλειες του εκπεμπόμενου σήματος, ανάλογα με την συχνότητα εκπομπής, καθώς και τη δυνατότητα ρυθμαπόδοσης δεδομένων στο δίκτυο.

Για να μελετηθούν οι απώλειες του εκπεμπόμενου σήματος, θα πρέπει να επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο διάδοσης. Το μέγεθος που μας καθορίζει την επιλογή αυτή είναι τη ζώνη Frenzel. Εάν η απόσταση μεταξύ των κόμβων είναι μικρότερη της τότε για τον υπολογισμό θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο απωλειών ελεύθερου χώρου (free space propagation loss), σε διαφορετική περίπτωση θα γίνει χρήση του μοντέλου two-ray propagation model. Ο υπολογισμός της θα πραγματοποιηθεί με την χρήση της ισότητας (6) του κεφαλαίου 2,



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

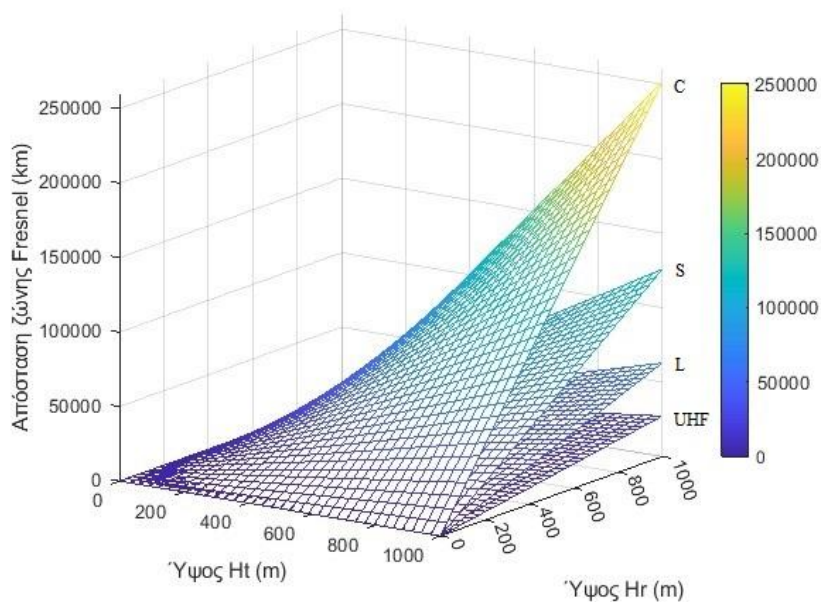
### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

$$FZ = \frac{4\pi H_t H_r}{\lambda}$$

για ύψη από 0 έως 5000 μέτρων (λόγω περιορισμών στον εναέριο χώρο), με εκτενέστερη μελέτη για τα κάτωθι ύψη:

- α.  $H=16\text{m}$  (ύψος ιστού περιπολικού σκάφους)
- β.  $H = 25\text{m}$  (ύψος ιστού φρεγάτας)
- γ.  $H = 200\text{m}$  (ύψος τυχαίου παρατηρητηρίου)
- δ.  $H = 420\text{m}$  (το σύνηθες ύψος πτήσης του UAV)
- ε.  $H = 600\text{m}$  (ύψος τυχαίου παρατηρητηρίου ή κορυφογραμμής στο Αιγαίο)
- στ.  $H = 1.000\text{m}$  (ύψος κορυφογραμμής στο Αιγαίο)

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα.



Διάγραμμα 3: Σύγκριση ζώνης Fresnel για συχνότητες UHF, L, S και C.

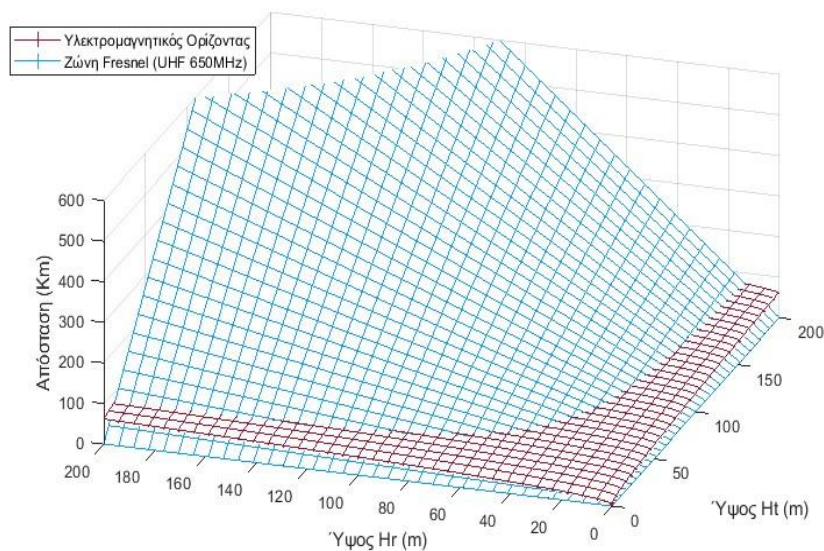


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Πίνακας 4: Απόσταση ζώνης Fresnel για περιοχή συχνοτήτων UHF (0,3 - 1GHz).

Τιμή υπολογισμού UHF (650MHz)		Ύψος κόμβου (Ht)					
		16m	25m	200m	420m	600m	1.000m
Ύψος κόμβου (Hr)	16m	6.970m	10.891m	87.127m	182.966m	261.381m	435.634m
	25m	10.891m	17.017m	136.136m	285.885m	408.407m	680.678m
	200m	87.127m	136.136m	1.089.085m	2.287.079m	3.267.256m	5.445.427m
	420m	182.966m	285.885m	2.287.079m	4.802.867m	6.861.238m	11.435.397m
	600m	261.381m	408.407m	3.267.256m	6.861.238m	9.801.769m	16.336.282m
	1.000m	435.634m	680.678m	5.445.427m	11.435.397m	16.336.282m	27.227.136m



Διάγραμμα 4: Σύγκριση ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα – ζώνης Fresnel για συχνότητες UHF.

Πίνακας 5: Απόσταση ζώνης Fresnel για περιοχή συχνοτήτων L (1 - 2GHz).

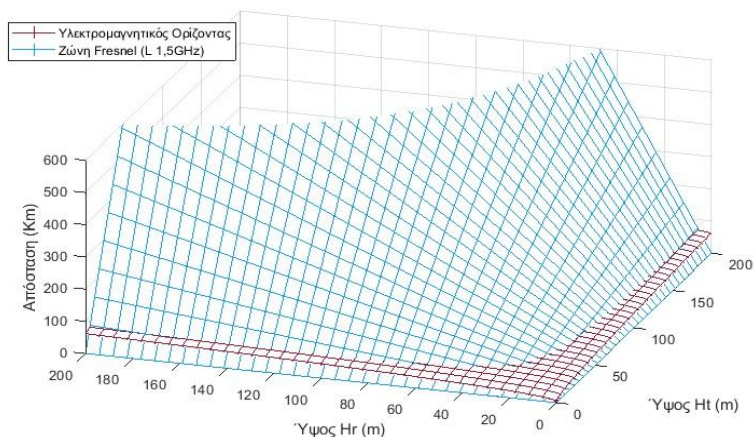
Τιμή υπολογισμού L (1,5GHz)		Ύψος κόμβου (Ht)					
		16m	25m	200m	420m	600m	1.000m
Ύψος κόμβου (Hr)	16m	16.085m	25.133m	201.062m	422.230m	603.186m	1.005.310m
	25m	25.133m	39.270m	314.159m	659.734m	942.478m	1.570.796m
	200m	201.062m	314.159m	2.513.274m	5.277.876m	7.539.822m	12.566.371m
	420m	422.230m	659.734m	5.277.876m	11.083.539m	15.833.627m	26.389.378m
	600m	603.186m	942.478m	7.539.822m	15.833.627m	22.619.467m	37.699.112m
	1.000m	1.005.310m	1.570.796m	12.566.371m	26.389.378m	37.699.112m	62.831.853m





## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

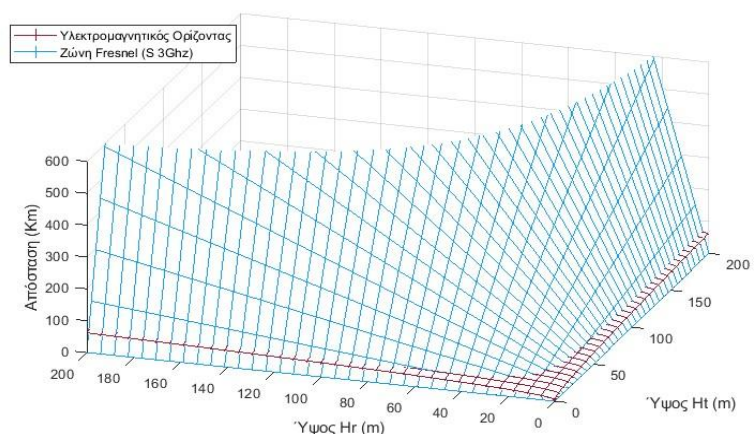
### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



Διάγραμμα 5: Σύγκριση ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα – ζώνης Fresnel για συχνότητες L.

Πίνακας 6: Απόσταση ζώνης Fresnel για περιοχή συχνοτήτων S (2 - 4GHz).

Τιμή υπολογισμού S (3GHz)	Ύψος κόμβου (Ht)					
	16m	25m	200m	420m	600m	1.000m
16m	32.170m	50.265m	402.124m	844.460m	1.206.372m	2.010.619m
25m	50.265m	78.540m	628.319m	1.319.469m	1.884.956m	3.141.593m
200m	402.124m	628.319m	5.026.548m	10.555.751m	15.079.645m	25.132.741m
420m	844.460m	1.319.469m	10.555.751m	22.167.078m	31.667.254m	52.778.757m
600m	1.206.372m	1.884.956m	15.079.645m	31.667.254m	45.238.934m	75.398.224m
1.000m	2.010.619m	3.141.593m	25.132.741m	52.778.757m	75.398.224m	125.663.706m



Διάγραμμα 6: Σύγκριση ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα – ζώνης Fresnel για συχνότητες S.

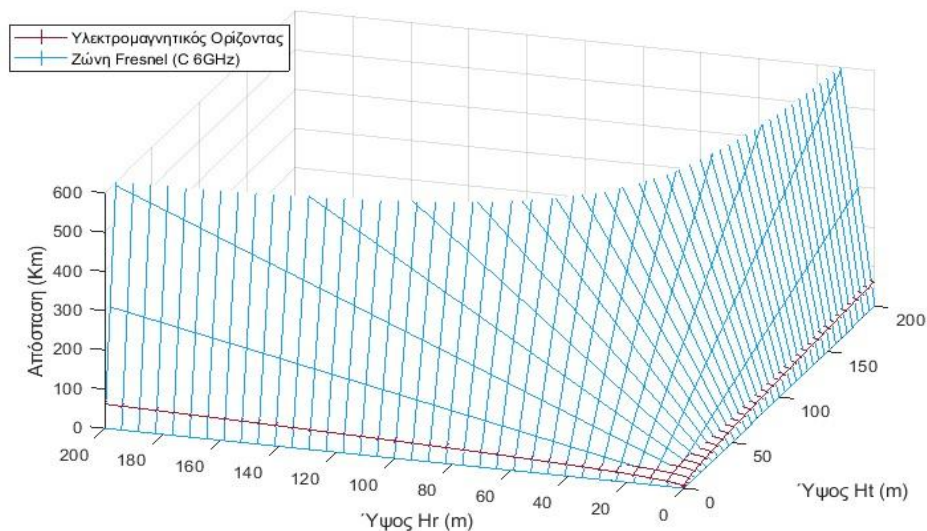


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Πίνακας 7: Απόσταση ζώνης Fresnel για περιοχή συχνοτήτων C (4 - 8GHz).

Τιμή υπολογισμού C (6GHz)	Ύψος κόμβου (Ht)						
	16m	25m	200m	420m	600m	1.000m	
Ύψος κόμβου (Hr)	16m	64.340m	100.531m	804.248m	1.688.920m	2.412.743m	4.021.239m
	25m	100.531m	157.080m	1.256.637m	2.638.938m	3.769.911m	6.283.185m
	200m	804.248m	1.256.637m	10.053.096m	21.111.503m	30.159.289m	50.265.482m
	420m	1.688.920m	2.638.938m	21.111.503m	44.334.156m	63.334.508m	105.557.513m
	600m	2.412.743m	3.769.911m	30.159.289m	63.334.508m	90.477.868m	150.796.447m
	1.000m	4.021.239m	6.283.185m	50.265.482m	105.557.513m	150.796.447m	251.327.412m



Διάγραμμα 7: Σύγκριση ηλεκτρομαγνητικού ορίζοντα – ζώνης Fresnel για συχνότητες C.

Από τους ανωτέρω πίνακες και διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι η ζώνη Fresnel είναι μεγαλύτερη από τον ηλεκτρομαγνητικό ορίζοντα, εκτός από τα μικρά ύψη πτήσης στις συχνότητες UHF (για ύψος κεραίας 16μ ύψος πτήσης μικρότερο των 150 μέτρων) και L (για ύψος κεραίας 16μ ύψος πτήσης μικρότερο των 50 μέτρων). Αυτό συνεπάγεται ότι η εμβέλεια των κόμβων του δικτύου, εξαιρουμένων των περιπτώσεων των συχνοτήτων UHF και L, θα είναι μικρότερη των τιμών που λαμβάνει η ζώνη Fresnel για τα αντίστοιχα ύψη των κόμβων. Γεγονός που οδηγεί



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

στη χρήση του μοντέλου απωλειών ελεύθερου χώρου για τον υπολογισμό των απωλειών στο εκπεμπόμενο σήμα από του κόμβους του δικτύου.

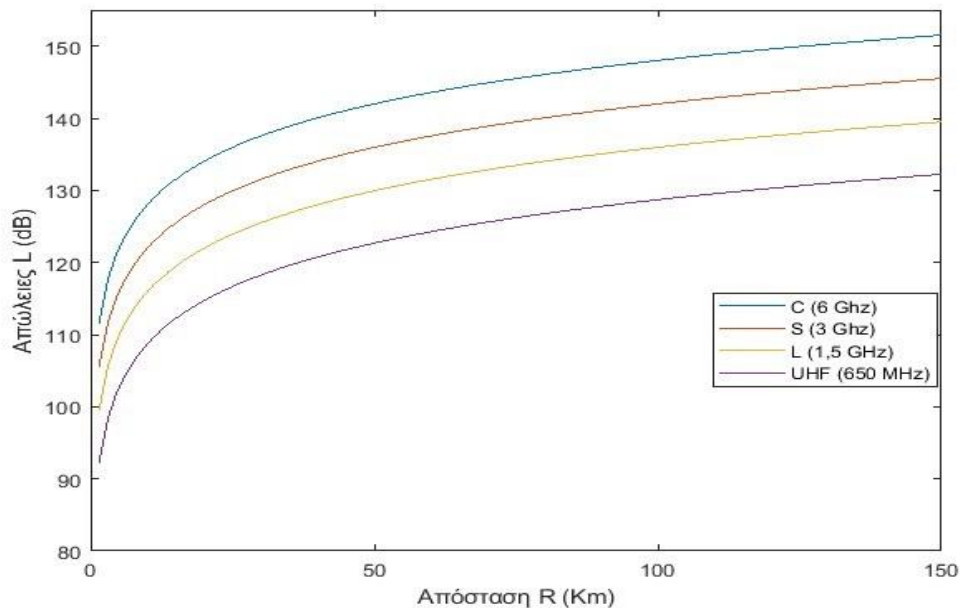
Ομοίως, με τη χρήση της κατάλληλης συνάρτησης, εκ των συναρτήσεων (2), (3), (4) του δεύτερου κεφαλαίου, για τον υπολογισμό της τιμής των απωλειών σε dB,

$$L(\text{dB}) = 32,44 + 20 \log_{10} R + 20 \log_{10} F$$

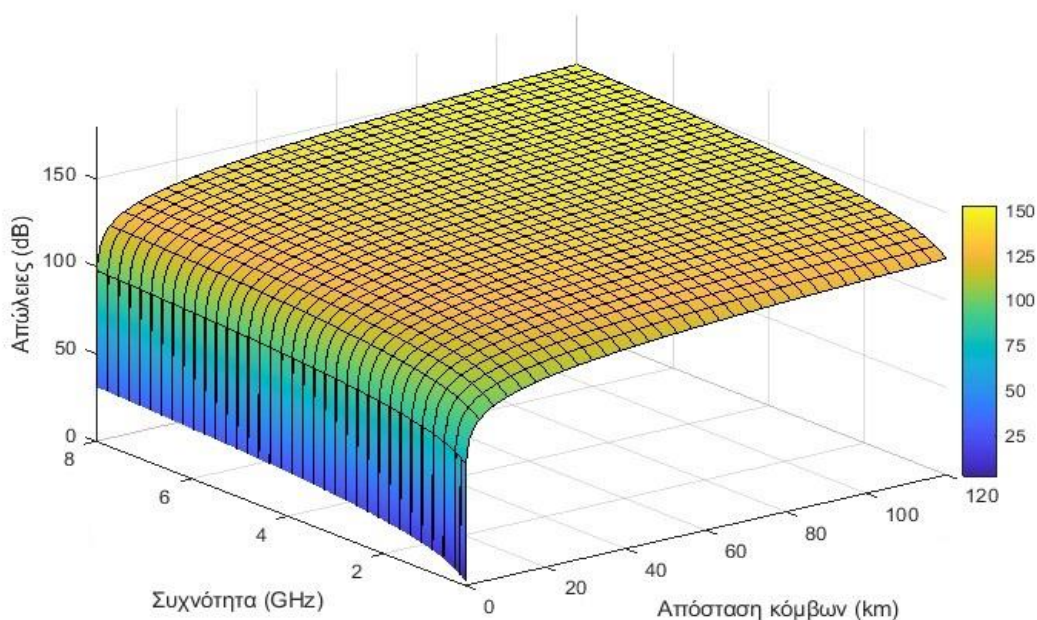
μελετήθηκαν οι απώλειες ελεύθερου χώρου για τις περιοχές συχνοτήτων UHF, L, S, και C.

Πίνακας 8: Απώλειες ελεύθερου χώρου (Free space losses).

Συχνότητα (τιμές υπολογισμού)	Απόσταση (R)									
	5 Km	10 Km	20 Km	30 Km	40 Km	50 Km	60 Km	80 Km	100 Km	120 Km
<b>UHF (650 MHz)</b>	103dB	109dB	115dB	118dB	121dB	123dB	124dB	127dB	129dB	130dB
<b>L (1,5 GHz)</b>	110dB	116dB	122dB	126dB	128dB	130dB	132dB	134dB	136dB	138dB
<b>S (3 GHz)</b>	116dB	122dB	128dB	132dB	134dB	136dB	138dB	140dB	142dB	144dB
<b>C (6 GHz)</b>	122dB	128dB	134dB	138dB	140dB	142dB	144dB	146dB	148dB	150dB



Διάγραμμα 8: Απώλειες ελεύθερου χώρου για τις μελετώμενε συχνότητες.



Διάγραμμα 9: Απώλειες ελεύθερου χώρου για το σύνολο των συχνοτήτων 300MHz - 8 GHz.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο αυξάνονται και οι απώλειες του εκπεμπόμενου σήματος. Κατά συνέπεια τα μεγέθη της συχνότητας και των απωλειών είναι ανάλογα με τον ρυθμό αύξησης των μεγεθών αυτών να είναι σταθερός και δίνεται από την διαφορά των δεκαδικών λογάριθμων των συχνοτήτων εκπομπής.

$$\log_{10}F_2 - \log_{10}F_1$$

Τελευταίο μέγεθος προς μελέτη για την επιλογή της κατάλληλης συχνότητας εκπομπής του ασυρμάτου δικτύου είναι η ρυθμαπόδοση δεδομένων (throughput). Ο όγκος των δεδομένων είναι ανάλογος του εύρους ζώνης του σήματος εκπομπής, για δύο σήματα στα οποία αλλάζει μόνο τη εύρος ζώνης.

$$C_1 = 2B_1 \log_2 M = B_1 \log_2(1 + SNR) \quad C_2 = 2B_2 \log_2 M = B_2 \log_2(1 + SNR)$$



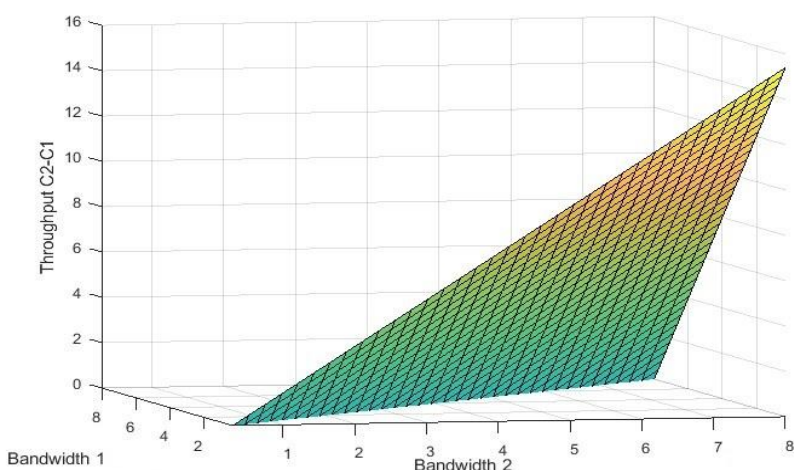


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

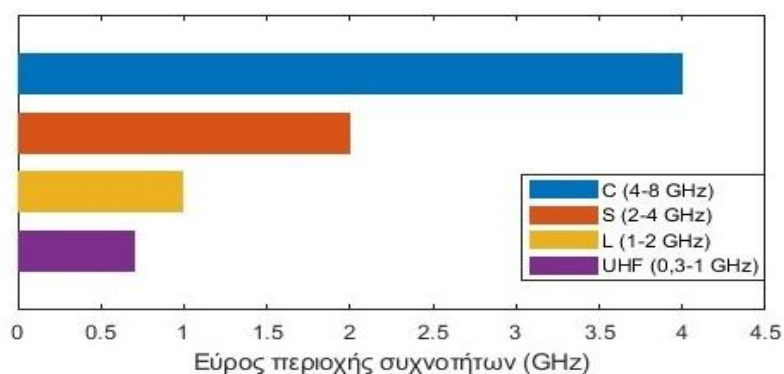
Το σήμα με το μεγαλύτερο εύρος ζώνης έχει δυνατότητα μεγαλύτερης ρυθμαπόδοσης δεδομένων τόσες φορές όση είναι η διαφορά του εύρους ζώνης των σημάτων αυτών.

$$C_2 - C_1 = 2(B_2 - B_1) \log_2 M \quad \text{ή} \quad C_2 - C_1 = (B_2 - B_1) \log_2(1 + SNR)$$



Διάγραμμα 10: Διαφορά ρυθμαπόδοσης δεδομένων ανάλογα το εύρος ζώνης.

Επίσης όσο αυξάνεται το εύρος της περιοχής συχνοτήτων εκπομπής (π.χ. η περιοχή UHF έχει εύρος 700MHz, ενώ η περιοχή C έχει 4GHz) τόσο παρέχεται δυνατότητα για χρήση μεγαλύτερου εύρους ζώνης για τις χρησιμοποιούμενες εκπομπές, έχοντας αντίστοιχο αντίκτυπο και στην μεταφορά δεδομένων.



Διάγραμμα 11: Εύρος περιοχής των τεσσάρων μελετώμενων συχνοτήτων.



Από τα αποτελέσματα της μελέτης του συνόλου των παραμέτρων του παρόντος υποκεφαλαίου απορρίπτεται η χρήση των περιοχών συχνοτήτων C και UHF, διότι η μεν πρώτη παρουσιάζει τις μεγαλύτερες απώλειες στο εκπεμπόμενο σήμα, η δε δεύτερη την μικρότερη δυνατότητα ρυθμαπόδοσης δεδομένων και μεγάλες απώλειες στις μικρές αποστάσεις (ζώνη Fresnel μικρότερη της εμβέλειας, οπότε υπολογισμός απωλειών με μοντέλο two-ray propagation losses). Από τις δύο εναπομένουσες περιοχές επιλέχθηκε η χρήση της περιοχής S, η οποία παρόλο που παρουσιάζει μεγαλύτερες απώλειες στο εκπεμπόμενο σήμα, έχει μεγαλύτερη δυνατότητα ρυθμαπόδοσης δεδομένων και λιγότερες απώλειες στις μικρές αποστάσεις (ζώνη Fresnel μεγαλύτερη της εμβέλειας, οπότε υπολογισμός απωλειών με μοντέλο απωλειών ελεύθερου χώρου, σε αντίθεση με την L όπου χρησιμοποιούμε το μοντέλο two-ray propagation losses).

#### 4.3.3 Ισχύς εκπομπής – διαχείριση ενέργειας

Ένας ακόμα παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη κατά την σχεδίαση / ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνιών είναι η ισχύς εκπομπής των κόμβων του. Τα όρια που θέτει η νομοθεσία για τις ελεύθερες εκπομπές οδήγησε στην επιλογή ενός συστήματος με κατάλληλη διάταξη MIMO και δυνατότητα μέγιστης συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος τα 10W. Στο σύστημα αυτό, η ισχύς λόγω της τεχνολογίας MIMO, διαμοιράζεται ισομερώς μεταξύ των κεραιών. Ως αποτέλεσμα η λαμβανόμενη ισχύς ανά κεραία, λόγω της εξασθένησης του σήματος, να είναι  $\leq 2W$ .

Επιπλέον η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας του επικοινωνιακού κόμβου συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας προς όφελος του αεροχήματος φορέα. Για το λόγο αυτό, πέραν της σχετικά μικρής ισχύος εκπομπής, αποτελεί επιθυμητό προσόν το επικοινωνιακό σύστημα που θα επιλεγεί να παρέχει την δυνατότητα αυτόματης προσαρμογής της ισχύος εκπομπής του, ανάλογα με την απόσταση των γειτονικών κόμβων.



Τέλος είναι άξιο αναφοράς ότι στα συστήματα με τεχνολογία διασποράς φάσματος ενεργοποιούν τα κανάλια επικοινωνίας αναλόγως των υπάρχοντων πληροφοριών προς μεταφορά. Αυτό από μόνο του περιορίζει τις άσκοπες εκπομπές μειώνοντας την σπατάλη ενέργειας.

#### 4.3.4 Υπολογισμός ζεύξεων (Link budget)

Τελευταίο στάδια της μελέτης αποτελεί ο προσδιορισμός των θεωρητικών τιμών της εμβέλειας του συστήματος. Το μέγεθος που προσδιορίζει εάν το εισερχόμενο σήμα μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο είναι ο λόγος C/N (carrier-to-noise ratio) που μας δίνεται από τον τύπο

$$C/N \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_c}{P_n} \right) = P_c - P_n \quad (10)$$

Για τον υπολογισμό του πρέπει να υπολογιστούν η ισχύς θορύβου (Noise power)

$$P_n \text{ (dBm)} = 30 + 10 \log_{10}(k T W) \quad (11)$$

Και η ισχύς σήματος (Received Signal Power)

$$P_c \text{ (dBm)} = EIRP - 10 \log_{10} L = EIRP - L \quad (12)$$

Όπου:

$$k = 1,379 \times 10^{-23} \text{ W/Hz } ^\circ K \text{ (Σταθερά Boltzmann)}$$

W : Εύρος ζώνης (Bandwidth) σε Hz

T : Θερμοκρασία θορύβου (Noise temperature)

EIRP: Αποτελεσματική Ισοτροπικά Εκπεμπόμενη Ισχύς (Effective Isotropic Radiated Power)

$$EIRP \text{ (dBm)} = 30 + P_T - L_c + G_a \quad (13)$$

$P_T$  : Ισχύς εξόδου του πομπού (Output power of the transmitter) (dB)

$L_c$  : Απώλεια καλωδίων (Cable loss) σε dB

$G_a$ : Κέρδος κεραίας (Antenna Gain) σε dB



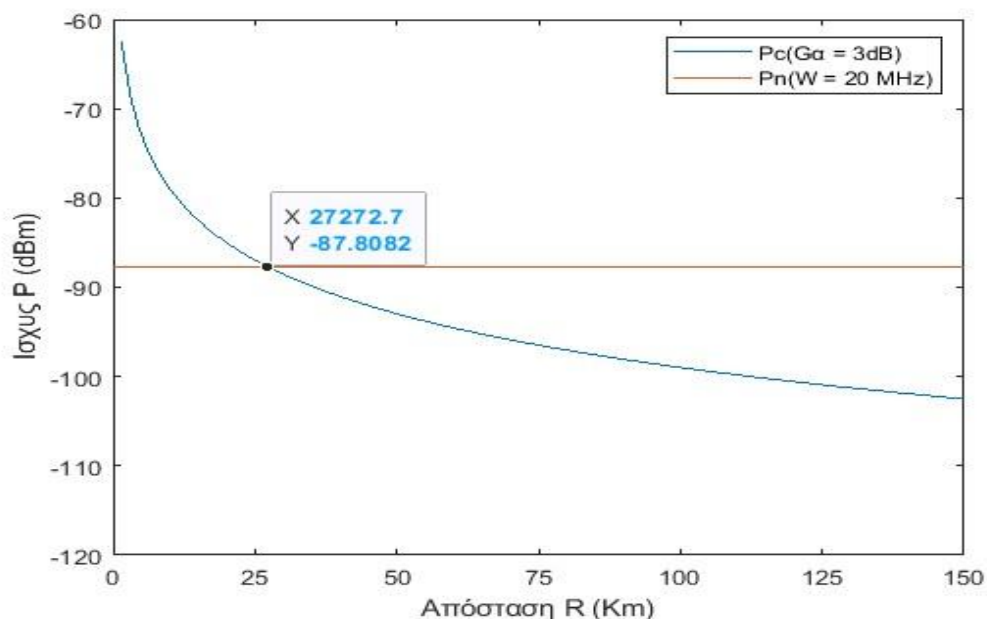
Οι υπολογισμοί θα πραγματοποιηθούν με το μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου (τύποι (2) (3) (4) κεφαλαίου 2), καθώς ο ηλεκτρομαγνητικός ορίζοντας για την συχνότητα εκπομπής είναι μικρότερος της ζώνης Fresnel όπως αποδείχθηκε στην υποπαράγραφο 4.3.2, οπότε και η όποια εμβέλεια του συστήματος δεν θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη από τον ηλεκτρομαγνητικό ορίζοντα. Διεξοδικότερα θα μελετηθούν οι περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται κεραίες χαμηλής ( $G_a = 3\text{dB}$ ) και υψηλής ( $G_a = 13\text{dB}$ ) απολαβής για εύρος ζώνης 20MHz (μεγάλη ρυθμαπόδοση δεδομένων – εικόνες, βίντεο, ήχος) και 10 MHz (μικρή ρυθμαπόδοση δεδομένων – δεδομένα τηλεμετρίας, δεδομένα στοχοποίησης). Για τους υπολογισμούς θεωρούμε:

Ισχύς εξόδου του πομπού:  $P_T = 10\text{W} = 10\text{dB}$

Απώλεια καλωδίων:  $L_C = 0$  (λόγω αμελητέου μήκους τους  $<10\text{cm}$ )

Θερμοκρασία θορύβου:  $T = 6000 \text{ }^\circ\text{K}$

A. Κεραία μικρής απολαβής με μεγάλο εύρος ζώνης ( $G_a = 3\text{dB}$ ,  $W = 20 \times 10^6 \text{Hz}$ )



Διάγραμμα 12: Υπολογισμός ζεύξεων για  $G_a = 3\text{dB}$  και  $W = 20 \times 10^6 \text{Hz}$ .

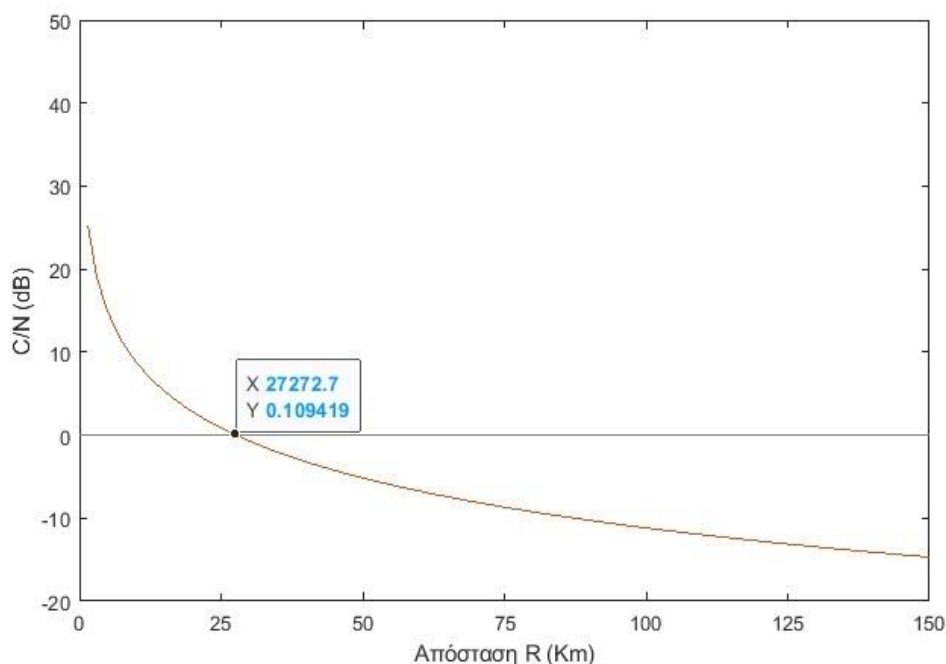


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Πίνακας 9: Υπολογισμός ζεύξεων για  $G_a = 3\text{dB}$  και  $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ .**

Μέγεθος	Απόσταση (R)									
	5 Km	10 Km	20 Km	30 Km	40 Km	50 Km	60 Km	80 Km	100 Km	120 Km
<b>C/N (dB)</b>	15	9	3	-1	-3	-5	-7	-9	-11	-13
<b>P<sub>n</sub> (dBm)</b>	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88
<b>P<sub>c</sub> (dBm)</b>	-73	-79	-85	-89	-91	-93	-95	-97	-99	-101
<b>EIRP (dBm)</b>	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
<b>L (dB)</b>	116	122	128	132	134	136	138	140	142	144



**Διάγραμμα 13: Λόγος C/N για  $G_a = 3\text{dB}$  και  $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ .**

B. Κεραία μικρής απολαβής με μικρό εύρος ζώνης ( $G_a = 3\text{dB}$ ,  $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ )

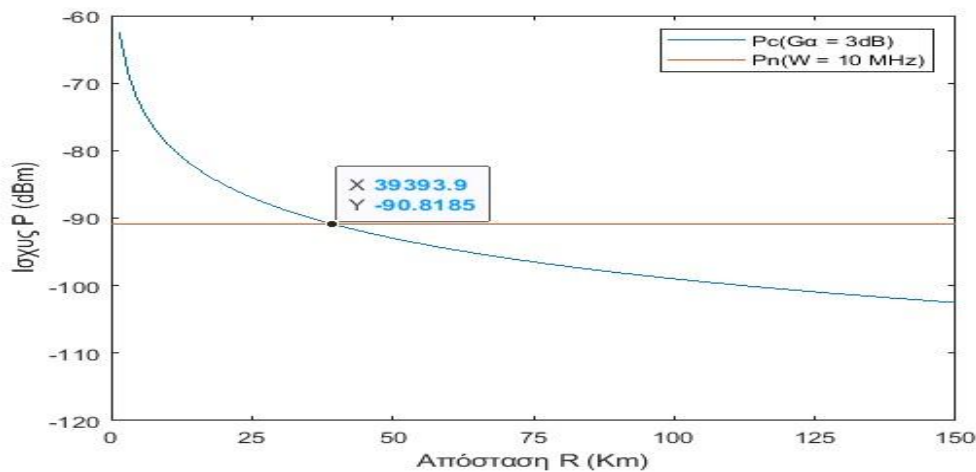
**Πίνακας 10: Υπολογισμός ζεύξεων για  $G_a = 3\text{dB}$  και  $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ .**

Μέγεθος	Απόσταση (R)									
	5 Km	10 Km	20 Km	30 Km	40 Km	50 Km	60 Km	80 Km	100 Km	120 Km
<b>C/N (dB)</b>	18	12	6	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
<b>P<sub>n</sub> (dBm)</b>	-91	-91	-91	-91	-91	-91	-91	-91	-91	-91
<b>P<sub>c</sub> (dBm)</b>	-73	-79	-85	-89	-91	-93	-95	-97	-99	-101
<b>EIRP (dBm)</b>	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
<b>L (dB)</b>	116	122	128	132	134	136	138	140	142	144

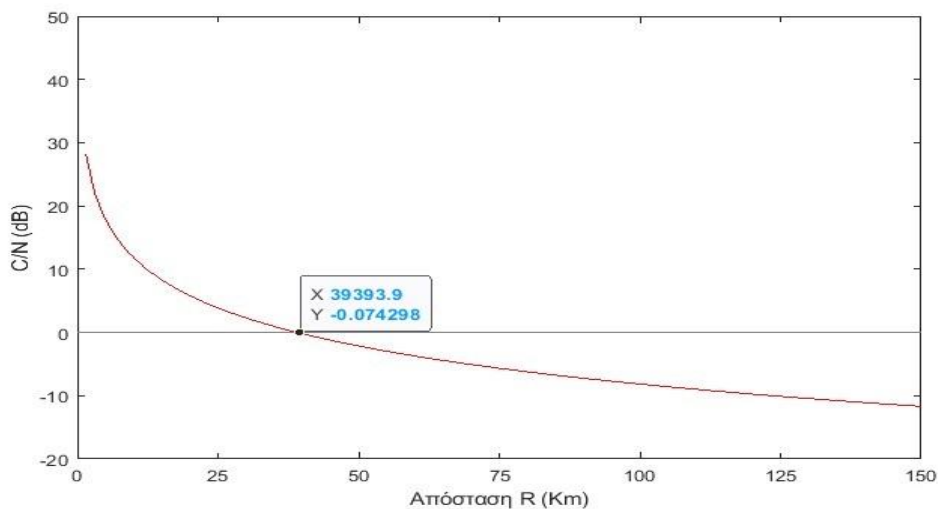


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



Διάγραμμα 14: Υπολογισμός ζεύξεων για  $G_a = 3\text{dB}$  και  $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ .



Διάγραμμα 15: Λόγος C/N για  $G_a = 3\text{dB}$  και  $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ .

Γ. Κεραία μεγάλης απολαβής με μεγάλο εύρος ζώνης ( $G_a = 13\text{dB}$ ,  $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ )

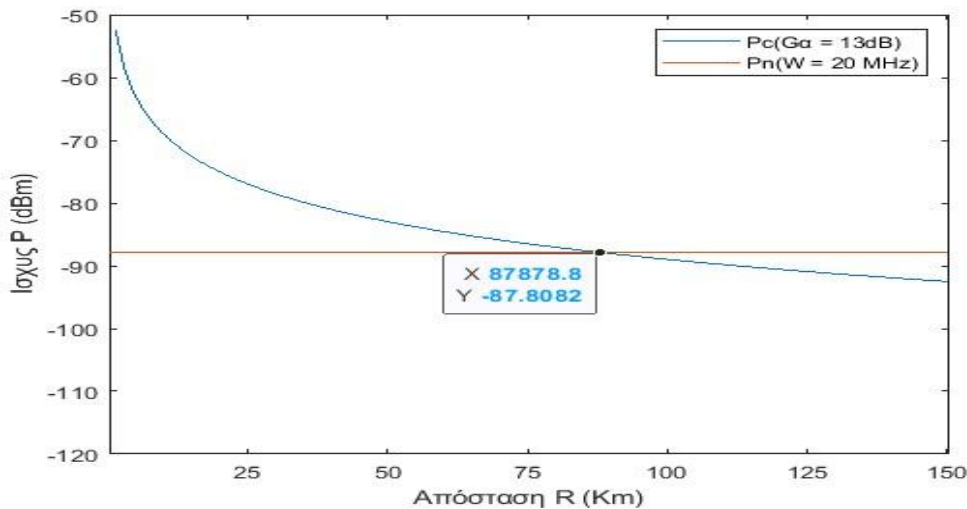
Πίνακας 11: Υπολογισμός ζεύξεων για  $G_a = 13\text{dB}$  και  $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ .

Μέγεθος	Απόσταση (R)									
	5 Km	10 Km	20 Km	30 Km	40 Km	50 Km	60 Km	80 Km	100 Km	120 Km
C/N (dB)	25	19	13	9	7	5	3	1	-1	-3
Pn (dBm)	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88
Pc (dBm)	-63	-69	-75	-79	-81	-83	-85	-87	-89	-91
EIRP (dBm)	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
L (dB)	116	122	128	132	134	136	138	140	142	144

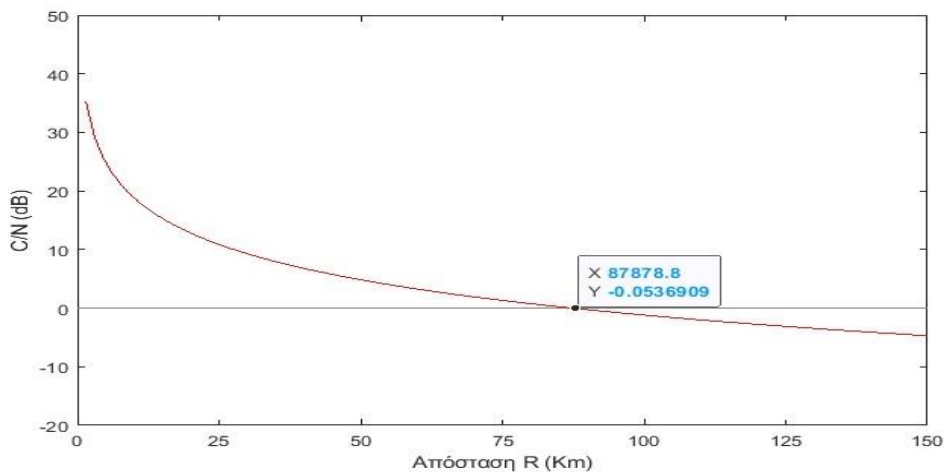


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



**Διάγραμμα 16:** Υπολογισμός ζεύξεων για  $G_a = 13\text{dB}$  και  $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ .



**Διάγραμμα 17:** Λόγος C/N για  $G_a = 13\text{dB}$  και  $W = 20 \times 10^6 \text{ Hz}$ .

Δ. Κεραία μεγάλης απολαβής με μικρό εύρος ζώνης ( $G_a = 13\text{dB}$ ,  $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ )

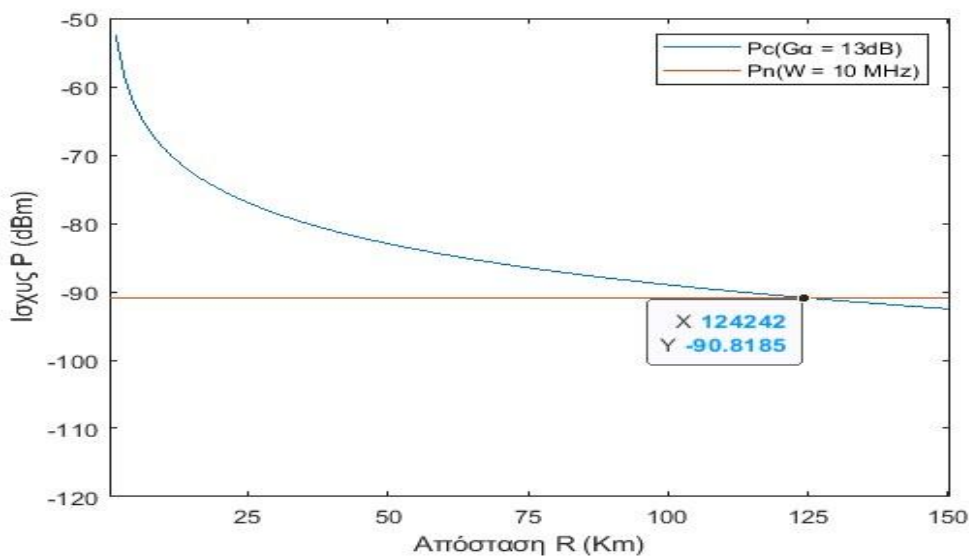
**Πίνακας 12:** Υπολογισμός ζεύξεων για  $G_a = 13\text{dB}$  και  $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ .

	R									
	5 Km	10 Km	20 Km	30 Km	40 Km	50 Km	60 Km	80 Km	100 Km	120 Km
<b>C/N (dB)</b>	28	22	16	12	10	8	6	4	2	0
<b>Pn (dBm)</b>	-91	-91	-91	-91	-91	-91	-91	-91	-91	-91
<b>Pc (dBm)</b>	-63	-69	-75	-79	-81	-83	-85	-87	-89	-91
<b>EIRP (dBm)</b>	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
<b>L (dB)</b>	116	122	128	132	134	136	138	140	142	144

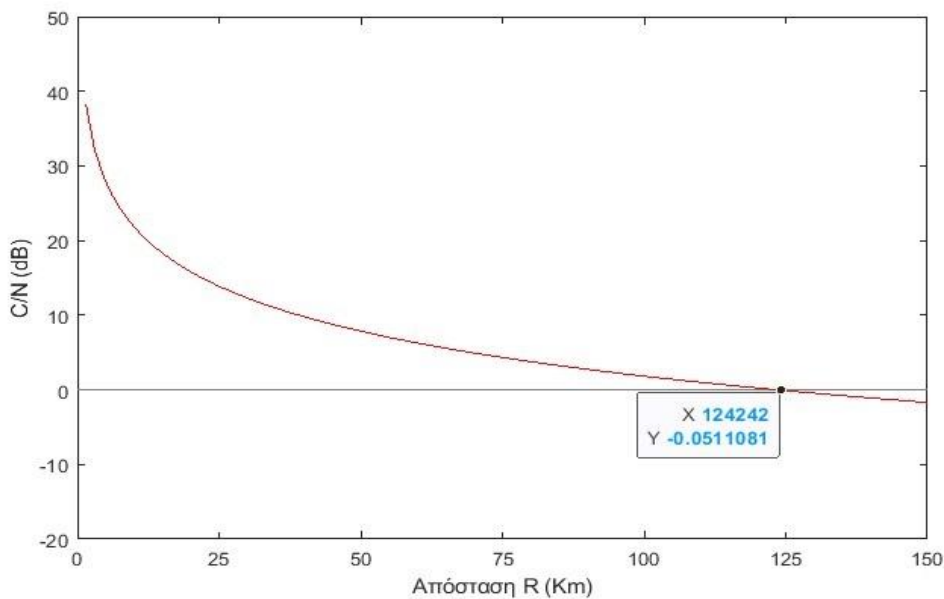


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



Διάγραμμα 18: Υπολογισμός ζεύξεων για  $G_a = 13\text{dB}$  και  $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ .



Διάγραμμα 19: Λόγος C/N για  $G_a = 13\text{dB}$  και  $W = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$ .

Πέραν όμως από τις απώλειες ελεύθερου χώρου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ύπαρξη εμποδίων κοντά στην διαδρομή διάδοσης των σημάτων μεταξύ των κόμβων. Η περιοχή αυτή ορίζεται από την ελλειπτική ζώνη Fresnel (πρώτη έλλειψη που έχει ως κέντρα τις θέσεις των δύο κόμβων που επικοινωνούν μεταξύ τους).





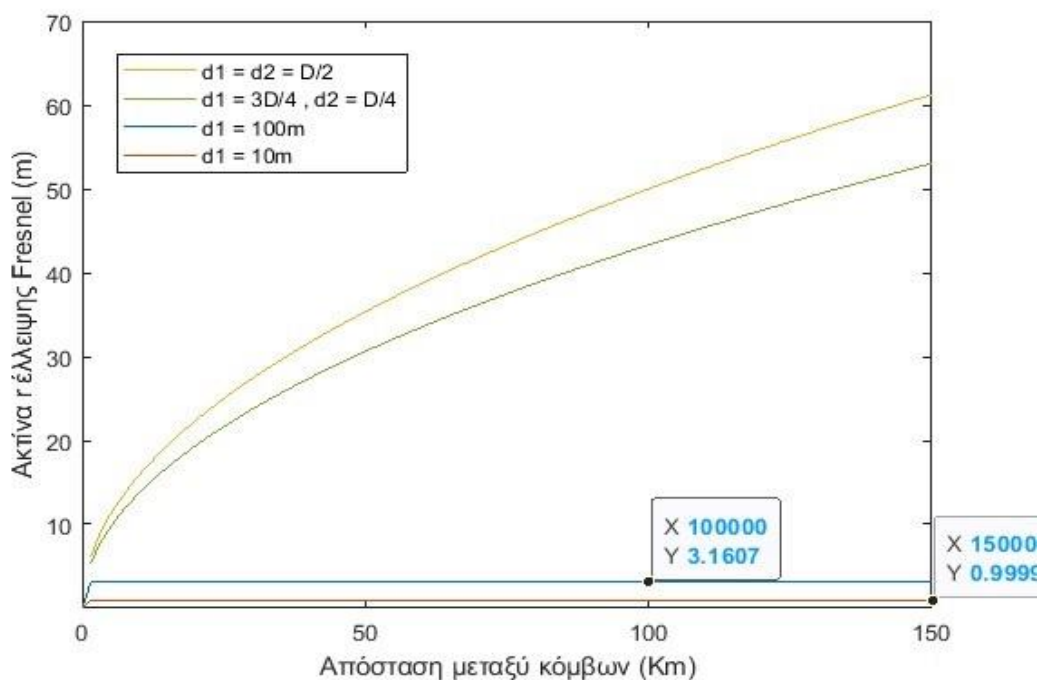
## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η ζώνη αυτή θα πρέπει να παραμένει κατά το 80% ελεύθερη ώστε να μην επηρεάζεται το επικοινωνιακό σήμα. Από τη μελέτη του τύπου (8) του κεφαλαίου 2 έχουμε:

Πίνακας 13: Τιμές ακτίνων πρώτης έλλειψης Fresnel για διάφορες αποστάσεις.

Απόσταση $d_1$ (m)	Απόσταση (D)									
	5 Km	10 Km	20 Km	30 Km	40 Km	50 Km	60 Km	80 Km	100 Km	120 Km
<b>D/2</b>	11,18m	15,81m	22,36m	27,39m	31,62m	35,36m	38,73m	44,72m	50,00m	54,77m
<b>D/4</b>	9,68m	13,69m	19,36m	23,72m	27,39m	30,62m	33,54m	38,73m	43,30m	47,43m
<b>100</b>	3,13m	3,15m	3,15m	3,16m	3,16m	3,16m	3,16m	3,16	3,16m	3,16m
<b>10</b>	1,00m	1,00m	1,00m	1,00m	1,00m	1,00m	1,00m	1,00	1,00m	1,00m



Διάγραμμα 20: Τιμές ακτίνων πρώτης έλλειψης Fresnel για διάφορες αποστάσεις.

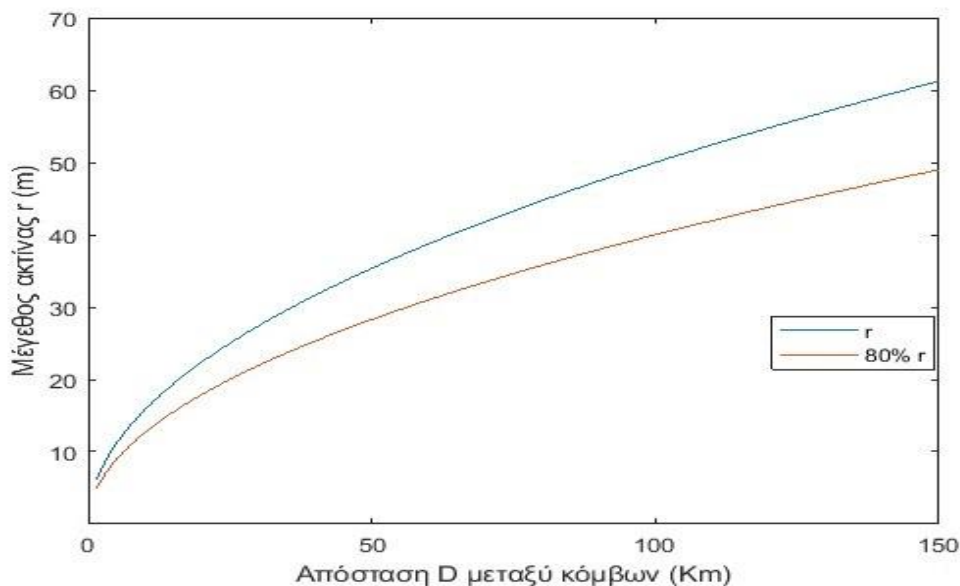
Πίνακας 14: Υπολογισμός μέγιστης ακτίνας ελλείψεων Fresnel και του ορίου του 80% για διάφορες αποστάσεις.

1 <sup>η</sup> έλλειψη	Απόσταση (D)									
	5 Km	10 Km	20 Km	30 Km	40 Km	50 Km	60 Km	80 Km	100 Km	120 Km
<b>Μέγιστη ακτίνα</b>	11,18m	15,81m	22,36m	27,39m	31,62m	35,36m	38,73m	44,72m	50,00m	54,77m
<b>Όριο 80%</b>	8,94m	12,65m	17,89m	21,91m	25,30m	28,29m	30,98m	35,78m	40,00m	43,82m



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



**Διάγραμμα 21:** Τιμές μέγιστης ακτίνας ελλείψεων Fresnel και του ορίου του 80% για διάφορες αποστάσεις.

Οι ανωτέρω υπολογισμοί για την απόδοση της ασύρματης ζεύξης μεταξύ των κόμβων του δικτύου κατέδειξαν τα κάτωθι:

α. Εμβέλεια συστήματος για μεταφορά δεδομένων εικόνας, ήχου, βίντεο με χρήση κεραιών χαμηλής απολαβής τα 27+ χιλιόμετρα, με ελάχιστη απόσταση στο μέσο της διαδρομής διάδοσης μεταξύ των κόμβων από εμπόδιο τα 21,90m.

β. Εμβέλεια συστήματος για μεταφορά δεδομένων εικόνας, ήχου, βίντεο με χρήση κεραιών υψηλής απολαβής τα 86+ χιλιόμετρα, με ελάχιστη απόσταση στο μέσο της διαδρομής διάδοσης μεταξύ των κόμβων από εμπόδιο τα 37,82m.

γ. Εμβέλεια συστήματος για μεταφορά δεδομένων τηλεμετρίας, στοχοποίησης και γραπτών μηνυμάτων με χρήση κεραιών χαμηλής απολαβής τα 39+ χιλιόμετρα, με ελάχιστη απόσταση στο μέσο της διαδρομής διάδοσης μεταξύ των κόμβων από εμπόδιο τα 25,30m.



δ. Εμβέλεια συστήματος για μεταφορά δεδομένων τηλεμετρίας, στοχοποίησης και γραπτών μηνυμάτων με χρήση κεραιών υψηλής απολαβής τα 122+ χιλιόμετρα, με ελάχιστη απόσταση στο μέσο της διαδρομής διάδοσης μεταξύ των κόμβων από εμπόδιο τα 43,82m.

#### 4.4 Ευρωστία (Robustness)

Η επιλογές δυνατοτήτων που θα εξασφαλίζουν υψηλό επίπεδο ευρωστίας στο υπό ανάπτυξη δίκτυο χωρίζονται σε δύο τομείς, την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Στον τομέα της αξιοπιστίας οι δυνατότητες και πιστοποιήσεις του συστήματος θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστον οι κάτωθι:

- Πιστοποίηση MIL-STD-810G για αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις.
- Πιστοποίηση IP επιπέδου 68 κατά IEC/EN 60529, για αντοχή σε περιβαλλοντικούς παράγοντες (αν η συσκευή φέρεται εξωτερικά, σε περίπτωση που εσωκλείεται στο όχημα ή σε θήκη, θα πρέπει το επίπεδο IP68 να εξασφαλίζεται από την κατασκευή του φορέα ή της θήκης)
- Πιστοποίηση RE/RS/CE/CS κατά MIL-STD-461F για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) της συσκευής σε αλληλεπίδραση με άλλες συσκευές και το περιβάλλον.
- Πιστοποίηση της εταιρίας παράγωγής κατά ISO 9001, διασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο την τήρηση των προβλεπόμενων διαδικασιών παραγωγής.
- Δυνατότητα διασύνδεσης με συσκευές που χρησιμοποιούν IP τεχνολογία υποστηρίζοντας πρωτόκολλα IPv4 και IPv6.
- Δυνατότητα αδιάλειπτης συνδεσιμότητας τουλάχιστον στο επίπεδο 2 (data link layer – επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων) του δικτύου σύμφωνα με το μοντέλο OSI (Seamless layer 2 network connectivity).
- Ύπαρξη ενσωματωμένου διακομιστή DHCP.
- Χρήση κατάλληλων αλγόριθμων για την πολλαπλή διανομή (multicast) των δεδομένων των αισθητήρων που συνδέονται στο επικοινωνιακό κόμβο, ώστε



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

να επιτυγχάνεται η αδιάλειπτη χρήση τους από όσους χρήστες επιθυμούν να έχουν πρόσβαση σε αυτά.

- Δυνατότητα αναδρομολόγησης των δεδομένων σε περίπτωση απώλειας ενός κόμβου του δικτύου.
- Δυνατότητα υλοποίησης πλήρως κατανεμημένης τοπολογίας ή τοπολογίας πλέγματος (Mesh) για την διασύνδεση των κόμβων του.
- Χρήση τεχνολογίας διασποράς φάσματος με κατάλληλες διαμορφώσεις σήματος εκπομπής ώστε να παρουσιάζει αντοχή στις σκοπούμενες παρεμβολές.

Οι δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά που πρέπει να ορίζονται κατ' ελάχιστο, ώστε το επικοινωνιακό σύστημα για να είναι ασφαλές, είναι τα κάτωθι:

- Να διαθέτει ενσωματωμένο κρυπτογραφικό επιταχυντή.
- Επίπεδο κρυπτογράφησης για προστασία πληροφοριών AES-256, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO/IEC 18033-3 ή και FIPS PUB 197.
- Επίπεδο κρυπτογράφησης ελέγχου ταυτότητας μηνύματος πακέτου δεδομένων κατ' ελάχιστο SHA-256, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO/IEC 18031:2011 ή και FIPS PUB 180-4 (U.S. National Institute of Standards and Technology).
- Η τεχνική κρυπτογράφησης HMAC.
- Χρήση αλγορίθμων Suite – B ή CNSA (σύμφωνα με την Εθνική Υπηρεσία Ασφαλείας των ΗΠΑ - NSA) ή αντίστοιχου Ευρωπαϊκού ή Νατοϊκού προτύπου, για διακίνηση όλων των επιπέδων πληροφορίας.
- Κρυπτογραφικά επικυρωμένες λειτουργίες Over-the-Air Rekey και Key Zero.
- Πιστοποίηση επιπέδου κατ' ελάχιστον 3 κατά FIPS 140-2 ή αντίστοιχου Ευρωπαϊκού ή Νατοϊκού προτύπου.



## 5. Δοκιμές Δικτύου Επικοινωνιών μη Επανδρωμένων Οχημάτων

Για την επαλήθευση των χαρακτηριστικών του δικτύου που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά και για την αξιολόγηση της εύρωστης λειτουργίας του διενεργήθηκαν δοκιμές, ηλεκτρομαγνητικής (H/M) συμβατότητας (EMC), φασματικές μετρήσεις σήματος της μικροκυματικής τηλεπικοινωνιακής ζεύξης μεταξύ MEA – σταθμού βάσης και μετρήσεις H/M πεδίων του περιβάλλοντος χώρου (ambient EM fields) και H/M παρεμβολών (Electromagnetic Interference - EMI). Τις δοκιμές διεξήγαγε ο τομέας Συστημάτων Μάχης, Ναυτικών Επιχειρήσεων, Θαλασσίων Επιστημών, Ναυτιλίας, Ηλεκτρονικών και Τηλεπικοινωνιών της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων και ειδικότερα το παράρτημα μη επανδρωμένων οχημάτων του εργαστήριου Συστημάτων Μάχης και Ναυτικών Επιχειρήσεων, σε συνεργασία με τις εταιρίες EFA Ventures και Ucandrone. Το σύνολο των χρησιμοποιηθέντων υλικών αποτελεί ιδιοκτησία των προαναφερθέντων φορέων, οι οποίοι επίσης παραχώρησαν την άδεια για την δημοσιοποίηση των μετρήσεων αυτών.

Για την εκτέλεση των μετρήσεων αυτών χρησιμοποιήθηκε ο κάτωθι εξοπλισμός:

1. Δίκτυο επικοινωνιών αποτελούμενο από έως τρεις επίγειους σταθερούς κόμβους (ο αριθμός των σταθερών κόμβων μεταβαλλόταν από έναν έως τρεις, με συνηθέστερη διαμόρφωση τους δύο, ανάλογα με την δοκιμή) και έναν εναέριο κόμβο.

2. Αναλυτής φάσματος (Spectrum Analyzer – SA) 9 kHz - 26,5 GHz τύπου NS-265 της Nex1 (αντίστοιχος με τον γνωστότερο IFR 2395 της Marconi/Aeroflex)



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

3. Χοανοκεραία (ridged horn antenna) ευρείας ζώνης 1-18 GHz της Vector Telecom (με ονομαστικές τιμές VSWR < 2,5 dB και μέσου κέρδους G=10 dB)
4. Όργανο Μέτρησης Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου ευρείας ζώνης NMB 550 της NARDA, με probes: EHP-50F, HF-3061 και EF5091/5092.
5. Τοπογραφικού οργάνου GPS RTK, Stonex S9III PLUS με NTRIP RTK στο δίκτυο METRICA για την συνεχή επίλυση διαφορικού GPS, για την κάλυψη της απαίτησης κινούμενης βάσης και για συγχρονισμό ώρας υποσυστημάτων.
6. Λογισμικού εποπτείας δικτύου Winbox.
7. Φορητός υπολογιστής με λογισμικό πρωτοκόλλου Micro Aerial Vehicle Link (Mavlink), για την επικοινωνία με τον αυτόματο πιλότο του αεροχήματος (χρησιμοποιήθηκε ο σταθμός εδάφους του αεροχήματος φορέα).
8. Ενσωματωμένο λογισμικό συσκευών επικοινωνίας δικτύου.
9. Φορητός υπολογιστής.
10. Συσκευές εκπομπών για την προσομοίωση των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών που το δίκτυο θα κληθεί να αντιμετωπίσει ως κάτωθι:
  - α. Πομπός με κεραία πανκατευθυντικής (omnidirectional) εκπομπής σε συχνότητα HF (3,33MHz) και ρυθμιζόμενη ισχύ εκπομπής σε τρεις στάθμες 250W - 500W - 1000W.
  - β. Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής (unidirectional) εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων S (προσομοίωση κεραίας κινητής τηλεφωνίας) και ισχύ εκπομπής έως 40W.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

- γ. Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων X (8GHz-10GHz), ισχύ εκπομπής 25KW.
- δ. Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων X (8GHz-10GHz) και μέγιστη ισχύ εκπομπής 180KW.
- ε. Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων S (3GHz-4GHz), μέση ισχύ εκπομπής 5KW και μέγιστη ισχύ εκπομπής 145KW.
- στ. Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων X (8GHz-10GHz) και μέγιστη ισχύ εκπομπής 10KW.
- ζ. Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων S (3,1GHz-3,3GHz) και ισχύ εκπομπής 30KW.
- η. Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων K (20GHz-40GHz) και μέγιστη ισχύ εκπομπής 20KW.

11. Καλώδια σύνδεσης, προσαρμογείς (adaptors), λοιπά μικροϋλικά.

Οι εκτελεσθείσες δοκιμές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τις δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας / ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που πραγματοποιήθηκαν σε ελεγχόμενο περιβάλλον, για την πιστοποίηση της δυνατότητας του δικτύου να λειτουργεί σε περιβάλλοντα με έντονες ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές. Η δεύτερη περιλαμβάνει τις δοκιμές που εκτελέστηκαν σε σενάρια πραγματικών αποστολών. Αναλυτικότερα οι δοκιμές παρουσιάζονται στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

#### 5.1 Δοκιμές EMC/EMI

Οι δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών είναι αυτές που προηγήθηκαν χρονικά. Σκοπός τους ήταν να μελετηθούν τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη του δικτύου και να διαπιστωθεί η συμβατότητά τους για λειτουργία σε περιβάλλον με έντονες ηλεκτρομαγνητικές





εκπομπές. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην κύρια ζεύξη του δικτύου (περιοχή συχνοτήτων S, 3X3 MIMO), στη δευτερεύουσα ζεύξη (περιοχή συχνοτήτων UHF, 2X1 Diversity), στους δέκτες συστήματος GNSS (πολλαπλές συχνότητες στην περιοχή συχνοτήτων L) και στις μαγνητικές πυξίδες (Internal Navigation System - INS).

### 5.1.1 Μεθοδολογία δοκιμών EMC/EMI

Για την επίτευξη των τεθέντων για τις δοκιμές σκοπών στα πλαίσια των αποστολών που καθορίστηκαν, για το υπό ανάπτυξη δίκτυο στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέχθηκε η δοκιμή να πραγματοποιηθεί επί πλοίου για να καλυφθεί το ακραίο σενάριο υλοποίησης του δικτύου από θαλάσσια πλατφόρμα σε περιβάλλον έντονων ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών. Η μέθοδος βασίσθηκε στην επιμέτρηση και σύγκριση των τιμών των υπό εξέταση ζεύξεων/ αισθητήρων με τις αντίστοιχες τιμές μάρτυρα (τιμές αρχικών μετρήσεων χωρίς την εκπομπή κανενός συστήματος) του πειράματος, καθώς και το μέσο όρο των τιμών από επιτυχείς έως τούδε πτητικές δοκιμές του δικτύου / αερογήματος. Η διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών ορίστηκε ως εξής:

1. Μέτρηση συχνοτήτων ΣμηΕΑ με χρήση του αναλυτής φάσματος 9 kHz - 26,5 GHz τύπου NS-265 της Nex1 (Η λήψη των σημάτων θα πραγματοποιηθεί με την χοανοκεραία ευρείας ζώνης 1-18 Ghz της Vector Telecom).
2. Αναγνώριση πιθανών παρεμβολών.
3. Μέτρηση μαγνητικού πεδίου με χρήση του οργάνου μέτρησης H/M πεδίου ευρείας ζώνης NMB 550 της NARDA.
4. Εφαρμογή χωρικής παρεμβολής Αντίστροφης Βαρύνουσας Απόστασης (Inverse Distance Weighting - IDW). Η χαρτογράφηση του μαγνητικού





πεδίου θα αναδείξει τα ασφαλέστερα σημεία από – προσγείωσης του αεροχήματος φορέα του κόμβου του δικτύου. Να σημειωθεί ότι λόγω των υλικών κατασκευής του πλοίου θα υπάρχει η μέγιστη μαγνητική παρεμβολή στο σύστημα μαγνητικών πυξίδων /INS του αεροχήματος φορέα του δικτύου.

5. Καταγραφή της θέσης δοκιμών με το τοπογραφικό δέκτη GPS RTK Stonex S9III PLUS και σύνδεση με σταθμό αναφοράς NTRIP RTK στο δίκτυο METRICA, για την επίλυση στο εθνικό σύστημα συντεταγμένων (ΕΓΣΑ87). Η ακριβής καταγραφή της θέσης του αεροχήματος θα βοηθήσει στον εντοπισμό τυχών σφαλμάτων/παρεμβολών στο σύστημα GNSS του αεροχήματος φορέα.

6. Στατική μέτρηση του δικτύου και των υποσυστημάτων/ αισθητήρων του αεροχήματος σε διάταξη υπερυψηλής ανανέωσης δειγματοληψίας (1000Hz). Οι μετρήσεις θα καταγραφούν με χρήση του λογισμικού εποπτείας δικτύου Winbox, του λογισμικού του σταθμού εδάφους του αεροχήματος φορέα του δικτύου και του ενσωματωμένου λογισμικού των συσκευών επικοινωνίας του δικτύου. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων θα αυξάνεται σταδιακά το επίπεδο εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και θα μεταβάλλεται και η απόσταση του ιπταμένου κόμβου ως εξής:

α. Ενεργοποίηση δικτύου (ισχύς πομπού βάσης 7,5W και πομπού αεροχήματος 6,7W) και αεροχήματος, έναρξη καταγραφής, χωρίς την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών .

β. Ενεργοποίηση πομπού με κεραία πανκατευθυντικής εκπομπής σε συχνότητα HF(3,33MHz) σε ισχύ 250W.

γ. Ενεργοποίηση πομπού με κεραία πανκατευθυντικής εκπομπής σε συχνότητα HF(3,33MHz) σε ισχύ 500W.

δ. Ενεργοποίηση πομπού με κεραία πανκατευθυντικής εκπομπής σε συχνότητα HF(3,33MHz) σε ισχύ 1000W.

ε. Ενεργοποίηση πομπού με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων X (8GHz-10GHz), ισχύ εκπομπής 25KW.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

στ. Ενεργοποίηση πομπού με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων S (προσομοίωση κεραίας κινητής τηλεφωνίας) και ισχύ εκπομπής έως 40W.

ζ. Εκτέλεση πτήσης αιώρησης αεροχήματος φορέα κόμβου του δικτύου σε ύψος 6 μέτρων πάνω από τον χώρο από – προσγείωσης για ικανό χρόνο ώστε να γίνει λήψη των απαραίτητων μετρήσεων.

η. Προσγείωση αεροχήματος.

θ. Ενεργοποίηση πομπού, σε απομακρυσμένη θέση, με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων S (3GHz-4GHz), μέση ισχύ εκπομπής 5KW και μέγιστη ισχύ εκπομπής 145KW.

ι. Ενεργοποίηση πομπού, σε απομακρυσμένη θέση, με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων X (8GHz-10GHz) και μέγιστη ισχύ εκπομπής 180KW.

ια. Ενεργοποίηση πομπού, σε απομακρυσμένη θέση, με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων K (20GHz-40GHz) και μέγιστη ισχύ εκπομπής 20KW.

ιβ. Απενεργοποίηση πομπών παραγράφων θ, ι, ια.

ιγ. Εκτέλεση πτήσης αεροχήματος φορέα κόμβου του δικτύου σε ύψος έως 250 μέτρων και απόσταση έως 5.360m από το σταθμό εδάφους.



Εικόνα 30: Σχεδιάγραμμα πτήσης κατά τις δοκιμές EMC/EMI



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

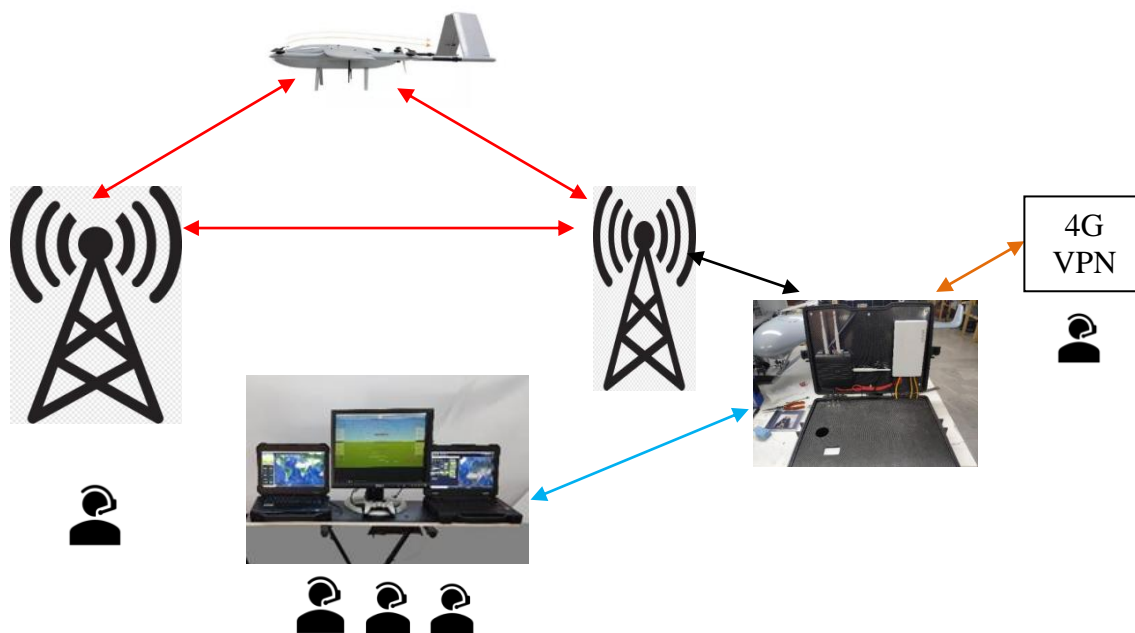
### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ιδ. Ενεργοποίηση πομπού με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων X (8GHz-10GHz) και μέγιστη ισχύ εκπομπής 180KW.

ιε. Προσγείωση αεροχήματος. Απενεργοποίηση όλων των συσκευών εκπομπής.

7. Πρόσκτηση του αρχείου μετρήσεων (log file) του αεροχήματος με χρήση φορητού υπολογιστή με εγκατεστημένο λογισμικό πρωτοκόλλου Mavlink και σύγκριση με μετρήσεις επιτυχημένων δοκιμών για την αναγνώριση ανωμαλιών. Να επισημανθεί ότι το σύστημα καταγραφής / αποθήκευσης των παραμέτρων του αεροχήματος (log), ήταν ενεργοποιημένο ταυτόχρονα στο αερόχημα και στον σταθμό εδάφους καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών.

Η τοπολογία υλοποίησης του ασύρματου δικτύου μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων κατά την δοκιμή, δίνεται από το παρακάτω σκαρίφημα.



Εικόνα 31: Τοπολογία ασύρματου δικτύου ΣμηΕΑ και υποστηρικτικών δικτύων (δοκιμή EMC/EMI).

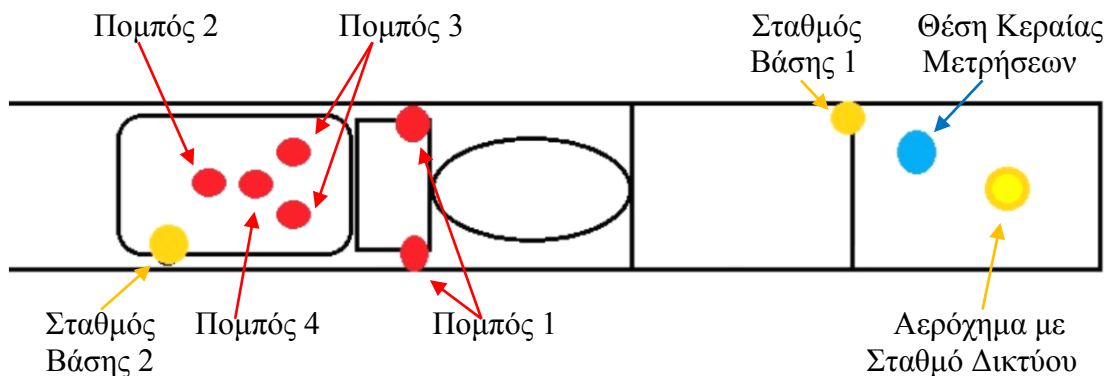


## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Στην εικόνα επισημαίνονται τα τρία δίκτυα /υποδίκτυα (subnet) και οι ζεύξεις μεταξύ αυτών. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι ασύρματες ζεύξεις μεταξύ των κόμβων του MANET των σταθμών εδάφους και του σταθμού επί του αεροχήματος. Με μαύρο χρώμα συμβολίζεται η ενσύρματη σύνδεση της κεραίας με τον κόμβο επικοινωνιών με τα υπόλοιπα υποδίκτυα. Με μπλε χρώμα συμβολίζεται η ενσύρματη ή ασύρματη ζεύξη του κόμβου επικοινωνιών με το σταθμό εδάφους και τις οθόνες προβολής. Με πορτοκαλί χρώμα συμβολίζεται η ασύρματη ζεύξη με απομακρυσμένους χρήστες μέσω του δικτύου 4G.

Οι θέσεις των συσκευών και οι αποστάσεις των διαφόρων πομπών από τους κόμβους του εξεταζόμενου δικτύου παρουσιάζονται στο σκαρίφημα και τον πίνακα που ακολουθεί.



Απομακρυσμένη θέση. Πομποί 4, 5, 6 → ●  
Εικόνα 32: Διάταξη εξοπλισμού δοκιμών EMC/EMI.

Να σημειωθεί ότι οι σταθμοί βάσης τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να εξαλειφθούν οι πιθανοί νεκροί τομείς εκπομπής / λήψης, περιμετρικά της διάταξης δοκιμών, χωρίς ωστόσο να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ τους. Επίσης η διάταξη μετρήσεων που αποτελούταν από τον αναλυτή φάσματος και την χοανοκεραία (κουκίδα μπλέ χρώματος) τοποθετήθηκε στο μέσον της απόστασης του σταθμού



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

βάσης 1 από το αερόχημα φορέα του εναέριου κόμβου του δικτύου. Ανάμεσα στην απομακρυσμένη θέση και το πλοίο επί του οποίου εκτελέστηκαν οι μετρήσεις παρεμβάλλεται θάλασσα. Τέλος το πλοίο στο οποίο διεξήχθησαν οι μετρήσεις ήταν παραβεβλημένο (δεμένο), ώστε να εξασφαλιστεί η το δυνατόν μικρότερη μετατόπισή του.

Πίνακας 15: Αποστάσεις μεταξύ του εξοπλισμού κατά τις δοκιμές EMC/EMI.

Α/Α	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΜΠΟΥ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ (μέτρα)		
		ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ 1	ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ 2	ΑΕΡΟΧΗΜΑ
1	Πομπός με πανκατευθυντική κεραία, εκπομπή σε συχνότητα HF (3,33MHz) και ρυθμιζόμενη ισχύ εκπομπής σε τρεις στάθμες 250W - 500W - 1000W	40	25	50
2	Πομπός με μονοκατευθυντική κεραία, εκπομπή στη ζώνη συχνοτήτων X, ισχύ εκπομπής 25KW	57	13	67
3	Πομπός με μονοκατευθυντική κεραία, εκπομπή στη ζώνη συχνοτήτων S και ισχύ εκπομπής έως 40W	50	15	60
4	Πομπός με μονοκατευθυντική κεραία, εκπομπή στη ζώνη συχνοτήτων X και μέγιστη ισχύ εκπομπής 180KW	55 870	15 900	65 865
5	Πομπός με μονοκατευθυντική κεραία, εκπομπή στη ζώνη συχνοτήτων S, μέση ισχύ εκπομπής 5KW και μέγιστη ισχύ εκπομπής 145KW	870	900	865
6	Πομπός με μονοκατευθυντική κεραία, εκπομπή στη ζώνη συχνοτήτων K και μέγιστη ισχύ εκπομπής 20KW	870	900	865
7	Σταθμός Βάσης 1		65	15
8	Σταθμός βάσης 2	65		76



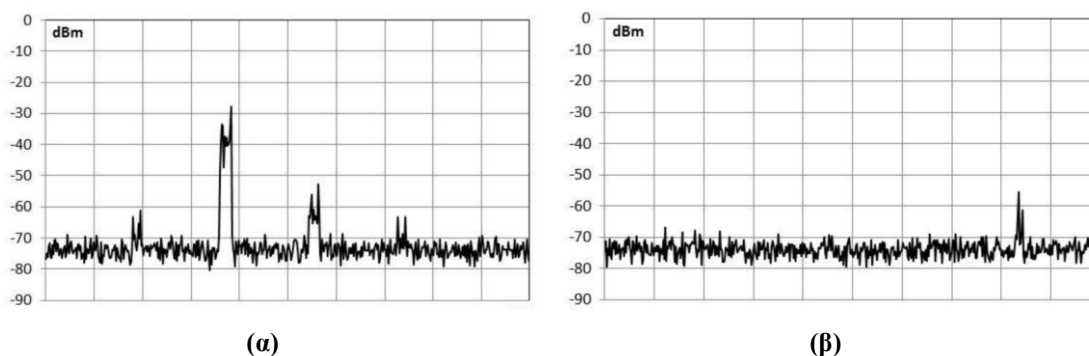
Στις μετρήσεις που διενεργήθηκαν με τον αναλυτή φάσματος, έγινε χρήση τριών τρόπων λειτουργίας αυτού. Της επιλογής «Normal», η οποία δείχνει το φάσμα του σήματος σε κάθε σάρωση όπως προκύπτει από τους μίκτες, τα φίλτρα IF, τα κυκλώματα ανίχνευσης και τον τελικό ενισχυτή (video amplifier) του αναλυτή. Της επιλογής «Max Hold», η οποία δείχνει τη μέγιστη τιμή που έλαβε το ίχνος του φάσματος σε όλες τις σαρώσεις κατά το διάστημα που εφαρμόζεται. Τέλος της επιλογής «Average», η οποία δίνει τη μέση τιμή του (συνήθως λογαριθμικού) ίχνους του φάσματος σε ορισμένο αριθμό N επαναλήψεων που ρυθμίζεται από τον χειριστή. (Στην προκειμένη περίπτωση, μετά από δοκιμές επιλέχθηκε η τιμή N=50, η οποία εκτιμήθηκε από το επιστημονικό επιτελείο ότι επιτυγχάνει εύλογο συμβιβασμό μεταξύ σταθεροποίησης του ίχνους και ταχύτητας μετρήσεων).

### 5.1.2 Αποτελέσματα δοκιμών EMC/EMI

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την εκτέλεση των μετρήσεων ομαδοποιήθηκαν ανά σύστημα και παρουσιάζονται παρακάτω.

#### A. Κύρια Ζεύξη.

Διαπιστώθηκε ότι η ζεύξη του δικτύου (κύρια ζεύξη) εκπέμπει στη περιοχή συχνοτήτων S. Το σήμα της κύρια ζεύξης (S band) συγκεντρώνεται κάθε φορά σε μια ζώνη μερικών MHz με διαρκώς μεταβαλλόμενη θέση που διατρέχει την πολύ



Εικόνα 33. Στιγμιότυπα φάσματος στην περιοχή συχνοτήτων S με την επιλογή «Normal».

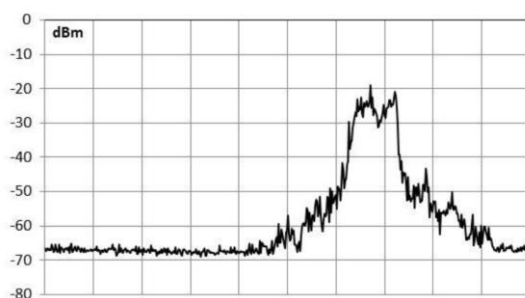




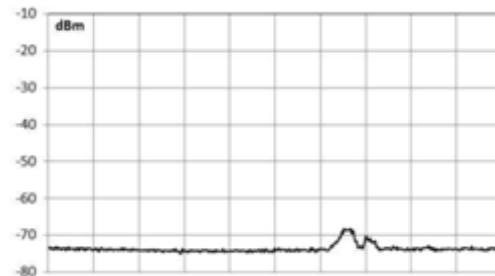
## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ευρύτερη περιοχή των περίπου 200 MHz. Από τη σύγκριση των (τυχαίων) στιγμιοτύπων που δίνει η επιλογή «Normal» (όπως στην Εικόνα 33 α, β) υποδεικνύεται τη χρήση τεχνικής αναπήδησης συχνότητας (Frequency Hopping). Επίσης η εμφανή διαφορά ενδείξεων ισχύος μεταξύ των εικόνων από τις επιλογές «Max Hold» και «Average» (Εικόνα 34) είναι χαρακτηριστική για συστήματα διαπλάτυνση του φάσματος (Spread Spectrum).



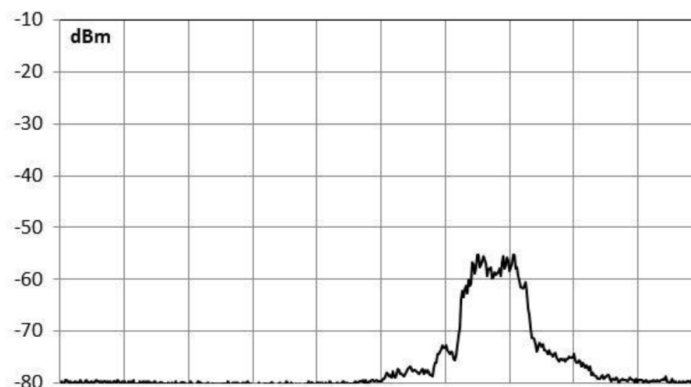
(α) Επιλογή «Max Hold»



(β) Επιλογή «Average» (N=50)

Εικόνα 34: Απεικονίσεις φάσματος στην περιοχή συχνοτήτων S.

Η μεγάλη αύξηση της μέσης ισχύος, η οποία παρατηρήθηκε κατά τη δοκιμή της ζεύξης με υψηλό ρυθμό δεδομένων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35, πιθανότατα υποδεικνύει ότι το σύστημα εκπέμπει όταν έχει δεδομένα να μεταδώσει (και δεν εκπέμπει όταν δεν έχει).



Εικόνα 35.: Φάσμα στην περιοχή συχνοτήτων S με την επιλογή «Average» σε υψηλό ρυθμό δεδομένων.





Στις ανωτέρω μετρήσεις παρατηρήθηκε στάθμη σήματος της τάξης των 40 dB πάνω από το επίπεδο θορύβου (noise floor). Δεν μπορεί όμως να παραγνωριστεί ότι οι συνθήκες των μετρήσεων ήταν ιδιαίτερα ευνοϊκές (πολύ μικρή απόσταση 7 με 8 μέτρα, γνωστή θέση του πομπού ώστε μια αρκετά κατευθυντική κεραία λήψης να σκοπεύσει προς αυτόν). Σε ρεαλιστικές επιχειρησιακές συνθήκες, ακόμη και με την ίδια ευχέρεια σκόπευσης με μια παρόμοια κατευθυντική κεραία, το εν λόγω περιθώριο των περίπου 40 dB πάνω από το επίπεδο θορύβου θα αναλωνόταν από τις απώλειες ελεύθερου χώρου σε περίπου 100πλάσια απόσταση (δηλ. απόσταση 700-800 μέτρων), όπως καθορίζεται από τον τύπο  $20\log(r)$  που δίνει την εξάρτηση των απωλειών ελεύθερου χώρου από την απόσταση ( $r$ ). Απόσταση πολύ μικρή για τα επιχειρησιακές απαιτήσεις του συστήματος όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4.

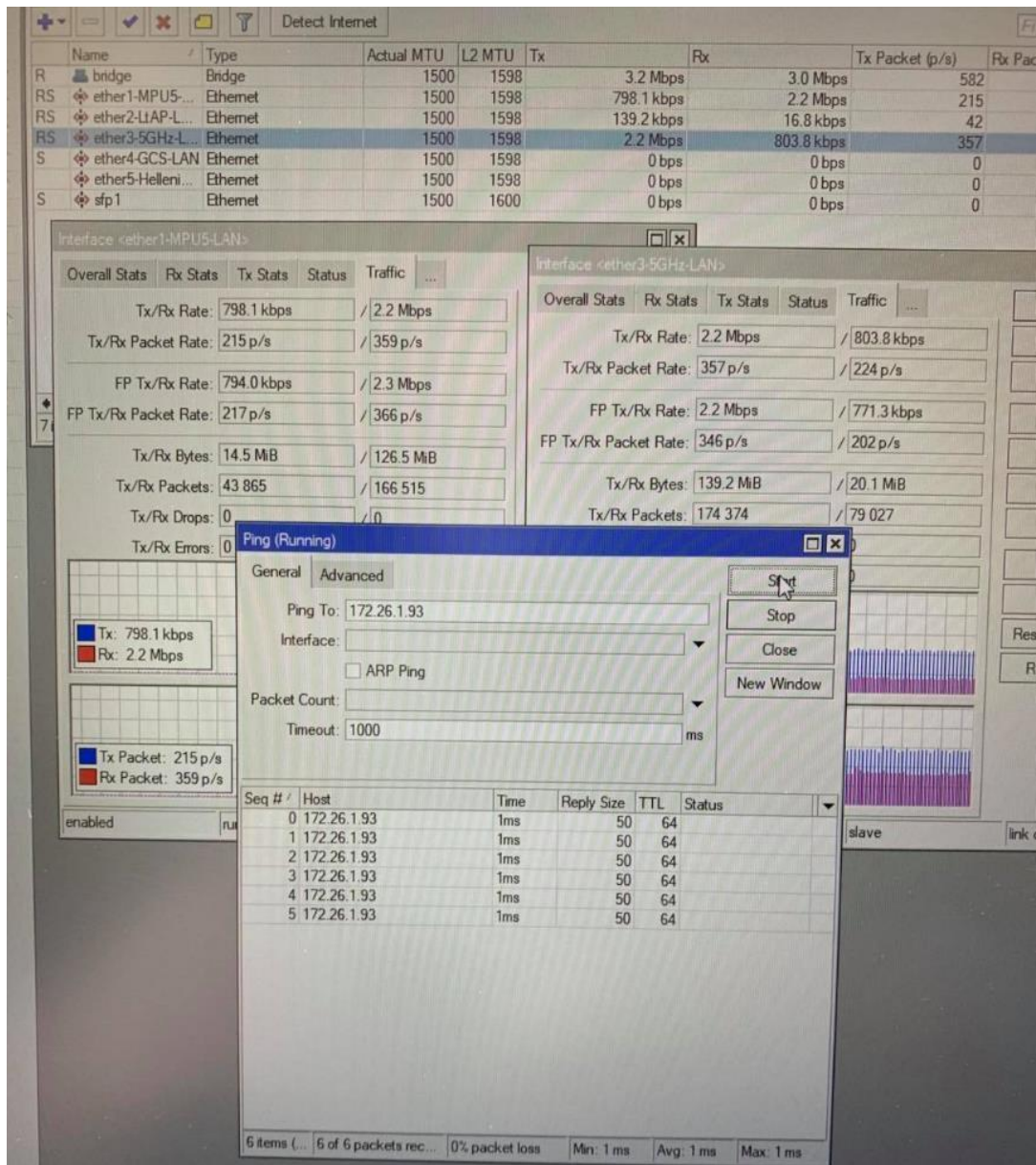
Επιπλέον οι μετρήσεις μεγεθών του δικτύου κατά τη διάρκεια των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών αποδεικνύουν υψηλά επίπεδα ανθεκτικότητας και ποιότητας που προσφέρει το μελετώμενο δίκτυο επικοινωνιών. Αναλυτικότερα ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) δεν επιρρεάστηκε κατά την ενεργοποίηση πομπών και κυμάνθηκε σε τιμές μεγαλύτερες του 40.

Τα router boards που εξόπλιζαν τον σταθμό εδάφους του συστήματος (Σταθμός Βάσης No1) παρείχαν την δυνατότητα παρακολούθησης της ρυθμαπόδοσης δεδομένων του δικτύου, γεγονός που θα έκανε εμφανή οποιαδήποτε δυσλειτουργία ή μειωμένη απόδοση του συστήματος. Η ρυθμαπόδοση δεδομένων μεταξύ των κόμβων κυμαινόταν σε επίπεδα υψηλότερα των 40Mbps (Mega bit per second) καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών, τιμή που μπορεί να υποστηρίξει ακόμα και την μεταγωγή βίντεο υψηλής ανάλυσης με μεγάλη άνεση. Ορισμένες φορές η τιμή αυτή υπερέβαινε και τα 60 Mbps σε κάποιους κόμβους. Μέσω της τοπολογίας που του δικτύου που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο υπήρξε υπήρχε διαρκής μεταφορά δεδομένων προς τον σταθμός βάσης No2. Και στο μέγεθος αυτός δεν παρατηρήθηκε καμία συσχέτιση της ενεργοποίησης των πομπών με την ρυθμαπόδοση δεδομένων.



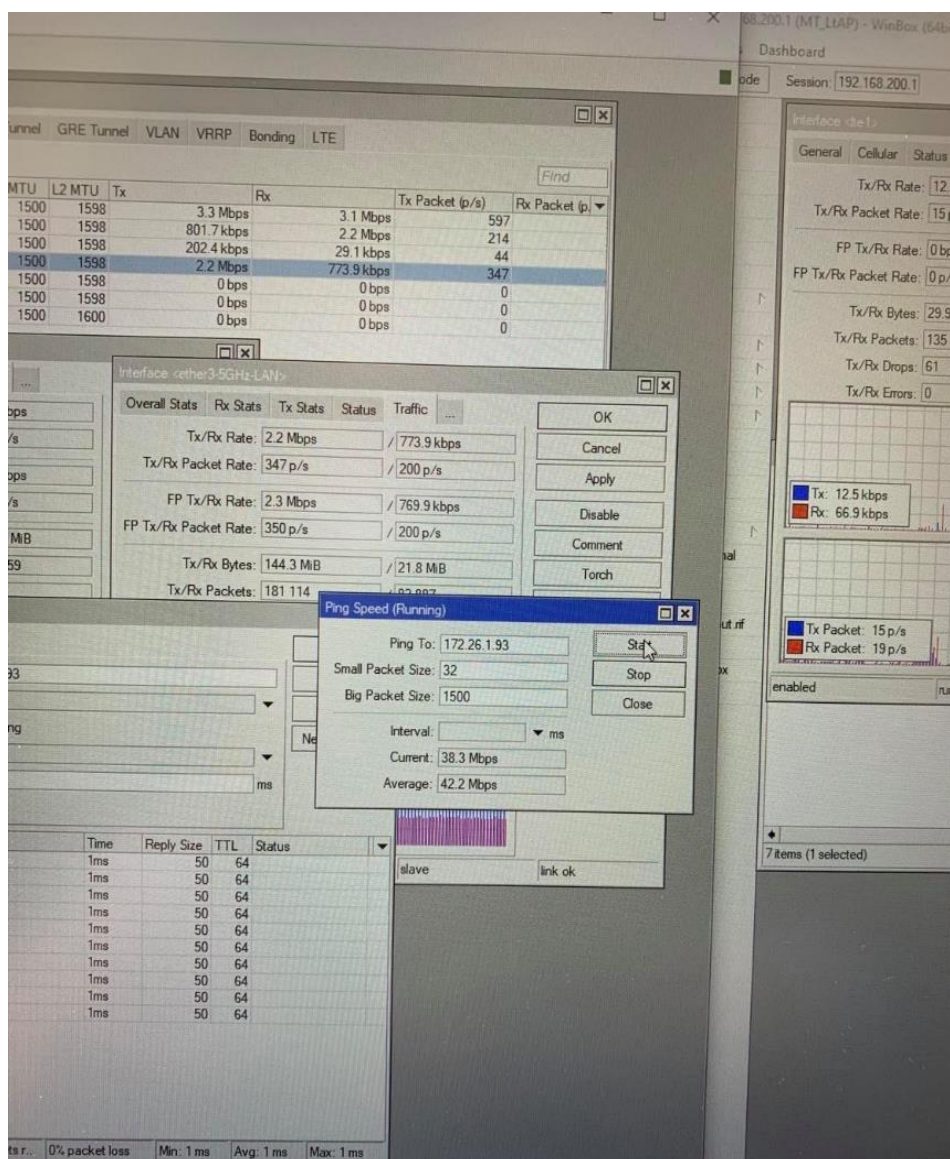
## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



Εικόνα 36. Στιγμιότυπο λογισμικού Winbox. Εμφανείς οι απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης και οι χρόνοι υστέρησης.

Από την Εικόνα 36 και την Εικόνα 37 παρατηρούμε ότι ακόμη και σε συνθήκες πλήρους φόρτου δικτύου (42.2Mbps) και εναλλαγή subnet για τον διαμοιρασμό των δεδομένων σε κρυπτογραφημένο δίκτυο, ο μέσος χρόνος υστέρησης ήταν 2ms.

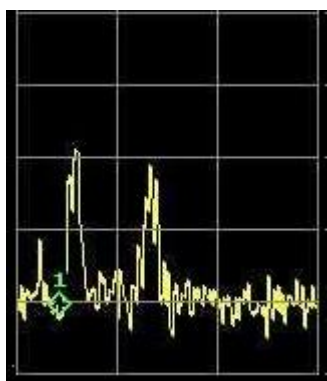


Εικόνα 37: Στιγμιότυπο λογισμικού Winbox. Εμφανείς οι απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης και οι χρόνοι υστέρησης.

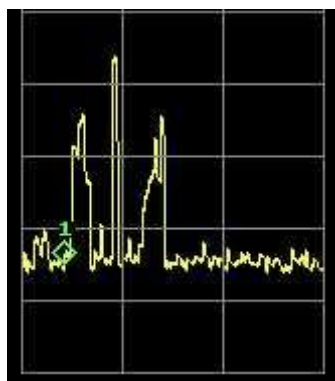
B. Δευτερεύουσα ζεύξη (χειροκίνητος έλεγχος).

Διαπιστώθηκε ότι η δευτερεύουσα ζεύξη του δικτύου (χειροκίνητος έλεγχος) εκπέμπει στη περιοχή συχνοτήτων UHF. Η εκπομπή αυτή εμφανίζει σχετικά σταθερή φασματική εικόνα αποτελούμενη από δύο «πλευρικές ζώνες» με εύρος περί τα 40 MHz έκαστη, σε θέσεις περίπου  $\pm 50$  MHz γύρω από την «κεντρική ζώνη».

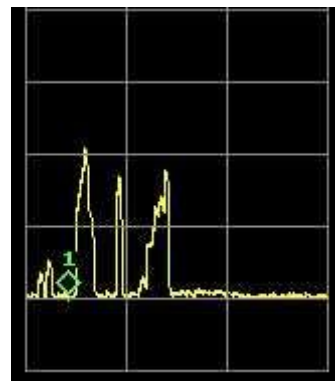




(β) Επιλογή «Normal»



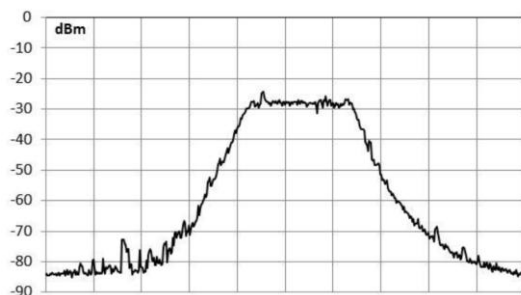
(β) Επιλογή «Max Hold»



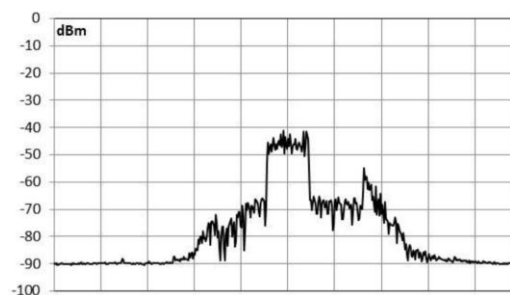
(γ) Επιλογή «Average» (N=50)

Εικόνα 38: Απεικονίσεις εκπομπής στην περιοχή συχνοτήτων UHF

Η κεντρική αυτή ζώνη είναι πολύ πιο στενή, καταλαμβάνοντας εύρος λιγότερο από 0,5 MHz γύρω από τη φέρουσα συχνότητα όπως διαπιστώθηκε με λεπτομερέστερη σάρωση που φαίνεται στην Εικόνα 39.



(α) Επιλογή «Max Hold»



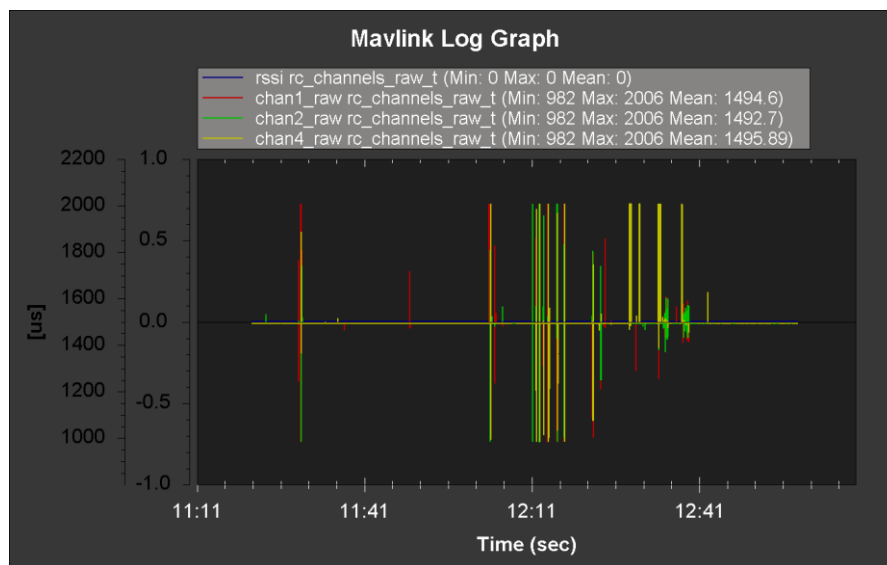
(β) Επιλογή «Average» (N=50)

Εικόνα 39: Απεικονίσεις κεντρικής ζώνης εκπομπής στην περιοχή συχνοτήτων UHF

Η διαφορά μορφής μεταξύ των εικόνων «Max Hold» και «Average» είναι αρκετά εμφανής και ίσως να υποδηλώνει υπέρθεση περισσότερων σημάτων. Οι δύο «πλευρικές ζώνες» γύρω από την «κεντρική» έχουν εικόνα που προσομοιάζει στην γνωστή εικόνα της διαμόρφωσης πλάτους, αλλά το εύρος τους φαίνεται ασυνήθιστα μεγάλο για αυτή την κατηγορία διαμόρφωσης. Η περαιτέρω διερεύνηση του σήματος δεν κατέστη δυνατή λόγω της σχετικά μικρής διακριτικής ικανότητας συχνότητας (σχετικά μεγάλου Resolution Bandwidth – RBW = 3 MHz, ήτοι η default τιμή του αναλυτή φάσματος) που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να απεικονισθεί η αρκετά



μεγάλη περιοχή συχνοτήτων UHF – L – S (300 – 4.000 MHz) με μικρό χρόνο σάρωσης, και διότι στην περιοχή συχνοτήτων κάτω από το 1 GHz η χρονοκεραία λήψης βρίσκεται εκτός προδιαγραφών.



**Εικόνα 40: Μετρήσεις βασικών καναλιών ελέγχου (roll, pitch,yaw) ανα ενεργοποίηση συστήματος σε εύρος PWM 982-2006 micro second καταγραφικού (log).**

Κατά τη διάρκεια των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, από τα στοιχεία του τοπικού χειριστή και τα εσωτερικά δεδομένα, διαπιστώνουμε ότι το σύνολο των εντολών από το χειριστήριο ελέγχου, καθώς και τα δεδομένα δευτερεύουσας τηλεμετρίας μεταφέρθηκαν από και προς το αερόχημα με μέγιστη υστέρηση τα 3ms. Να σημειωθεί ότι το σύνολο των δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε Range Test mode όπως ορίζει ο κατασκευαστής, θέτοντας το χειριστήριο στο 1/100 της συνολικής ισχύς εκπομπής.

#### Γ. Σύστημα δορυφορικής ναυτιλίας (GNSS)

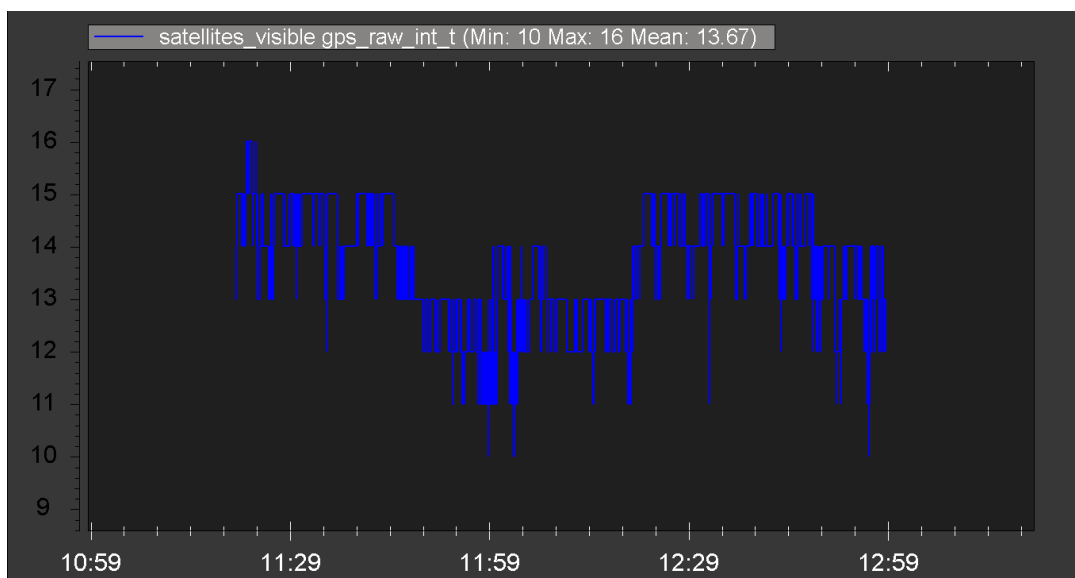
Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατέδειξαν τα υψηλά επίπεδα ακρίβειας (μέση οριζόντια απόκλιση περί τα 120cm και μέση απόκλιση ύψους περί τα 70cm) του δέκτη GPS και την συσχέτιση της με τον αριθμό δορυφόρων, όπως δείχνουν οι



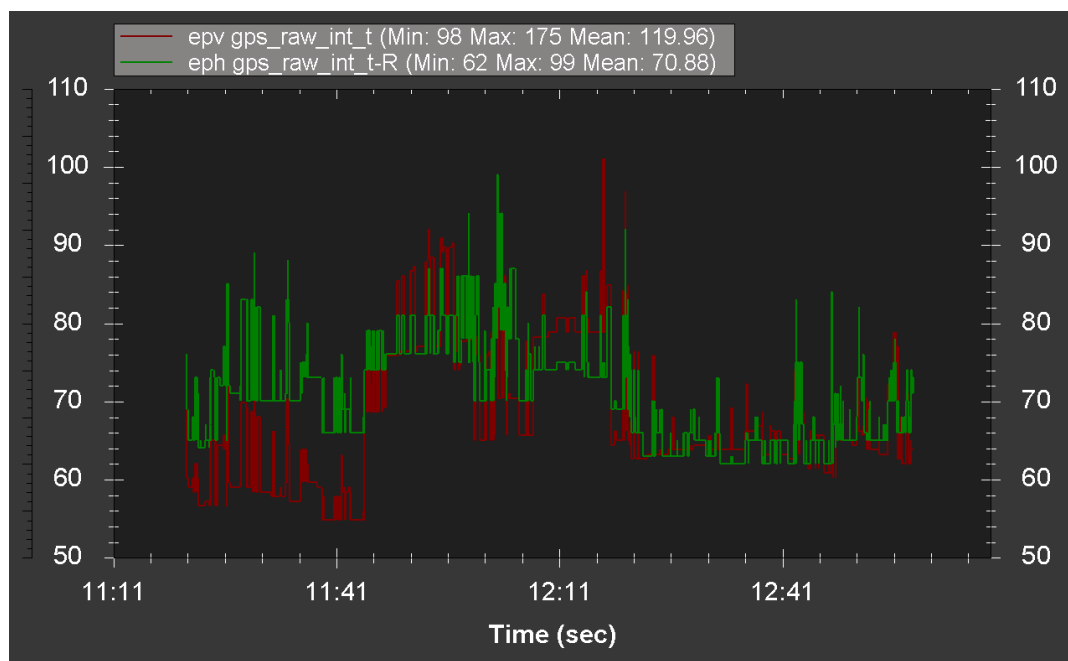
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ**  
**ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»**

---

παρακάτω εικόνες. Διαπιστώθηκε επίσης απουσία συσχέτισης με την ενεργοποίηση των συσκευών ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών.



**Εικόνα 41: Μετρήσεις εμφανών δορυφόρων καταγραφικού (log).**



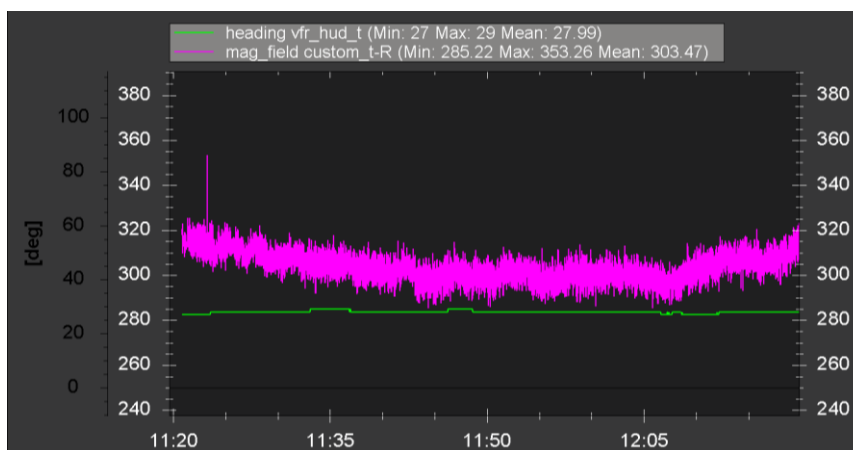
**Εικόνα 42: Τυπική απόκλιση οριζόντιου και κάθετου σφάλματος αισθητήρα GPS ΣμηΕΑ (cm).**



Δ. Ηλεκτρομαγνητικά πεδία (Μαγνητικές πυξίδες - INS).

Από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν η αρχική τιμή της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος χώρου (ambient noise), για όλη την μπάνα συχνοτήτων ήταν ένταση ηλεκτρικού πεδίου (E field) 20V/m και ένταση μαγνητικού πεδίου (B field) 90μT. Κατά τη διάρκεια των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών οι τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E field) ήταν 30V/m και η τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου (B field) 100μT. Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου μετρήθηκε πλησίον του καταστρώματος του πλοίου (σημείο όπου θεωρητικά έχει τη μέγιστη τιμή του, λόγω των φερομαγνητικών υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένο).

Επίσης ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα δεδομένα που συλλέχθηκαν από στη συστοιχία μαγνητικών πυξίδων της μονάδας Inertial Measurement Unit (IMU), καθώς δύναται να επηρεαστεί με την επαφή ή από-προσέγγιση σε μεγάλες μεταλλικές επιφάνειες όπως πλοία και πηγές υψηλού ηλεκτρομαγνητικού φορτίου.



Εικόνα 43: Μετρήσεις Μαγνητικού πεδίου και Διεύθυνσης καταγραφικού (log).

Από τις παραπάνω μετρήσεις δεν παρατηρούμε μεταβολή που να συσχετίζεται με την ενεργοποίηση συστημάτων του πλοίου και σε καμία περίπτωση διακύμανση τιμών πέραν των φυσιολογικών, τόσο σε στάση όσο και σε αιώρηση.





Το σύνολό των ανωτέρω μετρήσεων επιβεβαίωσαν τις προδιαγραφές των συσκευών που αποτελούν τους σταθμούς βάσης ως προς τα χαρακτηριστικά του σήματος εκπομπής (περιοχή συχνότητας, τύπος ψηφιακής διαμόρφωσης και μετάδοσης του σήματος), όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης διαπιστώθηκε η αντοχή του συστήματος (κύρια ζεύξη – δίκτυο επικοινωνιών, δευτερεύουσα ζεύξη – τοπικός χειριστής) κατά την λειτουργία τους σε περιβάλλον με έντονες ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές. Επιπλέον δεν παρατηρήθηκαν παρεμβολές ή αλλοιώσεις στα συστήματα δορυφορικής ναυτιλίας (GNSS) είτε του σκάφους, είτε του πλοίου φορέα των δοκιμών. Τέλος επιβεβαιώθηκε η αντοχή του συστήματος ναυτιλίας του σκάφους (INS) στη λειτουργία σε περιβάλλον με υλικά και ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές που επηρεάζουν το μαγνητικό πεδίο.

## 5.2 Δοκιμές σε σενάρια πραγματικών αποστολών

Εφόσον διαπιστώθηκε η δυνατότητα λειτουργίας του συστήματος σε απαιτητικά περιβάλλοντα από θέμα ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών και παρεμβολών, προγραμματίστηκαν και εκτελέστηκαν δοκιμές σε σενάρια πραγματικών αποστολών, σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Σκοπός τους ήταν να μελετηθεί η απόδοση του συστήματος σε σενάρια που προσομοιάζουν πραγματικές αποστολές, κυρίως στο χώρο της άμυνας, ώστε να αποδειχθεί η δυνατότητα αξιόπιστης εκτέλεσής τους και να βαθμονομηθεί η εμβέλεια κάλυψης των κόμβων του δικτύου.

### 5.2.1 Μεθοδολογία δοκιμών σε σενάρια πραγματικών αποστολών

Για την επίτευξη των τεθέντων για τις δοκιμές σκοπών στα πλαίσια των αποστολών που καθορίστηκαν, για το υπό ανάπτυξη δίκτυο στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέχθηκε η εκτέλεση δοκιμών σε σενάρια επιτήρησης (κυρίως



θαλασσιών οδών) και υποστήριξης ειδικών επιχειρήσεων σε χερσαίο περιβάλλον. Η μέθοδος βασίστηκε στην επιμέτρηση και σύγκριση των τιμών των υπό εξέταση ζεύξεων με τις αντίστοιχες τιμές μάρτυρα (Μ.Ο. των τιμών από τις δοκιμές που περιγράφηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο 5.1.), καθώς και στην αδιάλειπτη μετάδοση πληροφοριών σε όλους του κόμβους του δικτύου. Τα δύο σενάρια που δοκιμάστηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω ήταν η εκτέλεση επιτήρησης θαλασσιών οδών και η υποστήριξη ομάδων επιχειρήσεων σε χερσαίο περιβάλλον, κυρίως ως κόμβος επικοινωνιών.

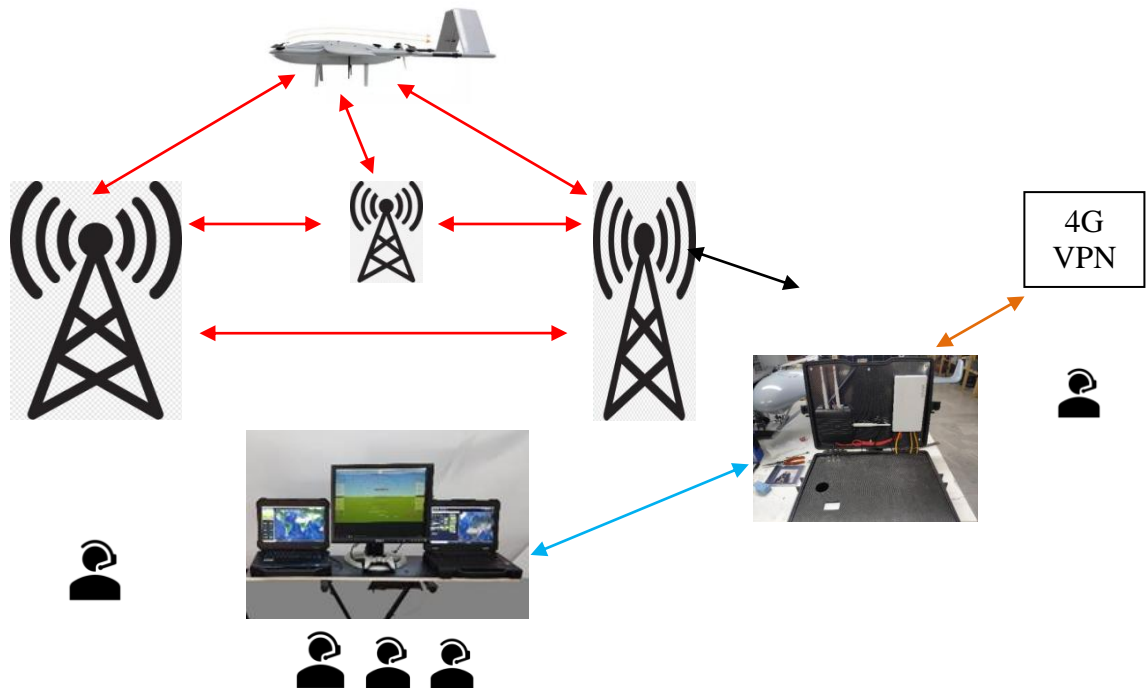
#### 5.2.1.1 Εκτέλεση σεναρίου επιτήρησης θαλασσιών οδών

Αρχικά επιλέχθηκε η εκτέλεση σεναρίου επιτήρησης θαλασσιών οδών, στο πλαίσιο του οποίου θα δοκιμάζονταν η εμβέλεια των κόμβων του συστήματος για ρυθμαπόδοση πληροφορίας είτε μικρού όγκου δεδομένων (τηλεμετρία, τηλεκατεύθυνση, δεδομένα στόχων), είτε μεγάλου όγκου δεδομένων (βίντεο υψηλής ανάλυσης). Στη δοκιμή αυτή θα δημιουργηθεί ένα ασύρματο δίκτυο, του οποίου σκοπός θα είναι η μεταφορά των πληροφοριών από τους αισθητήρες του αεροχήματος φορέα του ιπτάμενου κόμβου σε απομακρυσμένους σταθερούς κόμβους.

Η τοπολογία υλοποίησης του ασύρματου δικτύου κατά την παρούσα δοκιμή, δίνεται από το σκαρίφημα που ακολουθεί. Σε αυτό επισημαίνονται τα τρία δίκτυα /υποδίκτυα (subnet) και οι ζεύξεις μεταξύ αυτών. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι ασύρματες ζεύξεις μεταξύ των κόμβων του ασύρματου δικτύου (των σταθμών εδάφους και του σταθμού επί του αεροχήματος). Με μαύρο χρώμα συμβολίζεται η ενσύρματη σύνδεση της κεραίας με τον κόμβο επικοινωνιών με τα υπόλοιπα υποδίκτυα. Με μπλε χρώμα συμβολίζεται η ενσύρματη ή ασύρματη ζεύξη του κόμβου επικοινωνιών με το σταθμό εδάφους και τις οθόνες προβολής. Με πορτοκαλί χρώμα συμβολίζεται η ασύρματη ζεύξη με απομακρυσμένους χρήστες μέσω του δικτύου 4G.

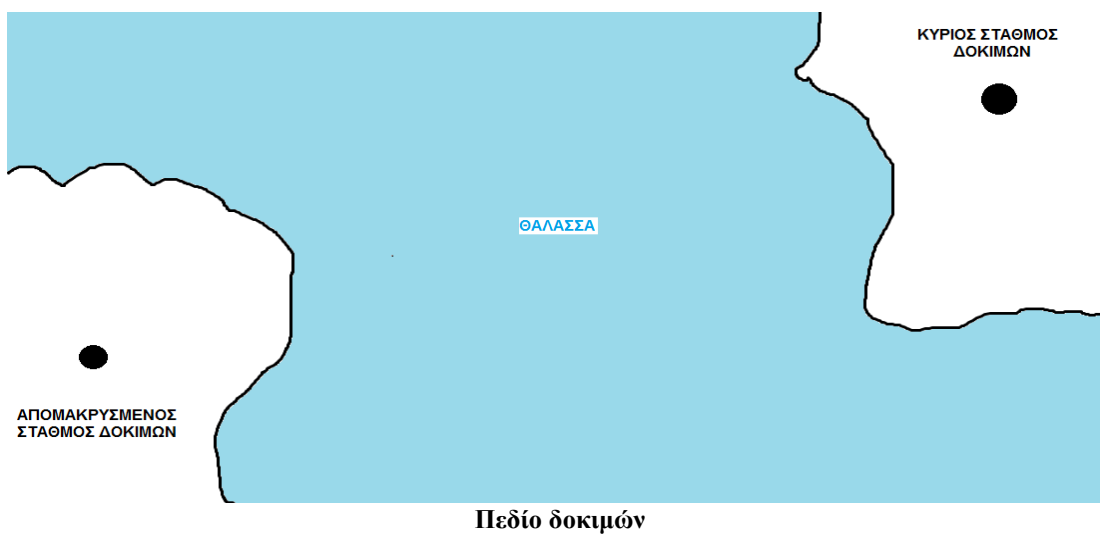


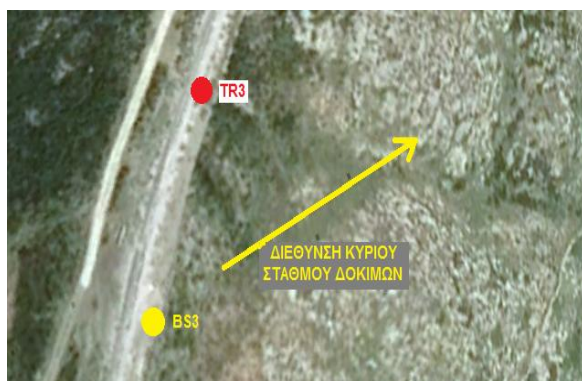
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΛΑΒΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ  
ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



Εικόνα 44: Τοπολογία ασύρματου δικτύου ΣμηΕΑ και υποστηρικτικών δικτύων (δοκιμή θαλασσίου ελέγχου).

Οι θέσεις των συσκευών και οι αποστάσεις των διαφόρων πομπών από τους κόμβους του εξεταζόμενου δικτύου παρουσιάζονται στο σκαρίφημα και τον πίνακα που ακολουθεί.





Απομακρυσμένος σταθμός δοκιμών



Κύριος σταθμός δοκιμών

Εικόνα 45: Διάταξη εξοπλισμού δοκιμών θαλασσίου ελέγχου.

Στα παραπάνω σχήματα με το σύμβολο BS χαρακτηρίζονται οι σταθμοί βάσης του δικτύου επικοινωνιών (κίτρινο χρώμα) και με το σύμβολο TR (κόκκινο) χαρακτηρίζονται οι πομποί ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν για προσομοίωση κυρίως συσκευών ραντάρ. Η απόσταση του κύριου σταθμού δοκιμών από τη θάλασσα ήταν 3.600 μέτρα, ενώ του απομακρυσμένου σταθμού 4.700 μέτρα. Η απόσταση μεταξύ των δύο τοποθεσιών ήταν 120 χιλιόμετρα, προσομοιάζοντας με αυτό τον τρόπο τις μέγιστες αποστάσεις μεταξύ των νησιών του Αιγαίου πελάγους, περιοχή στην οποία σύμφωνα με τις προδιαγραφές αποστολών του τετάρτου κεφαλαίου θα κληθεί το σύστημα να επιχειρήσει, καθώς επίσης και για την επαλήθευση των οριακών τιμών εμβέλειας σύμφωνα με όσα μελετήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ακόμη πρέπει να αναφερθεί ότι οι θέσεις των σταθμών βάσης επιλέχθηκαν ώστε να αποφευχθούν τυχόν τυφλά σημεία που δημιουργούνταν από εμπόδια (Η θέση των σταθμών BS1 και BS2 παρέχει κάλυψη 180° στον κύριο σταθμό δοκιμών καθώς υπήρχαν κτίσματα μπροστά από τον σταθμό BS1. Το ύψος τοποθέτησης των σταθμών δοκιμών ήταν τέτοιο ώστε να μην υπάρχουν ανάμεσα τους όγκοι ξηράς), καθώς η μετάδοση του σήματος γίνεται σε περιοχές Line of Site.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Πίνακας 16: Αποστάσεις μεταξύ του εξοπλισμού κατά τις δοκιμές θαλασσίου Ελέγχου.

Α/Α	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΜΠΟΥ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ (μέτρα)		
		ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ 1 (BS1)	ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ 2 (BS2)	ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ 3 (BS3)
TR1	Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων X (8GHz-10GHz) και μέγιστη ισχύ εκπομπής έως 10KW (Υψόμετρο 676m)*	53	48	120.000
TR2	Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων S (3,1GHz-3,3GHz) και ισχύ εκπομπής έως 30KW (Υψόμετρο 676m)*	56	45	120.000
TR3	Πομπός με κεραία μονοκατευθυντικής εκπομπής στη ζώνη συχνοτήτων K (20GHz-40GHz) και μέγιστη ισχύ εκπομπής έως 20KW (Υψόμετρο 724m)*	120.000	120.000	40
BS1	Σταθμός βάσης 1 (Υψόμετρο 685m)*	---	72	120.000
BS2	Σταθμός βάσης 2 (Υψόμετρο 691m)*	72	---	120.000
BS3	Σταθμός Βάσης 3 (Υψόμετρο 724m)*	120.000	120.000	---

\*Το υψόμετρο των θέσεων προσμετράται από την επιφάνεια της θάλασσας (Above Sea Level – ASL)

Για τις ανάγκες των δοκιμών εκτελέστηκαν πτήσεις από τον κύριο σταθμό δοκιμών με κατεύθυνση προς τον απομακρυσμένο, αρχικά σε αποστάσεις έως και 20 χιλιομέτρων με ενεργοποίηση ενός σταθμού βάσης (BS1) και έπειτα με ενεργοποίηση δύο σταθμών (BS1 και BS2). Στο επόμενο και τελευταίο κομμάτι των δοκιμών αυτών η πτήση εκτελέστηκε σε απόσταση έως και 30 χιλιόμετρα με ταυτόχρονη ενεργοποίηση και των τριών σταθμών βάσης (BS1, BS2, BS3). Επίσης καθ' όλη την διάρκεια των πτήσεων, οι τρεις πομποί (TR1, TR2, TR3) ήταν ενεργοποιημένοι.



Για την λεπτομερή ανάλυση και αξιολόγηση των πτήσεων, οι τιμές του συνόλου των υποσυστημάτων/ αισθητήρων του αεροχήματος καταγράφονταν με υπερυψηλό ρυθμό ανανέωσης δειγματοληψίας (1000Hz), τόσο στο σταθμό εδάφους, όσο και στο αερόχημα με χρήση του λογισμικού του σταθμού εδάφους, του αεροχήματος φορέα του δικτύου και του ενσωματωμένου λογισμικού των συσκευών επικοινωνίας του δικτύου. Μετά την ολοκλήρωση της κάθε πτήσης θα πραγματοποιείται πρόσκτηση του αρχείου μετρήσεων (log file) του αεροχήματος με χρήση φορητού υπολογιστή με εγκατεστημένο λογισμικό πρωτοκόλλου Mavlink και σύγκριση με μετρήσεις επιτυχημένων δοκιμών για την αναγνώριση ανωμαλιών. Επίσης ανάκτηση της καταγραφής του video της κάμερας φορτίου (payload), από τον υπολογιστή σταθμού εδάφους και εξέτασή του για τυχόν ασυνέχειες και αλλοίωση ποιότητας.

#### **5.2.1.2 Σενάριο υποστήριξης ομάδων επιχειρήσεων σε χερσαίο περιβάλλον**

Το τελευταίο σενάριο στο οποίο εκτελέστηκε δοκιμή ήταν αυτό της υποστήριξης ομάδων επιχειρήσεων σε χερσαίο περιβάλλον. Σε αυτό δοκιμάστηκε η δυνατότητα λειτουργίας του εναέριου κόμβου ως ρελέ επικοινωνιών, μέσω του οποίου θα διέρχονται η επικοινωνία μεταξύ των ομάδων επιχειρήσεων, η επικοινωνία των ομάδων με το κέντρο επιχειρήσεων, καθώς και θα πραγματοποιούταν διαμοιρασμός της εικόνας των αισθητήρων του αεροχήματος φορέα προς όλους τους κόμβους.

Η τοπολογία υλοποίησης του ασύρματου δικτύου κατά την παρούσα δοκιμή, δίνεται από το παρακάτω σκαρίφημα, στο οποίο επισημαίνονται τα τρία δίκτυα /υποδίκτυα (subnet) και οι ζεύξεις μεταξύ αυτών. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι ασύρματες ζεύξεις μεταξύ των κόμβων του ασύρματου δικτύου (των ομάδων επιχειρήσεων, του σταθμού εδάφους και του σταθμού επί του αεροχήματος). Με μαύρο χρώμα συμβολίζεται η ενσύρματη σύνδεση της κεραίας με τον κόμβο

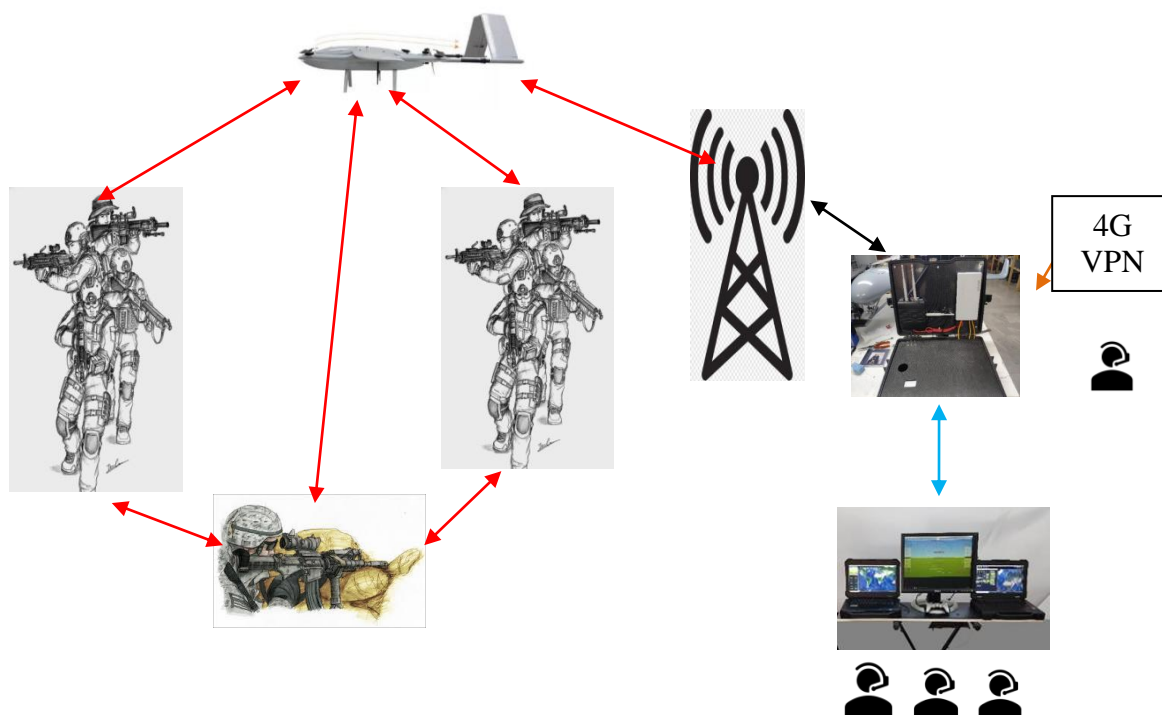




## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

επικοινωνιών με τα υπόλοιπα υποδίκτυα. Με μπλε χρώμα συμβολίζεται η ενσύρματη ή ασύρματη ζεύξη του κόμβου επικοινωνιών με το σταθμό εδάφους και τις οθόνες προβολής. Με πορτοκαλί χρώμα συμβολίζεται η ασύρματη ζεύξη με απομακρυσμένους χρήστες μέσω του δικτύου 4G.



**Εικόνα 46: Τοπολογία ασύρματου δικτύου ΣμηΕΑ και υποστηρικτικών δικτύων (δοκιμή υποστήριξης ομάδων επιχειρήσεων).**

Ο σταθμός εδάφους εγκαταστάθηκε σε απόσταση περίπου 1,5 χιλιομέτρων από την περιοχή ενδιαφέροντος, όπου επιχειρούσαν δύο ομάδων επιχειρήσεων και ζεύγους παρατηρητών. Για τις ανάγκες των δοκιμών εκτελέστηκαν πτήσεις πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος, σε ύψος από 340 έως 400 μέτρα, για υποστήριξη των ομάδων που επιχειρούσαν εκεί.

Για την λεπτομερή ανάλυση και αξιολόγηση των πτήσεων, οι τιμές του συνόλου των υποσυστημάτων/ αισθητήρων του αεροχήματος καταγράφονταν με υπερυψηλό ρυθμό ανανέωσης δειγματοληψίας (1000Hz), τόσο στο σταθμό εδάφους,





όσο και στο αερόχημα με χρήση του λογισμικού του σταθμού εδάφους, του αεροχήματος φορέα του δικτύου και του ενσωματωμένου λογισμικού των συσκευών επικοινωνίας του δικτύου. Μετά την ολοκλήρωση της κάθε πτήσης θα πραγματοποιείται πρόσκτηση του αρχείου μετρήσεων (log file) του αεροχήματος με χρήση φορητού υπολογιστή με εγκατεστημένο λογισμικό πρωτοκόλλου Mavlink και σύγκριση με μετρήσεις επιτυχημένων δοκιμών για την αναγνώριση ανωμαλιών. Επίσης ανάκτηση της καταγραφής του video της κάμερας φορτίου (payload), από τον υπολογιστή σταθμού εδάφους και εξέτασή του για τυχόν ασυνέχειες και αλλοίωση ποιότητας.

### 5.2.2 Αποτελέσματα δοκιμών σε σενάρια πραγματικών αποστολών

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την εκτέλεση των δοκιμών σε σενάρια πραγματικών αποστολών ομαδοποιήθηκαν ανά αποστολή και παρουσιάζονται παρακάτω.

#### A. Σενάρια επιτήρησης θαλασσίων οδών

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών οι οποίες έλαβαν χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, κατέστη δυνατή η αδιάκοπη λήψη βίντεο σε πραγματικό χρόνο, με ρυθμό μετάδοσης 6Mbps, από τον οπτικό αισθητήρα του αεροχήματος, σε αποστάσεις πτήσης έως και 30 χιλιομετρων LOS από τον κύριο σταθμό δοκιμών, όπως διαπιστώνεται και από την Εικόνα 47. Οι λήψη των πληροφοριών αυτών δεν επηρεάστηκε από τις υφιστάμενες ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές.



6 χιλιόμετρα



10,5 χιλιόμετρα



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



12,3 χιλιόμετρα (νύχτα)



29 χιλιόμετρα

Εικόνα 47: Θαλάσσιοι στόχοι σε διάφορες αποστάσεις πτήσεων.

Επίσης η μελέτη των δεδομένων θέσεως του αεροχήματος δεν κατέδειξε παρεμβολές ή αλλοιώσεις στα συστήματα δορυφορικής ναυτιλίας (GNSS).



Εικόνα 48: Δεδομένα θέσεως αεροχήματος μέσω συστήματος δορυφορικής ναυτιλίας.

Τέλος στις δοκιμές που διεξήχθησαν με τον απομακρυσμένο σταθμό δοκιμών, δεν κατέστη δυνατή η μεταφορά βίντεο σε αποστάσεις 90 – 120 χιλιομέτρων LOS. Ωστόσο επιτεύχθηκε η αδιάλειπτη μεταφορά δεδομένων τηλεμετρίας, στοιχείων κόμβων και στοιχείων θέσης αυτών σε αποστάσεις έως και 120 χιλιομέτρων LOS, όπως επιβεβαιώνεται και από την παρακάτω εικόνα.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

MANET Monitor

NOTE: Only nodes with a) Wave Relay SA enabled and b) heard in the last five minutes will appear in the MANET Monitor

Nodes in Network: 4

Serial	Node Name	Node IP	Vector	Altitude	Battery	Receive SNR
	BS1	1.95	-	685m/2.2kft	82%	-
	BS2	1.107	72m/237ft SW	691m/2.3kft	89%	58dB
	UAV	1.31	7.4km/4.6mi WSW	775m/2.5kft	-	17dB
	BS3	1.101	120km/74.7mi WSW	724m/2.4kft	-	-

Εικόνα 49: Εικόνα των χαρακτηριστικών του δικτύου από το interface των κόμβων (δοκιμή σεναρίων επιτήρησης θαλασσίων οδών).

#### B. Σενάρια υποστήριξης χερσαίων επιχειρήσεων

Οι δοκιμές σε σενάρια υποστήριξης χερσαίων επιχειρήσεων πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες ημέρας και νύχτας, καταδεικνύοντας την επάρκεια του δικτύου στην υλοποίηση αυτού του είδους των επιχειρήσεων. Η χρήση του ιπτάμενου κόμβου του συστήματος ως κόμβου διασύνδεσης επικοινωνιών, μεταξύ των ομάδων που επιχειρούσαν στο έδαφος, αλλά και μεταξύ των ομάδων και του κέντρου επιχειρήσεων ήταν επιτυχής. Μέσω αυτού πραγματοποιούνταν αδιαλείπτως η μεταφορά βίντεο σε πραγματικό χρόνο από τους επικεφαλής της κάθε ομάδας και από τον οπτικό αισθητήρα του αεροχήματος, ηχητικών επικοινωνιών, θέσεων των ομάδων, εντολών για παροχή βοήθειας, ενεργειών υποστήριξης από τις ομάδες.



Εικόνα 50: Θέσεις ομάδων χερσαίων επιχειρήσεων (επαναλήπτης αρχηγού ομάδας).



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



**Εικόνα 51: Ταυτόχρονη ρυθμαπόδοση βίντεο από τους αρχηγούς των ομάδων και τον οπτικό αισθητήρα του αεροχήματος.**

Συναφώς των ανωτέρω συμπεραίνουμε ότι το συγκεκριμένο ασύρματο δίκτυο μη επανδρωμένων συστημάτων (με τις συγκεκριμένες διατάξεις κεραιών που έφεραν οι κόμβοι του), χωρίς να επηρεάζονται τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά από τις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές που χρησιμοποιήθηκαν και χωρίς να παρατηρούνται παρεμβολές ή αλλοιώσεις στα συστήματα δορυφορικής ναυτιλίας (GNSS) είτε του αεροχήματος φορέα, μπορεί:

α. Σε αποστάσεις έως 20 - 30 χιλιομέτρων LoS μεταξύ των κόμβων του, να μεταφέρει δεδομένα υψηλού φορτίου (βίντεο, εικόνες, ήχο, κ.α.) υποστηρίζοντας επιχειρήσεις θαλασσίου ελέγχου και υποστήριξης ομάδων επιχειρήσεων σε χερσαίο περιβάλλον.

β. Να μεταφέρει στοιχεία τηλεμετρίας του συστήματος, καθώς και στοιχεία θέσεων των μετεχόντων στο δίκτυο (αεροχημάτων, σταθμών, ομάδων επιχειρήσεων κ.α.) σε απόσταση έως 120 χιλιομέτρων LoS μεταξύ των κόμβων του.



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΧΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

Επιβεβαιώνοντας με τα παραπάνω τους θεωρητικούς υπολογισμούς των προηγούμενων κεφαλαίων.





## 6. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν οι κύριες παράμετροι (εύρος ζώνης, ρυθμός δεδομένων, διεκπεραίωση, αριθμός κόμβων, ισχύς μετάδοσης, κάλυψη, κατανάλωση ενέργειας, ασφάλεια δικτύου), η υλοποίηση και οι δοκιμές πεδίου σε ένα βεβαρυμένο περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικό εκπομπών, ενός επικοινωνιακού δικτύου χαμηλής κινητικότητας, το οποίο υλοποιείται με μη επανδρωμένα αεροχήματα. Το εν λόγω επικοινωνιακό δίκτυο είναι προσανατολισμένο για να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα άμυνας και ασφάλειας. Οι επιτόπιες δοκιμές επιβεβαίωσαν τις προδιαγραφές των στοιχείων των σταθμών βάσης, καθώς και τους θεωρητικούς υπολογισμούς της εμβέλειας, της αντοχής και της κατανάλωσης ενέργειας του συγκεκριμένου δικτύου επικοινωνιών, όπως παρουσιάζονται στην ενότητα 4, καταδεικνύοντας τα κάτωθι:

A. Τη συμπεριφορά του δικτύου ανάλογα με την απόσταση των συνδεδεμένων κόμβων, τόσο σε σχέση με τους έτερους κόμβους, όσο και με τους σταθμούς εδάφους.

Η θεωρητική μελέτη κατέδειξε ότι οι κόμβοι που διαθέτουν κεραιές χαμηλής απολαβής ( $G_{\text{antenna}} = 3 \text{ dB}$ ), όπως αυτές των μη επανδρωμένων αεροχημάτων, μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα υψηλού φορτίου (βίντεο, εικόνων, ήχου κ.λπ.) σε αποστάσεις έως 27 km LoS, καθώς και δεδομένων τηλεμετρίας συστήματος, θέσεως συμμετεχόντων στο δίκτυο (αεροσκάφη, σταθμοί, επιχειρήσεις ομάδων κ.λπ.) σε αποστάσεις έως 39 km LoS. Τα δεδομένα αυτά επαληθεύτηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις καθώς με χρήση παντοκατευθυντικών (omni) κεραιών χαμηλής απολαβής τόσο στο αεροσκάφος, όσο και στο σταθμό εδάφους εκτελέστηκε μεταφορά βίντεο σε απόσταση 29 Km LoS.

Επίσης με χρήση κατευθυντικών κεραιών υψηλής απολαβής ( $G_a = 13 \text{ dB}$ ), οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως από τους σταθμούς εδάφους, υπολογίστηκε



θεωρητικά η μεταφοράς δεδομένων υψηλού φορτίου (βίντεο, εικόνων, ήχου κ.λπ.) σε αποστάσεις έως 87 km LoS και η δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων τηλεμετρίας συστήματος, στόχων και τοποθεσίας συμμετεχόντων στο δίκτυο (αεροσκάφη, σταθμοί, επιχειρήσεις ομάδων κ.λπ.) σε αποστάσεις έως 124 km LoS. Η επαλήθευση για την μεταφορά δεδομένων τηλεμετρίας επαληθεύτηκε κατά τις δοκιμές σε σενάρια επιτήρησης θαλασσίων οδών όπου επιτεύχθηκε διατήρηση σύνδεσης και μεταφοράς δεδομένων σε απόσταση 120 Km μεταξύ σταθμού βάσης και αεροχήματος.

Από τα ανωτέρω απορρέει το συμπέρασμα ότι σε ένα δίκτυο που υλοποιείται με μηΕΑ, που φέρουν την επικοινωνιακή συσκευή που μελετήθηκε και επιλέχθηκε στο κεφάλαιο 4, οι ιπτάμενοι κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν σε αποστάσεις έως και 27 Km LoS μεταξύ τους για μεταφορά δεδομένων υψηλού φορτίου (βίντεο, εικόνων, ήχου κ.λπ.), ενώ ο σταθμός εδάφους μπορεί με κεραία υψηλής απολαβής μπορεί να βρίσκεται έως 85 Km LoS, από τα μηΕΑ που υλοποιούν το δίκτυο, ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη κεραία. Για μεταφορά μόνο δεδομένων τηλεμετρίας συστήματος, στόχων και τοποθεσίας συμμετεχόντων στο δίκτυο (αεροσκάφη, σταθμοί, επιχειρήσεις ομάδων κ.λπ.) οι αποστάσεις τροποποιούνται σε ως 39 Km LoS και 124 km LoS αντίστοιχα, ανάλογα την χρησιμοποιούμενη κεραία.

B. Ανθεκτικότητα του δικτύου κατά την λειτουργία του σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και την αλληλεπίδρασή του με άλλα δίκτυα επικοινωνιών που λειτουργούν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων.

Οι μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που διεξήχθησαν επιβεβαίωσαν τις προδιαγραφές της συσκευής για χρήση τεχνικών διασποράς φάσματος (spread spectrum) και συγκεκριμένα της μεθόδου διαπίδωσης συχνοτήτων (frequency hopping), η οποία καθιστά δύσκολα ανιχνεύσιμες τις εκπομπές των κόμβων του επικοινωνιακού δικτύου από τους αντιπάλους. Σε αυτό συμβάλει και η χαμηλή στάθμη του σήματος η οποία μετρήθηκε μόλις σε 40 dB πάνω από το





## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

επίπεδο θορύβου, σε ιδιαίτερα ευνοϊκές (πολύ μικρή απόσταση 7 με 8 μέτρα, γνωστή θέση του πομπού ώστε μια αρκετά κατευθυντική κεραία λήψης να σκοπεύσει προς αυτόν). Σε ρεαλιστικές επιχειρησιακές συνθήκες, ακόμη και με την ίδια ευχέρεια σκόπευσης με μια παρόμοια κατευθυντική κεραία, το εν λόγω περιθώριο των περίπου 40 dB πάνω από το επίπεδο θορύβου θα αναλωνόταν από τις απώλειες ελεύθερου χώρου σε περίπου 100πλάσια απόσταση (δηλ. απόσταση 700-800 μέτρων), απόσταση πολύ μικρή για τα επιχειρησιακές δυνατότητες του συστήματος.

Επιπλέον ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) δεν επηρεάστηκε κατά την ενεργοποίηση πομπών και κυμάνθηκε σε τιμές μεγαλύτερες του 40 αποδεικνύοντας υψηλά επίπεδα ανθεκτικότητας και ποιότητας που προσφέρει το μελετώμενο δίκτυο επικοινωνιών.

Επίσης η μέση τιμή της ρυθμαπόδοσης δεδομένων (throughput) μεταξύ των κόμβων κυμαινόταν σε επίπεδα υψηλότερα των 40Mbps καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών, τιμή που μπορεί να υποστηρίξει ακόμα και την μεταγωγή πολλαπλών βίντεο υψηλής ανάλυσης με μεγάλη άνεση, και δεν παρατηρήθηκε καμία συσχέτιση της ενεργοποίησης των πομπών με την ρυθμαπόδοση δεδομένων. Ορισμένες φορές η τιμή αυτή υπερέβαινε και τα 60 Mbps σε κάποιους κόμβους.

Ένα ακόμα μέγεθος το οποίο δεν επηρεάστηκε από τις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές, κατά τη διάρκεια των δοκιμών που εκτελέστηκαν, ήταν και ο μέσος χρόνος υστέρησης ο οποίος κυμάνθηκε στα 2ms, ακόμη και σε συνθήκες πλήρους φόρτου δικτύου (μέση τιμή 42.2Mbps).

Η συμπεριφορά των ανωτέρω μεγεθών δεν μεταβλήθηκε ούτε κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης δοκιμών σε πραγματικά σενάρια αποστολών, με την παρουσία και εκεί ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών στο ίδιο εύρος συχνοτήτων (S band) με αυτή του επικοινωνιακού δικτύου.



Τα ανωτέρω καταδεικνύουν την ανθεκτικότητα του δικτύου κατά την λειτουργία του είτε σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές, είτε κατά την αλληλεπίδρασή του με άλλα δίκτυα επικοινωνιών που λειτουργούν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων, και σε συνάρτηση με τους χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους και τεχνικές κρυπτοκάλυψης καθιστούν το δίκτυο ιδιαίτερα ασφαλές και αξιόπιστο.

Γ. Αλληλεπίδραση των εκπομπών του δικτύου κατά των διαύλων ναυτιλίας GNSS.

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τις δοκιμές EMC/EMI αποκάλυψαν τα υψηλά επίπεδα ακρίβειας του δέκτη GPS, καθώς η μέση οριζόντια απόκλιση μετρήθηκε περί τα 120cm και η μέση απόκλιση ύψους περί τα 70cm, και τον ικανοποιητικό εντοπισμό δορυφόρων του συστήματος GNSS (μονίμως περισσότερους από 10 δορυφόρους). Στις μετρήσεις αυτές δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές που να σχετίζονται είτε με την εκπομπή του μελετώμενου δικτύου επικοινωνιών, είτε από τις λοιπές εκπομπές που πραγματοποιήθηκαν.

Επιπλέον δεν παρατηρήθηκαν παρεμβολές ή αλλοιώσεις στα συστήματα δορυφορικής ναυτιλίας (GNSS) και στα συστήματα αδρανειακής ναυτιλίας (INS), είτε του πλοίου φορέα των δοκιμών EMC/EMI, είτε του αεροχήματος φορέα του κόμβου κατά το σύνολο των δοκιμών (δοκιμές EMC/EMI, δοκιμές σε πραγματικά σενάρια αποστολών).

Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν την ασφαλή λειτουργία του αναπτυσσόμενου δικτύου επικοινωνιών σχετιζόμενου με τα συστήματα ναυτιλίας (δορυφορικής ή αδρανειακής), είτε των αεροχημάτων φορέων του, είτε του πλοίου φορέα του συστήματος, καθώς δεν παρατηρήθηκε αλληλεπίδρασης μεταξύ τους.

Δ. Δυνατότητα των κόμβων του δικτύου για αυτό-διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας.



Στις μετρήσεις που λήφθηκαν κατά τις δοκιμές EMC/EMI παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση της μέσης ισχύος όταν πραγματοποιούνταν δοκιμή της ζεύξης με υψηλό ρυθμό δεδομένων. Αντίθετα όταν δεν υπήρχε φόρτος δεδομένων για μεταφορά από το δίκτυο η μέση ισχύς σχεδόν μηδενίζεται. Υποδεικνύοντας με τον τρόπο αυτό ότι το σύστημα εκπέμπει όταν έχει δεδομένα να μεταδώσει (και δεν εκπέμπει όταν δεν έχει).

Αντίστοιχα κατά τις δοκιμές σε πραγματικές αποστολές έγινε χρήση της δυνατότητας αυτό-ρύθμισης της ισχύος εκπομπής των επικοινωνιακών συσκευών ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους.

Από τα αποτελέσματα αυτά γίνεται αντιληπτή η δυνατότητα των κόμβων του δικτύου για αυτό-διαχείριση της ισχύος εκπομπής τους, βελτιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας τους προκειμένου να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος λειτουργίας του δικτύου και ο χρόνος πτήσης των μη επανδρωμένων συστημάτων που το υλοποιούν.

Ε. Επαρκής κάλυψη και χωρητικότητα δικτύου για τους τελικούς χρήστες.

Κατά τις δοκιμές EMC/EMI η ρυθμαπόδοση δεδομένων (throughput) μεταξύ των κόμβων κυμαινόταν σε επίπεδα υψηλότερα των 40Mbps καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών, τιμή που μπορεί να υποστηρίξει ακόμα και την μεταγωγή πολλαπλών βίντεο υψηλής ανάλυσης με μεγάλη άνεση, και δεν παρατηρήθηκε καμία συσχέτιση της ενεργοποίησης των πομπών με την ρυθμαπόδοση δεδομένων. Ορισμένες φορές η τιμή αυτή υπερέβαινε και τα 60 Mbps σε κάποιους κόμβους.

Επιπρόσθετα στα σενάρια πραγματικών δοκιμών, η κάλυψη και η χωρητικότητα του δικτύου ήταν επαρκής, καθώς κατά τις δοκιμές υποστήριξης



ομάδων επιχειρήσεων το δίκτυο παρείχε συνεχή κάλυψη στις ομάδες, μεταφέροντας ταυτόχρονα τρία βίντεο πραγματικού χρόνου, δεδομένα θέσεων των ομάδων, εντολές συμβάντων και δεδομένα τηλεμετρίας του ιπτάμενου κόμβου. Αντίστοιχα στις αποστολές επιτήρησης θαλασσιών οδών η παροχή βίντεο πραγματικού χρόνου ήταν συνεχής.

Από τα ανωτέρω επαληθεύτηκε η επαρκής κάλυψη και χωρητικότητα δικτύου για τους τελικούς χρήστες.

Όλα οι παραπάνω χαρακτηριστικά /δυνατότητες που διαπιστώθηκαν για το δίκτυο επικοινωνιών οδηγούν στο επίδειξη ενός κινητού αδόμητου δικτύου επικοινωνίας (MANET) χαμηλής κινητικότητας, που αποτελείται από μη επανδρωμένα αεροχήματα, ικανού να διατηρήσει επαρκή ροή πληροφοριών σε ένα εχθρικό θορυβώδες περιβάλλον. Το δίκτυο αυτό χάρις την αξιόπιστη και αποτελεσματική λειτουργία του, η οποία επιτεύχθηκε παρουσία ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, την χρήση κατάλληλης κρυπτογράφησης και διαμορφώσεων σημάτων εκπομπής είναι κατάλληλο να υποστηρίξει επιχειρήσεις, στον τομέα ασφάλειας ή/και άμυνας, θαλάσσιου ελέγχου (επιτήρηση θαλασσιών οδών, επιτήρηση θαλασσιών συνόρων, επιχειρήσεων έρευνας και διάσωσης), καθώς και ομάδων σε χερσαίο ή θαλάσσιο περιβάλλον.

Ωστόσο θα πρέπει να συνεχιστεί η μελέτη συμπλέγματος ιπτάμενων ad-hoc δικτύων υψηλής κινητικότητας βασισμένου σε UAV με βάση την τοπολογία πλέγματος, προκειμένου να αποκτηθούν περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων Mesh που υλοποιούνται με UAV, καθώς και την ανθεκτικότητά τους σε περιβάλλον βεβαρυμμένο λόγω ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών ή/και παρεμβολών από σύγχρονα συστήματα anti-drone.



### Βιβλιογραφία

#### α. Βιβλία

Adamy, D. (2009) *EW 103: tactical battlefield communications electronic warfare*. Boston ; London: Artech House (Artech House radar series).

Carlson, A.B. and Crilly, P.B. (2010) *Communication systems: an introduction to signals and noise in electrical communication*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education.

Comer, D. (2015) *Computer networks and internets*. Sixth edition, Global edition. Boston Columbus Indianapolis New York: Pearson (Always learning).

Frater, M. and Ryan, M. (2001) *Electronic Warfare for the Digitized Battlefield*.

Li, T., Song, T. and Liang, Y. (2018) ‘Wireless Communications under Hostile Jamming: Security and Efficiency’, in. Singapore: Springer Singapore. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0821-5>.

Maini, A.K. and Agrawal, V. (2011) *Satellite technology: principles and applications / Anil K. Maini, Varsha Agrawal*. 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, N.J: Wiley.

Misra, S., Misra, S.C. and Woungang, I. (eds) (2009) *Guide to wireless mesh networks*. London: Springer (Computer communications and networks).

Proakis, J.G. and Salehi, M. (2008) *Digital communications*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill.

Rappaport, T.S. (2002) *Wireless communications: principles and practice*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR (Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series).

Suojanen, M. (2018) *Military Communications in the Future Battlefield*. Artech House.

#### β. Νομοθεσία / Πρότυπα / Κρατικά έγγραφα

*Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems* (2019) *OJ L*. Available at: [http://data.europa.eu/eli/reg\\_del/2019/945/oj/eng](http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj/eng) (Accessed: 24 May 2023).



Cybersecurity Advisory (September 22) ‘Announcing the Commercial National Security Algorithm Suite 2.0’. National Security Agency. Available at: [https://media.defense.gov/2022/Sep/07/2003071834/-1/-1/0/CSA\\_CNSA\\_2.0\\_ALGORITHMS\\_.PDF](https://media.defense.gov/2022/Sep/07/2003071834/-1/-1/0/CSA_CNSA_2.0_ALGORITHMS_.PDF).

Dang, Q.H. (2015) *Secure Hash Standard*. NIST FIPS 180-4. National Institute of Standards and Technology, p. NIST FIPS 180-4. Available at: <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.180-4>.

*IP ratings / IEC* (no date). Available at: <https://www.iec.ch/ip-ratings> (Accessed: 23 August 2023).

*ISO - ISO 9001 and related standards — Quality management* (2021) ISO. Available at: <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html> (Accessed: 23 August 2023).

*ISO/IEC 18033-1:2021(en), Information security — Encryption algorithms — Part 1: General* (no date). Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:18033:-1:ed-3:v1:en> (Accessed: 23 August 2023).

*MIL-STD-461 F INTERFACE REQUIREMENTS CONTROL INTERFERENCE* (no date). Available at: [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461F\\_19035/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461F_19035/) (Accessed: 23 August 2023).

Technology, N.I. of S. and (2002) *Security Requirements for Cryptographic Modules*. Federal Information Processing Standard (FIPS) 140-2. U.S. Department of Commerce. Available at: <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.140-2>.

U.S. Army UAS Center of Excellence (2010) ‘“Eyes of the Army” U.S. Army Roadmap for Unmanned Aircraft Systems 2010 - 2035’.

*ΕΚΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΕ) 2019/947 ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ της 24ης Μαΐου 2019 για τους κανόνες και τις διαδικασίες που διέπουν τη λειτουργία μη επανδρωμένων αεροσκαφών* (2019) *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0947&from=EN#d1e706-45-1> (Accessed: 16 February 2023).

*ΝΟΜΟΣ 4635/2019 (Κωδικοποιημένος) - ΦΕΚ Α 167/30.10.2019* (no date). Available at: <https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/570631/nomos-4635-2019> (Accessed: 27 August 2023).





γ. Άρθρα

Adnan, N., Nordin, S.M. and Bahrudin, M.A. bin (2019) ‘Sustainable Interdependent Networks from Smart Autonomous Vehicle to Intelligent Transportation Networks’, in M.H. Amini et al. (eds) *Sustainable Interdependent Networks II*. Cham: Springer International Publishing (Studies in Systems, Decision and Control), pp. 121–134. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98923-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98923-5_7).

Boukoberine, M.N., Zhou, Z. and Benbouzid, M. (2019) ‘A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects’, *Applied Energy*, 255, p. 113823. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113823>.

Bujari, A. and Ronzani, D. (2017) ‘FANET Application Scenarios and Mobility Models’, in, pp. 43–46. Available at: <https://doi.org/10.1145/3086439.3086440>.

Cai, G., Dias, J. and Seneviratne, L. (2014) ‘A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends’, *Unmanned Systems*, 02(02), pp. 175–199. Available at: <https://doi.org/10.1142/S2301385014300017>.

Cambra, C. et al. (2016) ‘Ad hoc Network for Emergency Rescue System based on Unmanned Aerial Vehicles’, *Network Protocols and Algorithms*, 7(4), p. 72. Available at: <https://doi.org/10.5296/npa.v7i4.8816>.

Challita, U. et al. (2019) ‘Machine Learning for Wireless Connectivity and Security of Cellular-Connected UAVs’, *IEEE Wireless Communications*, 26(1), pp. 28–35. Available at: <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1800155>.

Chamola, V. et al. (2021) ‘A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques’, *Ad Hoc Networks*, 111, p. 102324. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>.

Dalamagkidis, K. (2015) ‘Classification of UAVs’, in K.P. Valavanis and G.J. Vachtsevanos (eds) *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 83–91. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1\\_94](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_94).

Do-Duy, T. et al. (2021) ‘Joint Optimisation of Real-Time Deployment and Resource Allocation for UAV-Aided Disaster Emergency Communications’, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(11), pp. 3411–3424. Available at: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3088662>.

Guo, W., Devine, C. and Wang, S. (2014) ‘Performance analysis of micro unmanned airborne communication relays for cellular networks’, in *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP)*. 2014





9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP), pp. 658–663. Available at: <https://doi.org/10.1109/CSNDSP.2014.6923909>.

Hankerson, D. and Menezes, A. (2011) ‘NSA Suite B’, in H.C.A. van Tilborg and S. Jajodia (eds) *Encyclopedia of Cryptography and Security*. Boston, MA: Springer US, pp. 857–857. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5906-5\\_648](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5906-5_648).

Hassanalian, M. and Abdelkefi, A. (2017) ‘Classifications, applications, and design challenges of drones: A review’, *Progress in Aerospace Sciences*, 91, pp. 99–131. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>.

Hui, K.-P., Phillips, D. and Kekirigoda, A. (2017) ‘Beyond Line-of-Sight range extension with OPAL using autonomous unmanned aerial vehicles’, in *MILCOM 2017 - 2017 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*. *MILCOM 2017 - 2017 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pp. 279–284. Available at: <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2017.8170774>.

Jerome, H. (2011) ‘802.11s Mesh Networking’. <https://www.cwnp.com/>. Available at: [https://www.cwnp.com/uploads/802-11s\\_mesh\\_networking\\_v1-0.pdf](https://www.cwnp.com/uploads/802-11s_mesh_networking_v1-0.pdf) (Accessed: 23 August 2023).

Jiang, X. *et al.* (2018) ‘Power and Trajectory Optimization for UAV-Enabled Amplify-and-Forward Relay Networks’, *IEEE Access*, 6, pp. 48688–48696. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2867849>.

Kaleem, Z. *et al.* (2019) ‘UAV-Empowered Disaster-Resilient Edge Architecture for Delay-Sensitive Communication’, *IEEE Network*, 33(6), pp. 124–132. Available at: <https://doi.org/10.1109/MNET.2019.1800431>.

Kaleem, Z., Ahmad, I. and Duong, T.Q. (2022) ‘Intelligent Unmanned Air Vehicles for Public Safety Networks: Emerging Technologies and Research Directions’, in Z. Kaleem, I. Ahmad, and Trung Quang Duong (eds) *Intelligent Unmanned Air Vehicles Communications for Public Safety Networks*. Singapore: Springer Nature (Unmanned System Technologies), pp. 1–17. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1292-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1292-4_1).

Khan, M.A., Qureshi, I.M. and Khanzada, F. (2019) ‘A Hybrid Communication Scheme for Efficient and Low-Cost Deployment of Future Flying Ad-Hoc Network (FANET)’, *Drones*, 3(1), p. 16. Available at: <https://doi.org/10.3390/drones3010016>.

Krishna, C.G.L. and Murphy, R.R. (2017) ‘A review on cybersecurity vulnerabilities for unmanned aerial vehicles’, in *2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*. *2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*, pp. 194–199. Available at: <https://doi.org/10.1109/SSRR.2017.8088163>.



Lee, J.S. *et al.* (2020) ‘Group Connectivity-Based UAV Positioning and Data Slot Allocation for Tactical MANET’, *IEEE Access*, 8, pp. 220570–220584. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042795>.

Li, P. and Xu, J. (2018) ‘UAV-Enabled Cellular Networks with Multi-Hop Backhubs: Placement optimization and Wireless Resource Allocation’, in *2018 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). 2018 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, pp. 110–114. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICCS.2018.8689218>.

Mohamed, N. *et al.* (2020) ‘Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities’, *Technological Forecasting and Social Change*, 153, p. 119293. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.05.004>.

Pasandideh, F. *et al.* (2022) ‘A Review of Flying Ad Hoc Networks: Key Characteristics, Applications, and Wireless Technologies’, *Remote Sensing*, 14(18), p. 4459. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs14184459>.

Rohde, S. and Wietfeld, C. (2012) ‘Interference Aware Positioning of Aerial Relays for Cell Overload and Outage Compensation’, in *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2012.6399121>.

Saad, W., Bennis, M. and Chen, M. (2020) ‘A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems’, *IEEE Network*, 34(3), pp. 134–142. Available at: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>.

Sayeed, M.A. and Kumar, R. (2018) ‘An Efficient Mobility Model for Improving Transmissions in Multi-UAVs Enabled WSNs’, *Drones*, 2(3), p. 31. Available at: <https://doi.org/10.3390/drones2030031>.

Shahzadi, R. *et al.* (2021) ‘UAV assisted 5G and beyond wireless networks: A survey’, *Journal of Network and Computer Applications*, 189, p. 103114. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103114>.

Shahzadi, R., Ali, M. and Naeem, M. (2022) ‘UAV Placement and Resource Management in Public Safety Networks: An Overview’, in Z. Kaleem, I. Ahmad, and T.Q. Duong (eds) *Intelligent Unmanned Air Vehicles Communications for Public Safety Networks*. Singapore: Springer Nature (Unmanned System Technologies), pp. 19–49. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1292-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1292-4_2).

Shakhatreh, H. *et al.* (2019) ‘Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges’, *IEEE Access*, 7, pp. 48572–48634. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>.



Shakoor, S. *et al.* (2019) ‘Role of UAVs in Public Safety Communications: Energy Efficiency Perspective’, *IEEE Access*, 7, pp. 140665–140679. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942206>.

Su, Y. (2021) ‘A Trust Based Scheme to Protect 5G UAV Communication Networks’, *IEEE Open Journal of the Computer Society*, 2, pp. 300–307. Available at: <https://doi.org/10.1109/OJCS.2021.3058001>.

Thibbotuwawa, A. *et al.* (2019) ‘Energy Consumption in Unmanned Aerial Vehicles: A Review of Energy Consumption Models and Their Relation to the UAV Routing’, in J. Świątek, L. Borzemski, and Z. Wilimowska (eds) *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2018*. Cham: Springer International Publishing (Advances in Intelligent Systems and Computing), pp. 173–184. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99996-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99996-8_16).

Vo, N.-S., Duong, T.Q. and Guizani, M. (2015) ‘Quality of Sustainability Optimization Design for Mobile Ad Hoc Networks in Disaster Areas’, in *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7417093>.

Wang, Q. *et al.* (2018) ‘Joint Power and Trajectory Design for Physical-Layer Secrecy in the UAV-Aided Mobile Relaying System’, *IEEE Access*, 6, pp. 62849–62855. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2877210>.

Zhan, P., Yu, K. and Swindlehurst, A.L. (2011) ‘Wireless Relay Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Performance and Optimization’, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 47(3), pp. 2068–2085. Available at: <https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5937283>.

Zhang, M. *et al.* (2016) ‘Unmanned Aerial Vehicle Route Planning in the Presence of a Threat Environment Based on a Virtual Globe Platform’, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(10), p. 184. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijgi5100184>.

Zhi, Y. *et al.* (2020) ‘Security and Privacy Issues of UAV: A Survey’, *Mobile Networks and Applications*, 25(1), pp. 95–101. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11036-018-1193-x>.

δ. Πανεπιστημιακές εργασίες / σημειώσεις

Capela, C.J.R. (2012) *Protocol of Communication for VORsat Satelate*. Master Thesis. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.



Available at: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68297/1/000154799.pdf> (Accessed: 17 August 2023).

Maupin, M.S. (2016) *Fighting the network: MANET management in support of littoral operations*. Thesis. Monterey, California: Naval Postgraduate School. Available at: <https://calhoun.nps.edu/handle/10945/48561> (Accessed: 24 May 2023).

Pothitos, M. (2015) *Multi-Sensor Image Fusion for Target Recognition in the Environment of Network Decision Support Systems*: Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center. Available at: <https://doi.org/10.21236/AD1009200>.

Πάλλης, Ε. *et al.* (2021) 'Επικοινωνίες Δεδομένων'. *Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Μη Επανδρωμένα Αυτόματα και Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα', Α' εξάμηνο*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

ε. Ιστοσελίδες

*AEGEAN SEA Ship Traffic Live Map / Marine Vessel Traffic* (no date). Available at: <https://www.marinevesseltraffic.com/AEGEAN-SEA/ship-traffic-tracker> (Accessed: 30 May 2023).

*Augustin-Jean Fresnel* (no date). Available at: <https://www.scientificlib.com/en/Physics/Biographies/AugustinJeanFresnel.html> (Accessed: 17 August 2023).

Chang, K.H., KALEEM, Z. and HUI, B. (2016) 'System and method to mitigate interference of 3GPP LTE heterogeneous network according to priority of service'. Available at: <https://patents.google.com/patent/US9369969B2/en> (Accessed: 27 August 2022).

Dancraggs, O.A.V. (2007) *Deutsch: Die Fresnelsche Zone ist ein gedachtes Rotationsellipsoid, in dessen Brennpunkten die beiden Antennen stehen und über dessen Rand der Umweg für das reflektierte Signal eine halbe Wellenlänge beträgt*. Available at: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FresnelSVG.svg> (Accessed: 18 August 2023).

Krdzalic, Y. (no date) *MIL-STD-810 Overview: Everything You Need To Know*. Available at: <https://www.trentonsystems.com/blog/mil-std-810g-overview-rugged-computers> (Accessed: 23 August 2023).

*Lives saved in EU Mediterranean operations (2015-2023)* (2023). Available at: <https://www.consilium.europa.eu/el/infographics/saving-lives-sea/> (Accessed: 30 May 2023).



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΙΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

---

*Migration flows: Eastern, Central and Western routes* (2023). Available at: <https://www.consilium.europa.eu/el/infographics/migration-flows-to-europe/> (Accessed: 30 May 2023).

‘The Top 20 Drone Service Provider Ranking’ (2018) *DRONELIFE*, 8 March. Available at: <https://dronelife.com/2018/03/08/top-20-drone-service-provider-ranking/> (Accessed: 15 February 2023).