

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών
Μηχανικών
www.uniwa.gr
Θηβών 250, Αιγάλεω 12244



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY of ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics
Engineering
www.uniwa.gr
250, Thivon Str., Athens, GR-12244

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Επικοινωνίες & Δίκτυα Δεδομένων

Master of Science in
Data Communications and Networking

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σκόπιμες Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές
σε Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα
με τη Χρήση Υψηλής Ισχύος Παλμικών Μικροκυματικών Κυματομορφών
Συχνότητας 1,5 GHz - 2,5 GHz



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Μιχαήλ Χαρβαλάκος, ΑΜ: dcom-15
Επιβλέπων: Στυλιανός Σαββαΐδης, Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών
Μηχανικών
www.uniwa.gr
Θηβών 250, Αιγάλεω 12244



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY of ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics
Engineering
www.uniwa.gr
250, Thivon Str., Athens, GR-12244

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Επικοινωνίες & Δίκτυα Δεδομένων

Master of Science in
Data Communications and Networking

MSc Thesis

Intentional Electromagnetic Interference
on Unmanned Aerial Vehicles
Using Pulsed High-Power Microwaves
with Frequency of 1.5 GHz – 2.5 GHz



Student: Michael Charvalakos, Registration Number: dcom-15
MSc Thesis Supervisor: Savaidis Stylianos, Professor

ATHENS, APRIL 2022

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Στυλιανός Σαββαΐδης	Νικόλαος Σταθόπουλος	Στυλιανός Μυτιληναίος
Καθηγητής	Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής

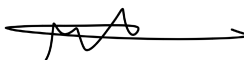
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μιχαήλ Χαρβαλάκος του Φιλήμονος, με αριθμό μητρώου dcsm-15, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και 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. Τέλος, βεβαιώνω ότι η εργασία αυτή δεν έχει κατατεθεί στο πλαίσιο των απαιτήσεων για τη λήψη άλλου τίτλου σπουδών ή επαγγελματικής πιστοποίησης πλην του παρόντος.

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

Ο Δηλών



Μιχαήλ Χαρβαλάκος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Μιχαήλ Χαρβαλάκος

Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΠΜΣ Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων

Copyright © Μιχαήλ Χαρβαλάκος, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η περιγραφή της διερεύνησης των αποτελεσμάτων που προκαλεί η εκπομπή παλμικών μικροκυματικών σημάτων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, σε drone και η ερμηνεία των κρίσιμων παραμέτρων του παλμού που επηρεάζουν δραστικά τη λειτουργία τους.

Μέχρι σήμερα μεγάλος αριθμός μελετών έχει ως αντικείμενο την εξέταση των δυσμενών αποτελεσμάτων που μπορεί να επιφέρει η έκθεση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε παλμικό σήμα, προκαλώντας συμβάντα στιγμιαίων και αναστρέψιμων δυσλειτουργιών τους έως και την ολική καταστροφή τους. Ο σκοπός της παρούσας μελέτης διαφοροποιείται επί του συγκεκριμένου θέματος σε δύο (2) βασικά στοιχεία, όπως παρακάτω:

1. Στη διερεύνηση της πιθανότητας εντοπισμού συχνοτήτων – συχνοτικών περιοχών στη ζώνη 1,5 – 2,5 GHz, όπου η επίδραση του παλμικού σήματος προκαλεί άμεσα και κρίσιμα αποτελέσματα στη λειτουργία του drone με τη χρήση δεδομένης και σταθερής ισχύος παλμού.

2. Στον έλεγχο της παραμετροποίησης του παλμικού σήματος, μέσω εκτέλεσης πειραμάτων, για τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών του παλμού που ενδεχομένως να αποτελεί ισχυρό παράγοντα πρόκλησης της σχετικής επίδρασης στο drone.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανηχοϊκός Θάλαμος, Διάρκεια Παλμού, Ηλεκτρομαγνητικά Σήματα Υψηλής Ισχύος, Ηλεκτρομαγνητικός Παλμός, Κύκλος Εργασίας Παλμού, Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα, Μικροκυματικοί Παλμοί Υψηλής Ισχύος, Σκόπιμες Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές, Συχνότητα Επανάληψης Παλμών

ABSTRACT – MAIN PURPOSE

Main purpose of this study is to describe the results that occurs when a micro-drone is exposed to microwave pulsed signals of different characteristics every time and an effort to realize what may be the crucial parameter that cause the disorders.

Up to now, many studies all over the world aimed to find the adverse results of circuits' exposition to microwave pulse. The range of the consequences are ranged from instant and reversible disorders to total destruction of the circuit. This study differs from the known others at two significant points, as follow:

1. It aims at finding some frequencies or frequency range between 1,5-2,5 GHz that disorders appears to be instant and crucial at drone's operation, taking for granted pulse's power level.

2. The study, by experimental data, of the characteristics of pulse signal that may powerfully affect the drone's disorders.

KEYWORDS

Anechoic Chamber, Drones, Duty Cycle, Electromagnetic Pulse, EMP, High Power Electromagnetics, High Power Microwaves, HPEM, HPM, IEMI, Intentional Electromagnetic Interference, Pulse Repetition Frequency (PRF), Pulse Width, Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπον καθηγητή κ.κ Σαββαΐδη Στυλιανό για την καθοδήγησή του και τα κίνητρα που μου προσέφερε, καθ' όλη τη διάρκεια της διδασκαλίας, καθώς και στην οικογένεια μου για την υποστήριξη και υπομονή που έχει επιδείξει στην προσπάθεια της ακαδημαϊκής μου επιμόρφωσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΣΕΛ.

1.	Εισαγωγή	1
1.1	Σκοπός της Εργασίας.....	1
1.2	Αντικείμενο Ενδιαφέροντος.....	1
1.3	Ερευνητικό Ερώτημα.....	1
1.4	Εισαγωγικές-Βασικές Έννοιες.....	3
1.4.1	Ηλεκτρομαγνητικός Παλμός.....	3
1.4.2	Περιγραφή Παλμικής Κυματομορφής.....	3
1.4.3	Κατηγορίες Κυματομορφών σημάτων.....	5
1.4.4	Βασικοί Παράμετροι RF σημάτων.....	6
1.5	Πλαίσιο Αντιμετώπισης Κακόβουλης δραστηριότητας με χρήση drone.....	7
1.6	Βασικές Αρχές και Εφαρμογές.....	8
1.7	Μεθοδολογία Έρευνας.....	9
1.8	Δομή Πτυχιακής Εργασίας.....	10
2.	Βιβλιογραφική Μελέτη για Καθορισμό Βάσης Εργασίας	12
2.1	Εισαγωγή.....	12
2.2	Τρωτότητα των Ηλεκτρονικών Διατάξεων στον Η/Μ Παλμό...	12
2.3	Μελέτη Επίδρασης Μικροκυματικού Παλμού Υψηλής Ισχύος στα ΜΕΑ.....	16
2.4	Μελέτη Πρόκλησης Δυσλειτουργίας στα Κανάλια Επικοινωνίας και Χειρισμού των ΜΕΑ.....	22
2.5	Μελέτη Κατηγοριοποίησης και Τρωτών Σημείων των ΜΕΑ.....	23
3.	Πειραματική Διαδικασία Εύρεσης κατάλληλης Συχνότητας στο Εύρος 1,5 – 2,5 GHz για την προσβολή ΜΕΑ	27
3.1	Πειραματικός Εξοπλισμός	27
3.1.1	Γενικά.....	27
3.1.2	Γεννήτρια παραγωγής σημάτων βασικής ζώνης (baseband signals).....	27
3.1.3	Γεννήτρια Διαμόρφωσης.....	28
3.1.4	Συσκευή Ενίσχυσης Ισχύος Παλμών.....	29
3.1.5	Φίλτρο - Κυκλοφορητής.....	29
3.1.5	Κεραία Εκπομπής.....	31
3.1.6	Όργανο Μέτρησης Πεδίου.....	33
3.2	Διάταξη Παραγωγής Μικροκυματικού Παλμού.....	34
3.3	Περιγραφή του ΜΕΑ - Στόχου.....	36
3.4	Ανηχοϊκός Θάλαμος.....	39
4.	Θεωρητική Προσέγγιση και Πειραματικά Αποτελέσματα	40
4.1	Θεωρητική Προσέγγιση Εύρεσης Βέλτιστης Συχνότητας.....	40
4.1.1	Διάκριση Περιοχών Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου και Ιδιότητες.....	41
4.1.2	Ένταση Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου.....	44
4.1.3	Σύζευξη λόγω Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου.....	46
4.2	Αλγόριθμος Εκτέλεσης Πειραματικής Διαδικασίας.....	48
4.3	Εκτέλεση Πειραματικής Διαδικασίας.....	55
4.4	Αποτελέσματα Πειραμάτων.....	56
4.4.1	Αρχικοποίηση των Μετρήσεων.....	56
4.4.2	Καταγραφή Αποτελεσμάτων.....	57

4.5	Μαθηματικός Έλεγχος Βέλτιστων Συχνοτήτων.....	73
4.6	Έλεγχος Παραμέτρων Διαμόρφωσης Παλμού.....	75
5.	Συμπεράσματα και Περαιτέρω Προοπτικές	82
5.1	Τελικά Συμπεράσματα.....	82
5.2	Περαιτέρω Προοπτικές και Μελλοντικές Εφαρμογές.....	85
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΕΙΚΟΝΩΝ		ΣΕΛ.
Εικόνα 1.1	Πειράματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας για την αποτίμηση των επιπτώσεων των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε ΜΕΑ.....	2
Εικόνα 1.2	Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός παλμικά διαμορφωμένου σήματος.....	4
Εικόνα 1.3	Κατηγοριοποίηση RF σημάτων.....	5
Εικόνα 1.4	Παράμετροι Σημάτων RF Παλμικής Διαμόρφωσης.....	6
Εικόνα 1.5	Ενεργειακό Κατώφλι Πρόκλησης Δυσλειτουργίας ή Βλάβης λόγω έκθεσης ηλεκτρονικών διατάξεων σε Παλμό.....	9
Εικόνα 2.1	Αποτελεσματικότητα Θωράκισης σε σχέση με τη συχνότητα.....	15
Εικόνα 2.2	Σχέση Ενέργειας με Διάρκεια Παλμού.....	16
Εικόνα 2.3	Ανηχοϊκός Θάλαμος Εκτέλεσης Πειραμάτων.....	17
Εικόνα 2.4	Ποσοστιαία Καταγραφή Ορθών Μηνυμάτων Τηλεμετρίας στη ζώνη 470 έως 862 MHz.....	18
Εικόνα 2.5	Ποσοστιαία Καταγραφή Ορθών Μηνυμάτων Τηλεμετρίας στη ζώνη 1,4 έως 2,7GHz.....	19
Εικόνα 2.6	Μεταβολή Αριθμού Λαθών ανά Συχνότητα.....	19
Εικόνα 2.7	Καταγραφή Δεδομένων Αισθητήρων ανά Συχνότητα.....	20
Εικόνα 2.8	Καταγραφή Διακοπής Λειτουργίας GPS ανά Συχνότητα...	20
Εικόνα 2.9	Παρακολούθηση Λειτουργίας Ασύρματου Καναλιού με παρεμβολή στη ζώνη 471 έως 861 MHz.....	21
Εικόνα 2.10	Παρακολούθηση Λειτουργίας Ασύρματου Καναλιού με παρεμβολή στη ζώνη 1,4 έως 2,68 GHz.....	21
Εικόνα 2.11	Παραμετροποίηση Ακτινοβολητών.....	22
Εικόνα 2.12	Τοπολογία Πειράματος.....	24
Εικόνα 2.13	Κατώφλι Πεδίου για Πρόκληση Παρεμβολής.....	25
Εικόνα 3.1	Γεννήτρια Παραγωγής Σημάτων Rohde & Schwarz SMB 100A.....	26
Εικόνα 3.2	Επίπεδο Ισχύος Γεννήτριας με τη μεταβολή της Συχνότητας.....	27
Εικόνα 3.3	Γεννήτρια Διαμόρφωσης RF κυματομορφών Agilent 33220A.....	27
Εικόνα 3.4	Διαμόρφωση Παλμού.....	28
Εικόνα 3.5	Ενισχυτής BONN Elektronik TWAP 0103-1000.....	29
Εικόνα 3.6	Λειτουργία Travelling Wave Tube (TWT).....	29
Εικόνα 3.7	Φίλτρο HD 30267-Αμε ζώνη διέλευσης 1,5 - 2,5 GHz.....	30
Εικόνα 3.8	Κυκλοφορητής Raditek.....	30
Εικόνα 3.9	Συνδεσμολογία Κυκλοφορητή.....	31
Εικόνα 3.10	Κεραία ATH800M5GAτης εταιρείας Amplifier Research	31
Εικόνα 3.11	Διάγραμμα Κατευθυντικότητας Κεραίας (ανά πόλωση) στο Εύρος Συχνοτήτων της.....	32
Εικόνα 3.12	Κέρδος Κεραίας σε dbi στο Εύρος Συχνοτήτων Λειτουργίας της.....	32

Εικόνα 3.13	Πεδιόμετρο Narda NBM.....	33
Εικόνα 3.14	Περιβάλλον Εφαρμογής NBM-TS για διαχείριση πεδιόμετρου NARDA.....	34
Εικόνα 3.15	Τοπολογία και Διασύνδεση Συσκευών.....	34
Εικόνα 3.16	Τοπολογία και Διασύνδεση Συσκευών για την παραγωγή και διαμόρφωση σήματος.....	35
Εικόνα 3.17	Συνδεσμολογία στο οπίσθιο μέρος του ενισχυτή BONN	35
Εικόνα 3.18	Πάνελ εισόδου καλωδιώσεων εντός του ανηχοϊκού θαλάμου.....	36
Εικόνα 3.19	Drone Qunam Nova Pro.....	36
Εικόνα 3.20	Χειριστήριο Ελέγχου Drone Qunam Nova Pro.....	37
Εικόνα 3.21	Εσωτερικό Drone Qunam Nova Pro.....	38
Εικόνα 3.22	Ελεγκτής Drone Qunam Nova Pro.....	38
Εικόνα 4.1	Ηλεκτρομαγνητικό κύμα και επιμέρους πεδία.....	41
Εικόνα 4.2	Ηλεκτρομαγνητικό κύμα και κεραία χοάνης.....	43
Εικόνα 4.3	Περιοχές διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	43
Εικόνα 4.4	RMS τιμή ενός ημιτονικού σήματος στο χρόνο.....	45
Εικόνα 4.5	Γραφική αναπαράσταση της μέσης τιμή του πεδίου.....	45
Εικόνα 4.6	Κυκλωματική Απεικόνιση Σύζευξης MEA.....	46
Εικόνα 4.7	Αλγοριθμική διαδικασία 1 ^{ου} σταδίου εργασίας.....	48
Εικόνα 4.8	Πρόσθια όψη Γεννήτριας και μενού επιλογών για παραμετροποίηση του σήματος παλμού.....	50
Εικόνα 4.9	Web Interface της γεννήτριας σήματος.....	50
Εικόνα 4.10	Χωροταξική Κατανομή Πειραματικού Εξοπλισμού.....	51
Εικόνα 4.11	Web Interface του πεδιόμετρου NARDA.....	51
Εικόνα 4.12	Προεπισκόπηση του συγκεντρωτικού πίνακα αποτελεσμάτων.....	52
Εικόνα 4.13	Αλγοριθμική διαδικασία 2 ^{ου} σταδίου εργασίας.....	52
Εικόνα 4.14	Αλγοριθμική διαδικασία 3 ^{ου} σταδίου εργασίας.....	53
Εικόνα 4.15	Απόκριση MEA στην εκπομπή παλμού (HEAD 1).....	58
Εικόνα 4.16	Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (HEAD 1).....	59
Εικόνα 4.17	Απόκριση MEA στην εκπομπή παλμού (HEAD2).....	60
Εικόνα 4.18	Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (HEAD2).....	61
Εικόνα 4.19	Απόκριση MEA στην εκπομπή παλμού (BOTTOM 1)...	62
Εικόνα 4.20	Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (BOTTOM 1).....	63
Εικόνα 4.21	Απόκριση MEA στην εκπομπή παλμού (BOTTOM 2)...	64
Εικόνα 4.22	Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (BOTTOM2).....	65
Εικόνα 4.23	Απόκριση MEA στην εκπομπή παλμού (SIDE 1).....	66
Εικόνα 4.24	Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (SIDE 1).....	66
Εικόνα 4.25	Απόκριση MEA στην εκπομπή παλμού (SIDE 2).....	68
Εικόνα 4.26	Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (SIDE2).....	68
Εικόνα 4.27	Μεταβολή Ηλεκτρικού Πεδίου στις διάφορες διατάξεις....	69
Εικόνα 4.28	Απόκριση του drone Quantum Nova Pro στην έκθεση του σε Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό ανά συχνότητα.....	69
Εικόνα 4.29	Απόκριση του drone Quantum Nova Pro στην έκθεση του σε Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό συχνότητας 1,77 και 1,86 GHz.....	70

Εικόνα 4.30 Απόκριση του drone Quantum Nova Pro στην έκθεση του σε Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό στις συχνότητες 2,27 έως 2,5 GHz.....	71
Εικόνα 4.31 Απόκριση του drone Quantum Nova Pro στην έκθεση του σε Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό στη συχνότητα 2,46 GHz.....	72

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΣΕΛ.

Πίνακας 3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κεραίας ATH800M5GA.....	33
Πίνακας 3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Drone Qunam Nova Pro.....	37
Πίνακας 4.1 Χρήσιμα Μεγέθη και Μονάδες Μέτρησης κατά S.I.....	41
Πίνακας 4.2 Υπολογισμός έκτασης περιοχών πεδίου ανά συχνότητα.	44
Πίνακας 4.3 Παραμετροποίηση της κυματομορφής του παλμού.....	54
Πίνακας 4.4 Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη HEAD 1.....	57
Πίνακας 4.5 Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη HEAD2.....	59
Πίνακας 4.6 Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη BOTTTOM 1.....	61
Πίνακας 4.7 Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη BOTTTOM 2.....	64
Πίνακας 4.8 Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη SIDE 1.....	65
Πίνακας 4.9 Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη SIDE2.....	67
Πίνακας 4.10 Καταγραφή Συχνοτήτων που προκαλούν παρεμβολή και ευάλωτες διατάξεις.....	73
Πίνακας 4.11 Υπολογισμός Δείκτη Αξιολόγησης (A) ανά Συχνότητα στο εύρος 1,5 έως 2 GHz.....	74
Πίνακας 4.12 Υπολογισμός Δείκτη Αξιολόγησης (A) ανά Συχνότητα στο εύρος 2 έως 2,5 GHz.....	75
Πίνακας 4.13 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη HEAD 1 και σε συχνότητα 1,86 GHz.....	76
Πίνακας 4.14 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη HEAD2και σε συχνότητα 1,86 GHz.....	76
Πίνακας 4.15 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη BOTTTOM 1 και σε συχνότητα 1,86 GHz.....	77
Πίνακας 4.16 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη BOTTTOM 2 και σε συχνότητα 1,86 GHz.....	77
Πίνακας 4.17 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη SIDE1 και σε συχνότητα 1,86 GHz.....	78
Πίνακας 4.18 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη SIDE 2και σε συχνότητα 1,86 GHz.....	78
Πίνακας 4.19 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη HEAD 1 και σε συχνότητα 2,46 GHz.....	79
Πίνακας 4.20 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης τ.ς κυματομορφής σε διάταξη HEAD2 και σε συχνότητα 2,46 GHz.....	79
Πίνακας 4.21 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη BOTTTOM 1 και σε συχνότητα 2,46 GHz.....	80

Πίνακας 4.22 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη BOTTOM 2 και σε συχνότητα 2,46 GHz.....	80
Πίνακας 4.23 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη SIDE1 και σε συχνότητα 2,46 GHz.....	81
Πίνακας 4.24 Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη SIDE 2 και σε συχνότητα 2,46 GHz.....	81

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των παλμικών μικροκυματικών σημάτων πεπερασμένης διάρκειας, με τη χρήση κατάλληλης διάταξης, στη λειτουργία μη επανδρωμένων αεροχημάτων (ΜΕΑ) μικρού μεγέθους. Κίνητρο για τη διεξαγωγή της πειραματικής μελέτης είναι η αναζήτηση κατάλληλων συχνοτήτων παραγωγής παλμικών σημάτων στο φασματικό εύρος από 1,5 έως 2,5 GHz και στις οποίες προκαλείται είτε δυσλειτουργία / παρεμβολή είτε διακοπή λειτουργίας των ΜΕΑ.

1.2 Αντικείμενο Ενδιαφέροντος

Για πολλά χρόνια, το βασικό πεδίο ενδιαφέροντος για την αντιμετώπιση της δραστηριότητας των ΜΕΑ είχε εστιάσει κατά κύριο λόγο στην εφαρμογή αντιμέτρων έναντι αυτών, μέσω της παρεμβολής του καναλιού επικοινωνίας και με απώτερο σκοπό την παρενόχληση ή/και απώλεια ελέγχου του χειρισμού τους. Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας που ενσωματώνουν τα τελευταία χρόνια, η ευρεία χρήση τους αλλά και η αξιοποίησή τους ως οπλικά συστήματα από τη στρατιωτική βιομηχανία έχει ενεργοποιήσει ένα ευρύ αντικείμενο έρευνας δραστικών έως και επιθετικών τρόπων αντιμετώπισης τους με την έρευνα μεθόδων παρεμβολής της λειτουργίας τους που κλιμακώνεται έως και την πλήρη καταστροφή τους. Πράγματι, η βιομηχανία ανεπτυγμένων τεχνολογικά χωρών ανά τον κόσμο διατείνεται ότι με τη χρήση μηχανισμών-διατάξεων παραγωγής μικροκυματικών σημάτων υψηλής ισχύος (High Power Microwave, HPM) δύναται να εφαρμόσουν μέτρα αντιμετώπισης ή/και καταστροφής των ηλεκτρονικών διατάξεων και κυκλωμάτων των ΜΕΑ.

Το πεδίο έρευνας στο εν λόγω θέμα επιδιώκει την εξουδετέρωση κακόβουλων δραστηριοτήτων των ΜΕΑ που δύναται να γίνονται ιδιαίτερα επιθετικές και σε ευρεία κλίμακα, λόγω του μικρού κόστους τους και την ευκολία απόκτησης γνώσεων χειρισμού τους. Συναφώς, σημαντικό πεδίο έρευνας αποτελεί η ιχνηλάτηση των παραμέτρων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία δύναται να δημιουργήσει σκόπιμα ή και τυχαία αποτελέσματα στη δραστηριότητα των ΜΕΑ.

1.3 Ερευνητικό Ερώτημα

Η διαφοροποίηση και ο απώτερος σκοπός της παρούσας μελέτης συνίσταται στους ακόλουθους ειδικούς στόχους:

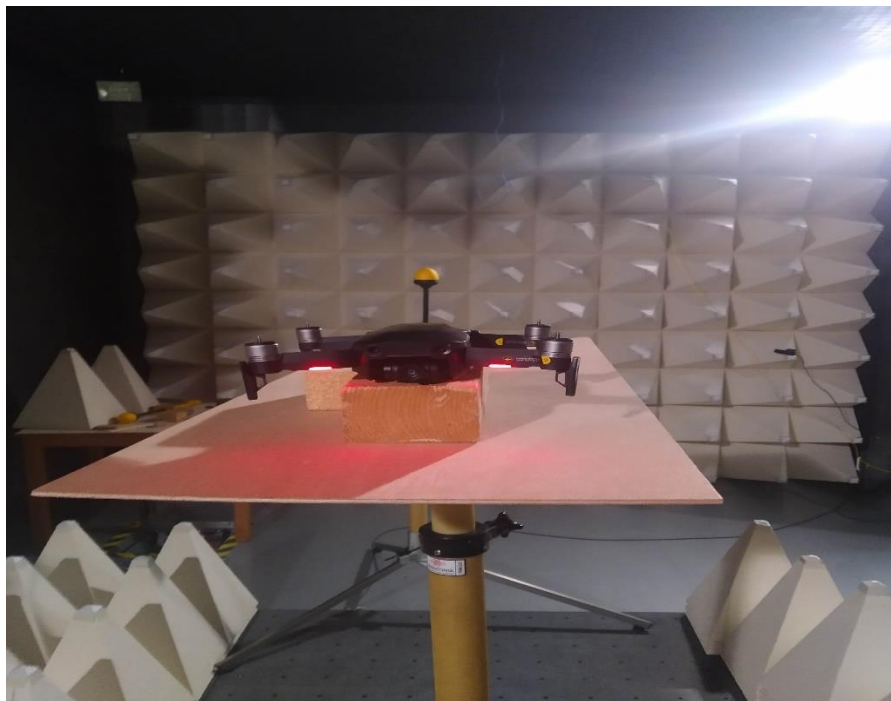
α. Στην εύρεση συχνοτήτων όπου δημιουργούνται άμεσα και ιδιαίτερα δυσμενή αποτελέσματα στη λειτουργία των ΜΕΑ, στοχεύοντας στη διακοπή της δυνατότητας χρήσης τους. Σε τεχνικό επίπεδο επιδιώκεται η εύρεση κατάλληλης

κυματομορφής, μέσω της εφαρμογή διαδικασίας εύρεσης της βέλτιστης συχνότητας και παραμετροποίησης της παλμικής ακτινοβολίας, η εφαρμογή της οποίας θα είναι ικανή να δημιουργήσει άμεσα, δραστικά και επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα στη λειτουργία των ΜΕΑ που εκτίθενται σε αυτή, στο λιγότερο δυνατό χρόνο και με την ελάχιστη δυνατή εκπεμπόμενη ενέργεια.

β. Στην εξεύρεση κατάλληλων συχνοτήτων όπου θα είναι εφικτή η παραγωγή δυσμενών αποτελεσμάτων σε διαφορετικούς τύπους ΜΕΑ, με τη χρήση δεδομένης ισχύος του προς εκπομπή σήματος.

γ. Στην πειραματική μελέτη των χαρακτηριστικών παραμετροποίησης του παλμού, ο εντοπισμός των οποίων εάν συνδυαστεί με τη βέλτιστη συχνότητα ως αποτέλεσμα της ερευνητικής διαδικασίας των προαναφερόμενων στόχων, θα οδηγήσει στη βέλτιστη παραμετροποίηση του παλμικού σήματος για την περαιτέρω μελέτη του θέματος.

Εν κατακλείδι, βασική επιδίωξη της παρούσας μελέτης είναι η αποτύπωση της πειραματικής διαδικασίας που εφαρμόστηκε για τη καταγραφή των αποτελεσμάτων της έκθεσης των drone σε μικροκυματικούς παλμούς διαφόρων συχνοτήτων στο εύρος 1,5 έως 2,5 GHz και λοιπών παραμέτρων διαμόρφωσης του παλμού, προκειμένου να εντοπιστεί και ερμηνευθεί η κρίσιμη παράμετρος που δύναται να προκαλέσει τη διακοπή λειτουργίας ενός κακόβουλου drone, καθώς και ο εντοπισμός του/των σημείου/σημείων τρωτότητας των διατάξεων έτσι ώστε να είναι δυνατή η προστασία της λειτουργίας ενός φίλιου drone, αντίστοιχα.



Εικόνα 1.1- Πειράματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας για την αποτίμηση των επιπτώσεων των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε ΜΕΑ

1.4 Εισαγωγικές -Βασικές Έννοιες

1.4.1 Ηλεκτρομαγνητικός Παλμός (Electromagnetic Pulse - EMP)

Ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός είναι μια εκπομπή ενέργειας μικρής διάρκειας, αποτέλεσμα της οποίας είναι η δημιουργία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δημιουργεί ενέργεια ικανή να παρεμβάλλει τις επικοινωνίες, να προκαλέσει σημαντικές δυσλειτουργίες ακόμα και να καταστρέψει ηλεκτρονικές διατάξεις. Η ενέργεια που εκλύει ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός διαχέεται σε εύρος συχνοτήτων περί μιας κεντρικής-φέρουσας συχνότητας (f_c), η οποία καθορίζεται από την πηγή, και είναι ανάλογη με τη μορφή, τη διάρκεια και το πλάτος του, αποδίδοντας είτε ηλεκτρικό πεδίο είτε μαγνητικό ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Τα κρίσιμα μεγέθη του Η/Μ παλμού, τα οποία συνιστούν τα κύρια χαρακτηριστικά του, είναι τα παρακάτω:

- α. Η χρονική διάρκεια του παλμού (T_p ή T_H).
- β. Η μέγιστη τιμή ισχύος (peak power).
- γ. Η κεντρική – φέρουσα συχνότητα (f_c).

1.4.2 Περιγραφή Παλμικής Κυματομορφής

Η κυματομορφή ενός παλμού απεικονίζει τη μεταβολή του πεδίου που παράγεται από την εκπομπή του ως προς το χρόνο. Η σύνηθης κυματομορφή του παλμού έχει μια ταχεία και απότομη εκδήλωση της μέγιστης τιμής του πεδίου (peak), η οποία εν συνεχεία φθίνει ομαλά.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που καθορίζουν το μέγεθος και τις ιδιότητες ενός παλμικά διαμορφωμένου σήματος είναι τα εξής:

α. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της εκπομπής δύο διαδοχικών παλμών ονομάζεται διάστημα επανάληψης παλμού, γνωστό και ως PRI (pulse repetition interval). Λαμβάνει τις γνωστές υποδιαιρέσεις του χρόνου.

β. Ο αριθμός των παλμών που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου ονομάζεται παλμική συχνότητα επανάληψης, γνωστό και ως PRF (pulse repetition frequency). Μονάδα μέτρησης είναι το Hertz (Hz).

Η σχέση μεταξύ των δύο ανωτέρω μεγεθών είναι αντιστρόφως ανάλογη και δίνεται από την ισότητα:

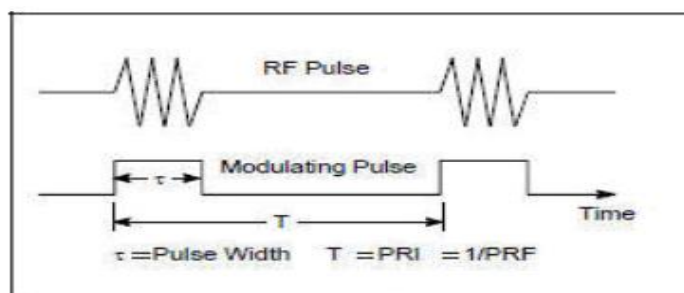
$$PRF = \frac{1}{PRI}$$

γ. Ο χρόνος στον οποίο έχουμε εκπομπή ενός παλμικά διαμορφωμένου σήματος στη διάρκεια μιας περιόδου του διαστήματος επανάληψης παλμού ονομάζεται κύκλος λειτουργίας (duty cycle) και δίδεται από τη σχέση:

$$d_t = \frac{\tau}{PRI} = \tau * PRF$$

Όπου :

- (1) d_t είναι ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) και υπολογίζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό.
- (2) τ είναι η χρονική διάρκεια του παλμού ή το πλάτος του παλμού και λαμβάνει τιμές χρόνου.
- (3) **PRI και PRF**, όπως ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.



Εικόνα 1.2 -Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός παλμικά διαμορφωμένου σήματος

δ. Η μέση τιμή της ισχύος ενός παλμού ισούται με το γινόμενο της μέγιστης ισχύος επί τον κύκλο λειτουργίας και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{ave} = P * d_t = P * \frac{\tau}{PRI} = P * \tau * PRF$$

Όπου :

- (1) « P_{ave} » = η μέση τιμή ισχύος (average power) του παλμού σε Watt.
- (2) « P » = η μέγιστη τιμή της ισχύος (peak power) σε Watt.

ε. Η ενέργεια που εκλύει η εκπομπή ενός παλμού δίνεται από το γινόμενο της μέγιστης ισχύος του επί τη διάρκειά του, δηλαδή:

$$E = P * \tau$$

και μετρείται σε watts* seconds ή joules.

1.4.3.Κατηγορίες Κυματομορφών Σημάτων

Οι κυματομορφές που εμφανίζονται στις διάφορες RF εφαρμογές διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

α. Κυματομορφή Συνεχούς Κύματος (Continuous Wave – CW).

β. Κυματομορφή Παλμικής Μορφής (Pulsed Waveform).

Για τις εφαρμογές υψηλής ισχύος ο τύπος των κυματομορφών είναι παλμικός. Επομένως, εστιάζοντας στην παλμική μορφή, που θα μας απασχολήσει στην παρούσα μελέτη, διακρίνουμε τις ακόλουθες υποκατηγορίες (Εικόνα 1.3):

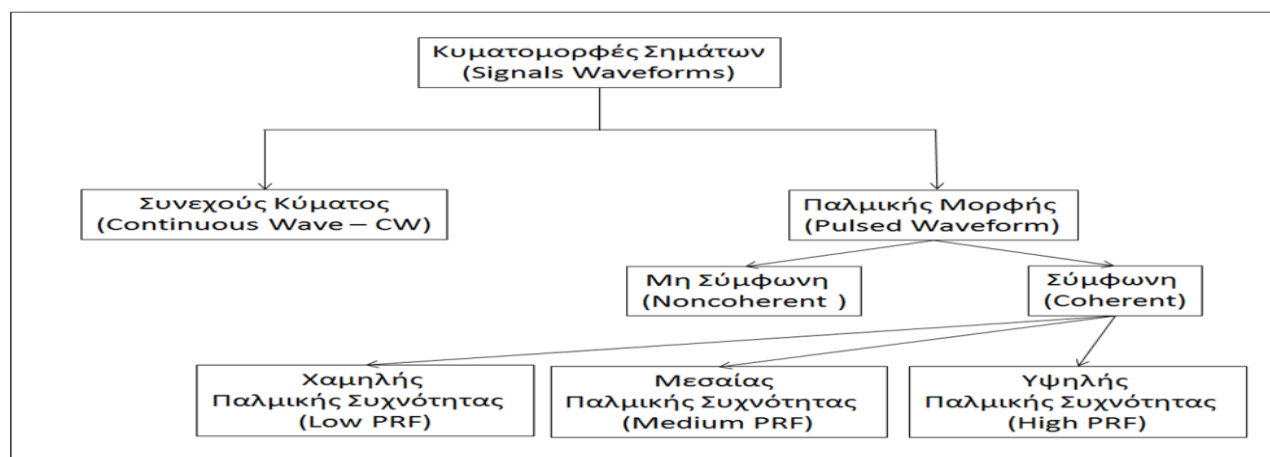
α. Μη Σύμφωνη Παλμική Κυματομορφή (Non-coherent Pulsed Waveform).

β. Σύμφωνη Παλμική Κυματομορφή (Coherent Pulsed Waveform).

γ. Χαμηλής Συχνότητας Επανάληψης Παλμών (Low pulse repetition frequency – Low PRF).

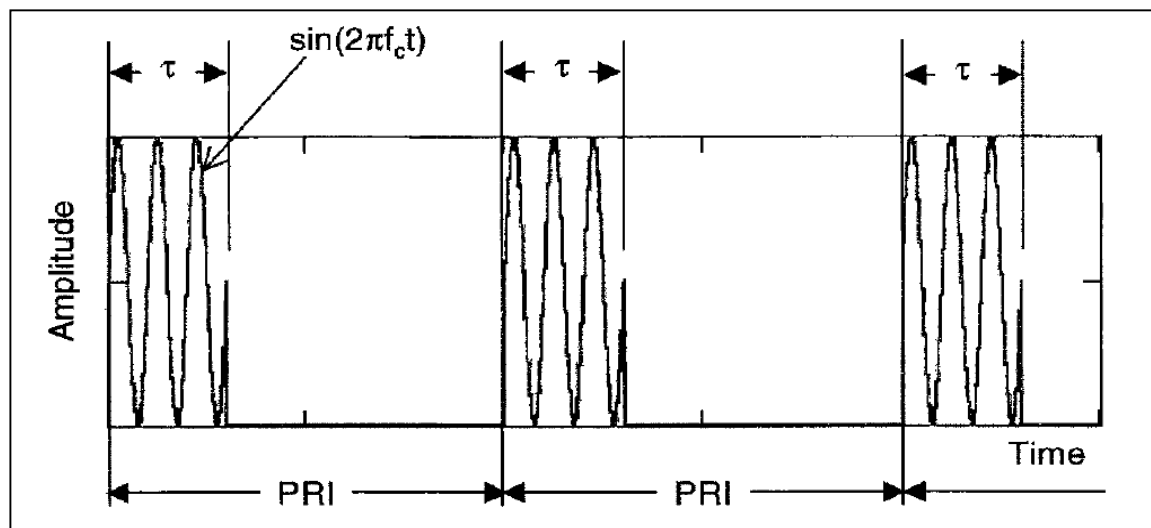
δ. Μεσαίας Συχνότητας Επανάληψης Παλμών (Medium pulse repetition frequency – Medium PRF).

ε. Υψηλής Συχνότητας Επανάληψης Παλμών (High pulse repetition frequency – High PRF).



Εικόνα 1.3 - Κατηγοριοποίηση RF Σημάτων

Οι παλμικές κυματομορφές που θα μελετηθούν πειραματικά στην παρούσα εργασία είναι μη σύμφωνες δεδομένου ότι η φάση του παλμικά διαμορφωμένου RF σήματος λαμβάνει τυχαία τιμή.



Εικόνα 1.4 –Παραμετροποίηση RF Σημάτων Παλμικής Διαμόρφωσης

1.4.4 Βασικές Παράμετροι RF Σημάτων

Οι βασικές παράμετροι που διέπουν τα παλμικά διαμορφωμένα σήματα και θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς στην παρούσα μελέτη, είναι τα ακόλουθα:

α. Μήκος κύματος (wavelength) του παλμικά διαμορφωμένου RF σήματος δίδεται από τη σχέση :

$$\lambda = \frac{c}{f_c}$$

Όπου :

- (1) «λ»= μήκος κύματος σε μέτρα.
- (2) «c»= ταχύτητα διάδοσης του RF σήματος, $3 \cdot 10^8$ μέτρα/δευτερόλεπτο.
- (3) « f_c »= η φέρουσα συχνότητα σε Hertz.

β. Κυκλική συχνότητα (angular frequency - radians/sec) :

$$2\pi f_c$$

1.5. Πλαίσιο Αντιμετώπισης Κακόβουλης Δραστηριότητας με χρήση drone

Η αυξανόμενη συχνότητα εκδήλωσης κακόβουλων ενεργειών με την εκμετάλλευση μεθόδων, οι οποίες είναι δύσκολο να προβλεφθούν και συγχρόνως απαιτούν ελάχιστο χρόνο αντίδρασης για την αποτροπή τους, έχει αναδείξει την αντιμετώπιση των drone σε ζήτημα μείζονος ενδιαφέροντος για την επιστημονική κοινότητα. Τα τελευταία χρόνια, η δράση των drone εντοπίζεται διαρκώς σε πολεμικές συγκρούσεις (πόλεμος Υεμένης, Συρίας, Ουκρανίας, κ.ά.), σε τρομοκρατικές επιθέσεις, καθώς και σε έκνομες δραστηριότητες όπως η παράνομη παρακολούθηση, η διακίνηση παράνομων προϊόντων, οι βομβιστικές επιθέσεις, κ.ά. Η ένταξη τους σε όλες αυτές τις δραστηριότητες έγινε ταχύτατα λόγω των υψηλών τεχνολογικών δυνατοτήτων που ενσωματώνουν σε συνδυασμό με το μικρό κόστος απόκτησης τους. Επιπρόσθετα, οι μικρές διαστάσεις τους δυσχεραίνουν τον εντοπισμό τους από τα παραδοσιακά μέσα ανίχνευσης και εντοπισμού (radar, οπτικοί και ηχητικοί αισθητήρες) και δημιουργούν την ανάγκη δραστηρικής προσβολής τους σε ελάχιστο χρόνο αφότου εντοπιστούν.

Μία αποδεκτή και ευρέως διαδεδομένη μέθοδος αντιμετώπισης των κακόβουλων ενεργειών τέτοιου είδους είναι η RF παρεμβολή του καναλιού επικοινωνίας – χειρισμού του ιπτάμενου μέσου με τη χρήση διατάξεων, οι οποίες ποικίλλουν σε μέγεθος επιτυγχάνοντας την ανάπτυξη φορητών όπλων διαστάσεων κοινού οπλισμού. Η αντιμετώπιση ενός drone αξιοποιώντας τη μέθοδο παρεμβολής είναι εφικτή αλλά με μικρές πιθανότητες σε μεγάλες αποστάσεις και σε καμία περίπτωση δεν προκαλεί δραστηρικά αποτελέσματα παρά μόνο προσωρινή απώλεια ελέγχου της δράσης του [1]. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία που ενσωματώνουν τα σύγχρονα drone επιτρέπουν την υιοθέτηση ενός προκαθορισμένου σχεδίου πτήσης εξαλείφοντας την ανάγκη επικοινωνίας του αεροσκάφους με το χειριστή, καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής. Αυτό καθιστά την αντιμετώπιση των δραστηριοτήτων αυτών ουσιαστικά αδύνατη μέσω της χρήση RF παρεμβολών, ειδικά αν συνυπολογιστεί η κατασκευή διατάξεων ολοένα και πιο ανθεκτικών σε παρεμβολές [2]. Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας συνοψίζονται στις παρακάτω παρατηρήσεις:

α. Η αποκοπή των καναλιών επικοινωνίας του χειρισμού των drone είναι εφικτή μόνο στην περίπτωση διαρκούς επικοινωνίας του χειριστή με τη συσκευή. Η προσβολή με αυτή τη μέθοδο ενός drone με αυτονομία στο σχέδιο πτήσης είναι ουσιαστικά αδύνατη.

β. Οι ιπτάμενες διατάξεις μικρής διατομής είναι πρακτικά μη ανιχνεύσιμες με τη χρήση radar.

γ. Οι παρεμβολές δε δύναται να αντιμετωπίσουν drone που υλοποιούν κανάλι επικοινωνίας σε συχνότητα μεγαλύτερη των 6,2 GHz.

δ. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών στη λειτουργία των drone για την αντιμετώπιση των RF μέτρων καταστολής της δράσης τους συνεπάγεται την αδυναμία αντιμετώπισης τους με παρεμβολή.

ε. Τα σύγχρονης τεχνολογίας droneδύναται να συνεχίσουν την αποστολή τους με προκαθορισμένο σχέδιο πτήσης, όταν αντιληφθούν παρεμβολή του καναλιού επικοινωνίας.

Μία άλλη πολλά υποσχόμενη μέθοδος αντιμετώπισης της δραστηριότητας των droneαφορά στη χρήση laser υψηλής ενέργειας. Η χρήση της μεθόδου αυτής είναι δραστική και ισχυρή, πλην όμως υπόκειται σε σοβαρούς περιορισμούς που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες, λόγω του πολύ μικρού μήκους κύματος των laser. Επιπρόσθετα, ως σοβαρά μειονεκτήματα προβάλλονται οι μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις (άνω των 3,5 KW) και οι σοβαρές προκλήσεις που θέτει η ανάπτυξη droneμε επιφάνειες ισχυρής ανακλαστικής ικανότητας, η οποία προκαλεί την ολική ανάκλαση της ακτίνας laserαπό το στόχο υποβάλλοντας σε σοβαρό κίνδυνο το φίλιο προσωπικό και τις αντίστοιχες φίλιες διατάξεις.

Η χρήση διατάξεων εκπομπής ισχυρού μικροκυματικού παλμού διαφαίνεται να αποτελεί μια εξίσου δραστική λύση, περιορίζοντας τα προαναφερόμενα μειονεκτήματα, καθώς αποσκοπεί στην ισχυρή παρενόχληση των ηλεκτρονικών διατάξεων-εξαρτημάτων του ιπτάμενου μέσου έως και την ενδεχόμενη καταστροφή τους [3]. Η κατευθυντική εκπομπή μικροκυματικού σήματος υψηλής ενέργειας σε ένα στόχο ενδιαφέροντος αποσκοπεί στο να παράγει ισχυρό πεδίο, μέσω της ενεργειακής κατανομής που εισάγει η κεραία, έτσι ώστε να πλήξει ή και να καταστρέψει τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του ιπτάμενου μέσου.

1.6 Βασικές Αρχές και Εφαρμογές

Τα συστήματα κατευθυνόμενης ενέργειας εκμεταλλεύονται την ενέργεια στο Η/Μ Φάσμα, προκειμένου να παρενοχλήσουν, να προκαλέσουν βλάβες, να υποβαθμίσουν ή ακόμα και να καταστρέψουν στόχους, όπως τα drone. Σοβαροί περιορισμοί τίθενται στην αποτελεσματική κατασκευή τους, εξαιτίας των φυσικών περιορισμών στη δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσών ενέργειας και στην ακτινοβόλησή της. Περαιτέρω περιορισμοί εισάγονται λόγω της απαίτησης για αντιμετώπιση του στόχου από μεγάλη απόσταση, αφού η εγκατάσταση των συγκεκριμένων συστημάτων επί εναερίων πλατφόρμων αντιμετωπίζει σοβαρούς τεχνικούς περιορισμούς – δυσκολίες και απαιτεί μεγάλο κόστος.

Η επιτυχία της προσβολής ενός drone από την εκπομπή Η/Μ παλμού στην περιοχή των μικροκυματικών εξαρτάται από το επίπεδο ισχύος της εκπομπής, τη συχνότητά της, τη διάρκεια του παλμού και το χρόνο επανάληψης του, όπως έχει μελετηθεί και αποτυπωθεί σε πλήθος δημοσιεύσεων. Σε γενικές γραμμές, η χρήση της μεθόδου στοχεύει στην εκπομπή παλμού, ο οποίος δημιουργεί ένα ισχυρό πεδίο γύρω από το στόχο, καταλήγοντας στη μεταφορά μεγάλων τιμών ενέργειας στο εσωτερικό της εναέριας διάταξης. Το υπαρκτό ζήτημα στη δημιουργία ισχυρού πεδίου γύρω από το drone είναι η ραγδαία μείωση της ισχύος του πεδίου με την απόσταση, αφού η τιμή της ισχύος του πεδίου είναι ανάλογη με το αντίστροφο ημίκυβου του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ κεραίας και στόχου [4].

Από την άλλη πλευρά, η ενσωμάτωση προηγμένων δυνατοτήτων στη λειτουργία των drone παρέχει τη δυνατότητα έξυπνης χρήσης τους για κακόβουλους σκοπούς, αλλά και επιτρέπει την εκμετάλλευση των πολλαπλών τρωτοτήτων των αντίστοιχων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Στην τυπική του μορφή, ένα σύγχρονο drone διαθέτει

πολλαπλούς αισθητήρες (sensors), επικοινωνίες (κανάλι χειρισμού, wi-fi και μεταφοράς δεδομένων), ηλεκτρονικά εξαρτήματα ελέγχου πτήσης (avionics), σύστημα προώθησης (propulsion system) και σύστημα παροχής ενέργειας (power system). Η έκθεση της συσκευής σε ισχυρό μικροκυματικό παλμό με κατευθυντική εκπομπή δύναται να προκαλέσει αποτελέσματα στα ηλεκτρονικά που κλιμακώνονται από αμελητέα αποτελέσματα έως και την ολική καταστροφή τους [5]. Τα ενδιάμεσα σε αυτή την κλίμακα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την παρεμβολή, την παρενόχληση λειτουργίας και την πρόκληση προσωρινής διακοπής λειτουργίας. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που αποτελούν συστατικά στοιχεία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και είναι ευάλωτα σε φαινόμενα σύζευξης εξαιτίας του πεδίου που δημιουργεί μία ισχυρή μικροκυματική εκπομπή και το ενεργειακό κατώφλι πρόκλησης δυσλειτουργίας ή βλάβης εμφανίζονται στον ακόλουθο πίνακα.[2]

Electronic device burnout thresholds		Electronic device upset levels	
Component Class	Energy (J)	Component type	Energy (J)@ 1 μs
GaAs MESFET	10^{-7} - 10^{-6}	Operational amplifiers	9×10^{-10}
MMIC	7×10^{-7} - 5×10^{-6}	TTL	8×10^{-9}
Microwave diodes	2×10^{-6} - 5×10^{-4}	CMOS devices	10^{-9}
VLSI	2×10^{-6} - 2×10^{-5}	Voltage regulators	9×10^{-8}
Bipolar transistors	10^{-5} - 10^{-4}	Comparator	8×10^{-9}
CMOS RAM	7×10^{-5} - 5×10^{-4}	VHSIC	10^{-7}
MSI		10^{-4} - 6×10^{-4}	
SSI		6×10^{-4} - 10^{-3}	
Operational amplifiers		2×10^{-3} - 6×10^{-3}	

Εικόνα 1.5 - Ενεργειακό Κατώφλι Πρόκλησης Δυσλειτουργίας ή Βλάβης λόγω έκθεσης ηλεκτρονικών διατάξεων σε Παλμό

1.7. Μεθοδολογία Έρευνας

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει ουσιαστικά δύο μέρη με σκοπό να συμπεριλάβει, ως μία βάση εργασίας, την ήδη γνωστή και τεκμηριωμένη επίδραση της ακτινοβολίας παλμικής διαμόρφωσης στη λειτουργία των ηλεκτρονικών διατάξεων και εν συνεχεία να καταγράψει τη συμπεριφορά των drone σε σχέση με τη μεταβολή της συχνότητας σε ένα εύρος συχνοτήτων της τάξης του 1 GHz (1,5 έως 2,5 GHz).

Στο πρώτο μέρος, λαμβάνει χώρα μία επιλεγμένη βιβλιογραφική έρευνα, η οποία εστιάζει καταρχήν στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έκθεσης των ηλεκτρονικών διατάξεων σε ισχυρό μικροκυματικό παλμό και στην οποία πέραν της πειραματικής απόδειξης των παρεμβατικών στην ορθή λειτουργία συνεπειών της εφαρμογής του, αναζητούνται και εκείνα τα χαρακτηριστικά του παλμού που όταν μεταβληθούν θα δώσουν πιο δραστικά και άμεσα αποτελέσματα. Προκειμένου να εντοπιστούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την επίδραση, αποτυπώνονται κάποια σύντομα συμπεράσματα των μελετών αυτών.

Στη συνέχεια της βιβλιογραφικής έρευνας, γίνεται αναλυτική παρουσίαση τεκμηριωμένων πειραματικών εργασιών, όπου το αντικείμενο ενδιαφέροντος είναι αποκλειστικά η επίδραση του παλμού στη λειτουργία των drone. Στις επιλεγθείσες μελέτες πέραν της καταγραφής των συνεπειών της ακτινοβολήσης ορισμένων αρκετά εμπορικών drone, γίνεται ταυτόχρονα και έλεγχος της επίδρασης στα ζωτικά εξαρτήματα πτήσης για τον εντοπισμό δυσλειτουργιών και σχετικών ειδοποιήσεων. Η ανάλυση των παραπάνω ερευνών οδηγεί σε κάποια πρωτογενή συμπεράσματα για τα επιμέρους στοιχεία του drone, τα οποία σχετίζονται κυρίως με το GPS και την τηλεμετρία, και που εμφανίζουν κάποιου είδους τρωτότητα χωρίς όμως να εξετάζονται σε μεγάλη έκταση τα χαρακτηριστικά του παλμού που προκάλεσαν τις δυσλειτουργίες. Εξίσου χρήσιμη είναι και η βιβλιογραφική έρευνα για την ποιοτική κατηγοριοποίηση των drone και των κατηγοριών επηρεασμού τους, με βάση τα εξαχθέντα πειραματικά δεδομένα.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας αναφέρεται στην πειραματική διαδικασία που εφαρμόστηκε για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των drone, όταν εκτίθενται σε διαφορετικές συχνότητες εντός της ζώνης 1,5 έως 2,5 GHz. Πέραν της περιγραφής της διάταξης-συνδεσμολογίας του πειράματος, παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών ανά συχνότητα με βήμα 10 MHz, καθώς και τα συνολικά αποτελέσματα της διερεύνησης, μέσω της καταγραφής τους σε σχετικά διαγράμματα. Επιπρόσθετα, επιχειρείτε η διερεύνηση της συμπεριφοράς των drone, όταν η διαμόρφωση των χαρακτηριστικών παραμέτρων του παλμικού σήματος μεταβάλλεται και εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα.

1.8. Δομή Πτυχιακής Εργασίας

Η δομή της πτυχιακής εργασίας ανά κεφάλαιο παρατίθεται σύντομα όπως παρακάτω:

Στο 2ο κεφάλαιο, γίνεται βιβλιογραφική έρευνα με την επιλεκτική παρουσίαση εργασιών με πειραματικό υπόβαθρο. Ο σκοπός της ανωτέρω διερεύνησης είναι η αποσαφήνιση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία, ως προς τη λειτουργία και τα τρωτά σημεία των drones, καθώς και η εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων για τη βέλτιστη παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών του παλμού, προκειμένου η έρευνα να εστιαστεί στην παραμετροποίηση της συχνότητας εκπομπής του παλμού.

Στο 3ο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά στα επιμέρους όργανα-συσσκευές, στη συνδεσμολογία και στη μέθοδο καταγραφής των αποτελεσμάτων της επίδρασης του εκπεμπόμενου παλμού σε drone που λειτουργεί στο μακρινό πεδίο.

Το 4ο κεφάλαιο, περιλαμβάνει την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που κατεγράφησαν για μεταβολή της συχνότητας με βήμα 10 MHz σε εύρος από 1,5 έως 2,5 GHz και στις έξι συνολικά διαφορετικές επιφάνειες (διατάξεις) του drone στόχου. Επιπρόσθετα, εκτίθενται αντίστοιχα αποτελέσματα για διαφορετική παραμετροποίηση των λοιπών χαρακτηριστικών μεγεθών της παλμικής ακτινοβολίας σε επιλεγμένες από την προηγούμενη πειραματική διαδικασία συχνότητες.

Στο 5ο κεφάλαιο αποτυπώνονται τα εξαχθέντα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα του πειράματος και τα οποία προέκυψαν από τη συνολική αξιολόγηση των δύο προαναφερόμενων πειραματικών φάσεων. Επίσης, αναφέρονται πιθανές προεκτάσεις της έρευνας σε διαφορά πεδία ενδιαφέροντος και γίνεται αναφορά σε ενδεχόμενες βελτιώσεις και προοπτικές συνέχειας της εν λόγω μελέτης.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Μελέτη για Καθορισμό Βάσης Εργασίας

2.1 Εισαγωγή

Ένας μεγάλος αριθμός εργασιών και μελετών έχουν δημοσιευτεί σχετικά με τη διερεύνηση της έκθεσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε ακτινοβολία υψηλής ισχύος, προσπαθώντας να αποδώσουν την ερμηνεία των επιμέρους παραγόντων που παρεμποδίζουν ή/και αποκλείουν τη φυσιολογική λειτουργία τους. Το ερευνητικό ερώτημα της επίδρασης των μικροκυματικών παλμών υψηλής ισχύος στα ηλεκτρονικά έχει μελετηθεί ενδελεχώς και είναι εμφανής η τάση να κατηγοριοποιείται ανά συσκευη-διάταξη ενδιαφέροντος. Πράγματι, κατά την τελευταία δεκαετία όπου η χρήση ψηφιακών συσκευών είναι ευρέως διαδεδομένη και ζωτικής σημασίας σε ένα μεγάλο αριθμό πεδίων ενδιαφέροντος, η έρευνα των παραμέτρων που δύναται να δημιουργήσουν σκόπιμα ή τυχαία δυσλειτουργία ή/και καταστροφή τους έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον και φαίνεται να δίνει σημαντικά αποτελέσματα τόσο στην προστασία αυτών των συσκευών όσο και στην ανάπτυξη διατάξεων που επιτυγχάνουν αποτελέσματα σε αυτές.

2.2 Τρωτότητα των ηλεκτρονικών διατάξεων στον Η/Μ παλμό

Η χρήση Η/Μ παλμών μεγάλης ισχύος (High Power Microwave Pulse) με σκοπό την παρενόχληση, την απενεργοποίηση ή και την καταστροφή ηλεκτρονικών στόχων έχει μελετηθεί εκτενώς ήδη από τη δεκαετία του '90. Στη [6] ερευνώνται τα αποτελέσματα της υποβάθμισης σε ηλεκτρονικούς στόχους, η οποία προκαλείται από ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς μεγάλης ισχύος. Μέσα από πειραματική ανάλυση της έκθεσης αναλογικών και ψηφιακών ηλεκτρονικών διατάξεων καθώς και κυκλωμάτων μικροεπεξεργαστών σε υψηλής πυκνότητας ισχύος Η/Μ πεδία, επιχειρείται ο καθορισμός των παραγόντων που παραμετροποιούν την επίδραση σε αυτά και κατηγοριοποιούνται τα επαγόμενα αποτελέσματα. Η κατηγοριοποίηση που προτείνεται στη συγκεκριμένη δημοσίευση βασίζεται στην κρισιμότητα των αποτελεσμάτων της εκπομπής Η/Μ παλμού στην περαιτέρω λειτουργία της υπό εξέταση ηλεκτρονικής διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των παραπάνω εκπομπών διακρίνονται σε:

- α. Μη Καταστρεπτικά
- β. Καταστρεπτικά

Ένα πρώτο στοιχείο σχετικά με τη δημιουργία παρεμβολής στη λειτουργία των ηλεκτρονικών είναι ότι το κατώφλι εμφάνισης της σχετίζεται με τρεις παραμέτρους που έχουν να κάνουν με τη συχνότητα του παλμού, τη γωνία θέασης του στόχου (Angle of Incidence) και την πόλωση. Οι ανωτέρω παράμετροι σχετίζονται άμεσα με τις δομικές διαστάσεις των ηλεκτρονικών και την ικανότητα του πεδίου να διεισδύει από το εξωτερικό περιβάλλον της θωράκισης στο εσωτερικό αυτής, προκαλώντας φαινόμενα

σύζευξης στις διάφορες συνδέσεις και στις καλωδιώσεις. Το γενικό πλαίσιο της πρόκλησης μη καταστρεπτικών αποτελεσμάτων στις ηλεκτρονικές διατάξεις σχετίζεται με την αλλαγή τάσης στην είσοδο των ημιαγωγών προκαλώντας υποβάθμιση στα αναλογικά σήματα και αλλαγή κατάστασης στα ψηφιακά.

Πειραματικά στην εν λόγω μελέτη εμφανίζεται η ένταση της παρεμβολής να είναι ανάλογη με το ρυθμό επανάληψης του παλμού στα χαμηλοπερατά αναλογικά κυκλώματα σε αντίθεση με τα αντίστοιχα αναλογικά ζωνοπερατά όπου η παρεμβολή εκδηλώνεται έντονα όταν ο ρυθμός επανάληψης του παλμού ισούται με τη κεντρική συχνότητα του ζωνοπερατού. Γενικότερη διαπίστωση αποτελεί ότι ο πολύ υψηλός ρυθμός επανάληψης παλμών καταστέλλει το σήμα πληροφορίας.

Στην περίπτωση των ψηφιακών κυκλωμάτων, η παρεμβολή εκδηλώνεται με αλλαγή της κατάστασης τους. Τα αποτελέσματα της επίδρασης του πεδίου διαφέρουν σε σχέση με τα αναλογικά κυκλώματα και καταλήγουν να δημιουργούν επανεκκίνηση της λειτουργίας είτε αυτόματα είτε γιατί η τάση τροφοδοσίας μειώθηκε κάτω από ένα επιτρεπτό επίπεδο. Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε με καταγραφή της διαδικασίας επανεκκίνησης ότι η έκθεση σε πεδία υψηλότερης έντασης δημιουργεί δυσχερέστερα αποτελέσματα, απαγορεύοντας την πρόσβαση στη μνήμη τους και προκαλώντας διαγραφή κρίσιμων δεδομένων.

Πέραν των μη καταστρεπτικών αποτελεσμάτων, η έκθεση των ηλεκτρονικών σε πολύ υψηλά πεδία μπορεί να προκαλέσει και καταστρεπτικές συνέπειες στα επιμέρους στοιχεία των κυκλωμάτων. Τα καταστρεπτικά αποτελέσματα κατηγοριοποιούνται επιμέρους σε δύο κατηγορίες, όπως παρακάτω:

- α. Καταστροφή διηλεκτρικού.
- β. Καταστροφή των τρανζίστορ.

Όταν ένα πεδίο μεγάλης έντασης επιτυγχάνει να επάγει τάση που ξεπερνά τη διηλεκτρική αντοχή και ενεργοποιεί φαινόμενα χιονοστιβάδας, η αποφόρτιση του ρεύματος δύναται να προκαλέσει κρίσιμα και μόνιμα καταστρεπτικά αποτελέσματα στις μικροηλεκτρονικές διατάξεις.

Με ανάλογο τρόπο, η πρόκληση επαγόμενης τάσης σε ένα τρανζίστορ δύναται να προκαλέσει ανάστροφη πόλωση ξεπερνώντας την τάση διάσπασης και οδηγώντας στη δημιουργία επιπλέον οπών και ηλεκτρονίων λόγω του μεγάλου ηλεκτρικού πεδίου. Η καταστροφή του τρανζίστορ είναι δυνατή μόνο όταν η θερμοκρασία του ξεπεράσει τα όρια ανοχής λειτουργίας του.

Η πρόκληση των καταστρεπτικών συνεπειών της έκθεσης των μικροηλεκτρονικών σε παλμό υψηλής ισχύς επιβεβαιώνεται στην εν λόγω μελέτη με πειραματική διαδικασία και αποτύπωση των ληφθέντων εικόνων, όπου είναι εμφανή η ζημιά των διατάξεων λόγω της επαγόμενης ενέργειας αυτοτελώς είτε σε συνδυασμό με άλλες πηγές (π.χ. αποσυζευχθέντες πυκνωτές). Γενικότερα, η πρόκληση καταστρεπτικών αποτελεσμάτων από την εφαρμογή παλμού σε ηλεκτρονικές διατάξεις, αποτελεί τις περισσότερες φορές δευτερογενή παράγοντα, καθόσον ο χρόνος αποδόμησης τους και η διάρκεια του παλμού δεν είναι ίδιας τάξεως μεγέθους.

Με αφορμή τη διαρκή επέκταση της ψηφιακής τεχνολογίας στη δημόσια δραστηριότητα και τις υποδομές, μία πιο εκτενής μελέτη [7] των αποτελεσμάτων της έκθεσης των ηλεκτρονικών συστημάτων σε μικροκυματικό παλμό διενεργήθηκε το 2004, θέτοντας υπόψη τόσο το θέμα της ηλεκτρομαγνητικής προστασίας των συσκευών όσο και τη δυνατότητα χρήσης απλών συσκευών από κακόβουλα πρόσωπα για την πρόκληση δυσμενών αποτελεσμάτων στη λειτουργία τους. Στην υπόψη εργασία που συνοδεύεται από τη παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας επιβεβαιώνεται η ευαισθησία των ηλεκτρονικών δομικών στοιχείων στον ισχυρό Η/Μ παλμό και αξιολογείται η επίδραση της σύζευξης πεδίου και καλωδίωσης στην παρεμβολή τους. Η ισχυρή ενέργεια του Η/Μ παλμού μπορεί να δημιουργήσει είτε απευθείας είτε με έμμεση σύζευξη (coupling) στα δομικά στοιχεία ενός συστήματος.

Στην απευθείας σύζευξη (front-door coupling), η υψηλής ισχύος ακτινοβολία κατευθύνεται στο εσωτερικό της συσκευής, εκμεταλλευόμενη σημεία εισόδου αναπόσπαστα για τη λειτουργία στοιχείων της διάταξης. Αναλόγως της σχέσης της συχνότητας λειτουργίας του εξοπλισμού με τη συχνότητα της ακτινοβολίας παρεμβολής, η απευθείας σύζευξη διακρίνεται περαιτέρω σε πρώτη και δεύτερη τάξη, όπου στην πρώτη κατηγορία οι συχνότητες συμπίπτουν και στη δεύτερη όχι.

Στην έμμεση σύζευξη (back-door coupling), η υψηλής ισχύος ακτινοβολία εκμεταλλεύεται, αναπόφευκτες για τη λειτουργικότητα, ατέλειες της θωράκισης της συσκευής με τη δημιουργία ισχυρών πεδίων στο εσωτερικό της δομής. Η ισχυρή ακτινοβολία δημιουργεί σύζευξη σε καλωδιώσεις διασύνδεσης επιμέρους εξαρτημάτων, οι οποίες σκόπιμα ή άνευ προθέσεως δεν έχουν θωρακιστεί καταλλήλως κατά τη σχεδίαση του συστήματος.

Η πειραματική επιβεβαίωση των συμπερασμάτων της μελέτης σε ανηχοϊκό θάλαμο καθιστά σαφές ότι οι προκαλούμενες παρεμβολές οδηγούν σε προσωρινή δυσλειτουργία ή ακόμα και σε καταστροφή της διάταξης και εντοπίζεται άμεση συσχέτιση με τη συχνότητα εκπομπής, τη συχνότητα επανάληψης των παλμών (PRF) και τη γωνία πρόσπτωσης του σήματος παρεμβολής (AoI). Με τη χρήση κατάλληλης διάταξης που παρείχε τη δυνατότητα ορισμού πέντε συχνοτήτων στις διάφορες μπάντες εντός της περιοχής των μικροκυματικών, καθώς και κρίσιμων παραμέτρων εκπομπής όπως η ισχύς, το PRF και το μήκος του παλμού αναλύθηκε η σε πραγματικό χρόνο διαμόρφωση του Η/Μ περιβάλλοντος. Κομβικής σημασίας για την εκτέλεση των πειραμάτων ήταν η χρήση κατάλληλου κέρδους κεραιών και η συμπίεση του παλμού, με κατάλληλα συντονισμένες μεταξύ τους κοιλότητες (σελίδα 398). Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν αφορούν στα παρακάτω:

- Οι χαμηλότερες φασματικές περιοχές των μικροκυμάτων προκαλούν εντονότερα φαινόμενα παρεμβολών (L και S μπάντα) συγκριτικά με τις υψηλότερες, με δημιουργία πεδίου της τάξης των μερικών εκατοντάδων V/m.

- Η μόνιμη καταστροφή παρατηρείται όταν εφαρμοστεί πεδίο ισχύος μεγαλύτερο των 15 kV/m και πλήττει τον εξοπλισμό ακόμα και όταν είναι απενεργοποιημένος.

- Η μόνιμη καταστροφή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων συμβαίνει αστραπιαία με την εκπομπή του πρώτου παλμού και δε φαίνεται να εξαρτάται από το PRF αυτού. Το παραπάνω συμπέρασμα ισχυροποιείται από το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκαν θερμικές συσσωρεύσεις ή σταδιακή αποσύνθεση ηλεκτρονικών στοιχείων.

- Το PRF είναι καθοριστικός παράγοντας για λιγότερο κρίσιμες παρενοχλήσεις της λειτουργικότητας των συσκευών. Οι δυσλειτουργίες αυτές προκύπτουν ως στατιστικό αποτέλεσμα που σχετίζεται με την πιθανότητα ένας παλμός να παρεμβάλλει τον κύκλο λειτουργίας μιας κρίσιμης διαδικασίας των ηλεκτρονικών. Η πιθανότητα αυτή αυξάνεται, όπως είναι λογικό, με μεγαλύτερες τιμές του ρυθμού επανάληψης παλμών (PRF).

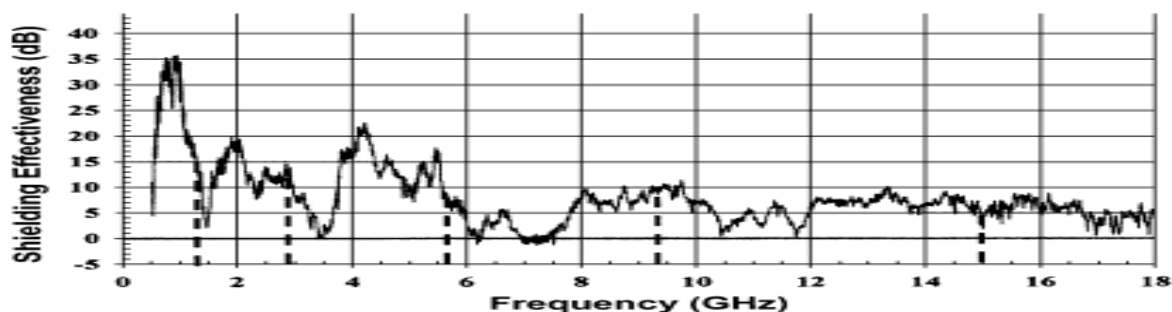
- Η διάρκεια του παλμού σχετίζεται και με τις δύο κατηγορίες δυσλειτουργιών, ήτοι μόνιμη και προσωρινή. Οι παλμοί χαμηλότερης διάρκειας φαίνεται να δημιουργούν ισχυρότερα πεδία με συνέπεια την πρόκληση ισχυρότερων αποτελεσμάτων επί των ηλεκτρονικών διατάξεων.

- Η καταστροφή των ηλεκτρονικών διατάξεων μέσω της απευθείας σύζευξης είναι εφικτή εντός μεγαλύτερης ακτίνας δράσης σε σχέση με την έμμεση σύζευξη.

Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται πέραν των πειραματικών αποτελεσμάτων και από τις μαθηματικές σχέσεις που ισχύουν για τη σύζευξη πεδίου και καλωδίωσης. Η αντιστρόφως ανάλογη σχέση της συχνότητας με το μήκος κύματος μιας μικροκυματικής εκπομπής έχει άμεση συνέπεια στη μείωση του μεγέθους σύζευξης πεδίου-καλωδίου, καθώς η τελευταία φθίνει αναλόγως του τετραγώνου του μήκους κύματος. Η σχέση (1) αφορά στην ισχύ που λαμβάνει ένας ενσύρματος φορέας λόγω σύζευξης πεδίου-καλωδίου, όπου S_{inc} είναι η τιμή της πυκνότητας ισχύος και E_{inc} είναι η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου.

$$P_{rec} = \frac{\lambda^2}{8\pi} \cdot S_{inc} = \frac{\lambda^2}{8\pi} \cdot \frac{E_{inc}^2}{Z_0} \quad (1)$$

Επιπρόσθετα, στη μελέτη διαπιστώνεται η αποτελεσματικότητα της θωράκισης στις χαμηλότερες συχνότητες.

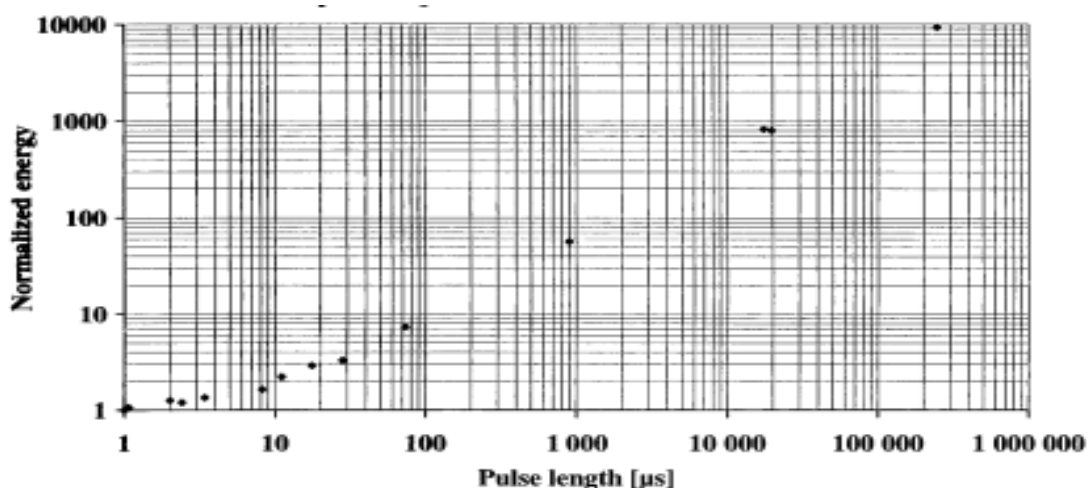


Εικόνα 2.1 - Αποτελεσματικότητα θωράκισης σε σχέση με τη συχνότητα

Οι σχετικές μετρήσεις στη ζώνη συχνοτήτων από 1 έως 4 GHz αποδεικνύουν την απόκλιση ευαισθησίας ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας κατασκευής. Παρατηρήθηκε η πρόκληση παρεμβολών στη λειτουργία ηλεκτρονικών διατάξεων με

πεδίο μικρότερο των 30 V/m καθώς και η εκδήλωση των παρεμβολών σε συγκεκριμένες επαναλαμβανόμενες συχνότητες, με συγκεκριμένη πόλωση και καταλήγοντας σε κρίσιμο σφάλμα, η επίλυση του οποίου απαιτούσε την επανεκκίνηση του συστήματος. Η δημιουργία μόνιμης βλάβης απαιτεί ανώτερης τάξεως πεδία και το κατώφλι της απαιτούμενης ενέργειας κυμαίνεται από 15 έως 20 Kν/m. Τα πειραματικά δεδομένα κατέδειξαν ότι η απαιτούμενη ενέργεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διάρκεια του παλμού και μάλιστα κατά τρόπο ανάλογο αφού η θερμική ενέργεια που παράγεται στις ηλεκτρονικές διατάξεις αυξάνει με το μήκος του παλμού.

Ως προς την απόσταση από την οποία είναι δυνατή η πρόκληση μόνιμων καταστροφικών αποτελεσμάτων σε μία αθωράκιστη ηλεκτρονική διάταξη αυτή εκτείνεται στο ένα χιλιόμετρο για μία πηγή ισχύος 10 MW. Η αποτελεσματική θωράκιση φαίνεται να παίζει κομβικό ρόλο στην προστασία του ηλεκτρονικού υλικού από τον Η/Μ παλμό, καταλήγοντας ότι για την προστασία των διατάξεων από την έμμεση σύζευξη απαιτείται η εξασθένηση του προσπίπτοντος σήματος κατά 30 db, μέσω κατάλληλης θωράκισης ή/και φίλτρων ενώ στην περίπτωση της απευθείας σύζευξης, παρόλο το γεγονός ότι η παρενόχληση της λειτουργίας είναι δύσκολο να αποφευχθεί, η προστασία από μόνιμη δυσλειτουργία επιτυγχάνεται μέσω τοποθέτησης κατάλληλων φίλτρων ή λεπτών μεταλλικών ταινιών-πλακών.



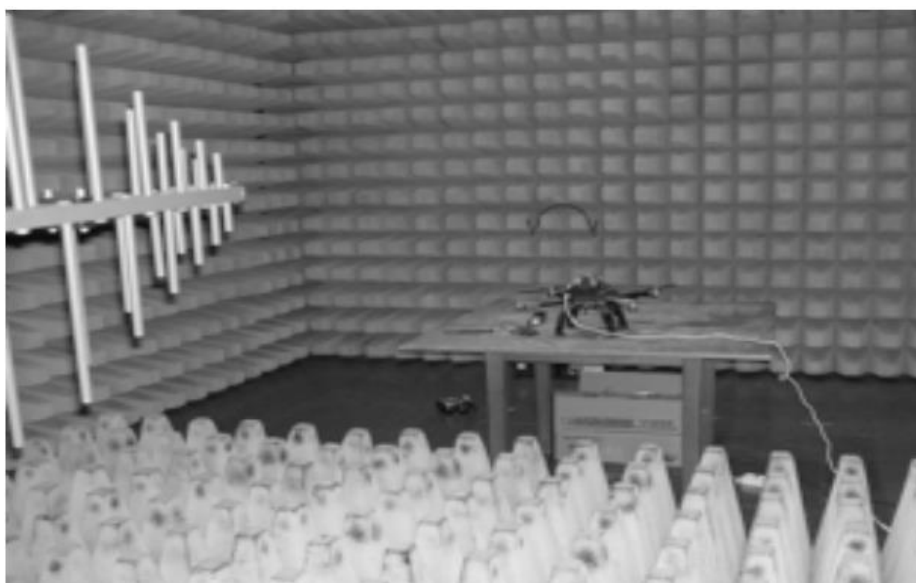
Εικόνα 2.2 - Σχέση Ενέργειας με τη Διάρκεια Παλμού

2.3 Μελέτη Επίδρασης Μικροκυματικού Παλμού Υψηλής Ισχύος στα ΜΕΑ

Κατά την τελευταία δεκαετία, η ραγδαία αύξηση της χρήσης ιπτάμενων μη επανδρωμένων μέσων οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μείωση του μεγέθους των ηλεκτρονικών με παράλληλη μείωση του κόστους κατασκευής τους. Τα UAV χρησιμοποιήθηκαν εδώ και δεκαετίες ως μέσα εκτέλεσης αποστολών για στρατιωτικούς σκοπούς, κατά κύριο λόγο. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχουν μεγάλη απήχηση σε ένα πλήθος εφαρμογών, χρησιμοποιούνται ευρέως και τα επόμενα χρόνια αναμένεται η ενσωμάτωση σε ένα ευρύ φάσμα καθημερινών δραστηριοτήτων.

Η προστασία των UAV από κάθε είδους πιθανή παρεμβολή, είτε σκόπιμη είτε τυχαία αλλά και η αντιμετώπιση της αξιοποίησης τους ως μέσα εκδήλωσης κακόβουλων δραστηριοτήτων αποτελεί ένα δημοφιλές αντικείμενο έρευνας. Πράγματι, η προστασία κρίσιμων εγκαταστάσεων από κακόβουλες ενέργειες που περιλαμβάνουν τη χρήση ενός ή σμήνους drone απασχολεί τόσο την επιστημονική κοινότητα όσο και τη στρατιωτική βιομηχανία εξαιτίας της ευκολίας χρήσης τους και της δυνατότητας μετατροπής τους από απλό αερόχημα σε μέσο παρακολούθησης, ακόμα και σε οπλικό σύστημα.

Ένας μεγάλος αριθμός των προαναφερθεισών μελετών αναφέρονται και στην επίδραση του μικροκυματικού παλμού υψηλής ισχύος στη λειτουργία των εν λόγω ιπτάμενων μέσων. Στη [8] μελέτη διαπιστώνεται η αξιοπιστία του ασύρματου καναλιού των χαμηλού κόστους UAV, έναντι παρεμβολών πεδίου της τάξης των 10 V/m σε συχνότητες εκτός της ζώνης λειτουργίας τους. Επιπρόσθετα, τα διάφορα υποσυστήματα και οι αισθητήρες τους φαίνεται να μην αντιμετωπίζουν ζωτικής σημασίας σφάλματα στη λειτουργία τους για ίδιας έντασης πεδίο. Μέσα από την πειραματική διαδικασία της έρευνας εξετάζεται η εν γένει H/M προστασία του UAV σε υψηλής έντασης H/M πεδίο εντός ανηχοϊκού θαλάμου. Η εν λόγω μελέτη δεν έχει ως αντικείμενο την εξέταση της επίδρασης του παλμού στα επιμέρους ηλεκτρονικά στοιχεία του μέσου αλλά αντιμετωπίζει το UAV ως ένα ενιαίο σύστημα.



Εικόνα 2.3 - Ανηχοϊκός Θάλαμος Εκτέλεσης Πειραμάτων

Πιο συγκεκριμένα, το UAV Mikrokopter που αποτελεί το αντικείμενο μελέτης στην εν λόγω έρευνα αποτελείται από δύο υποσυστήματα, διασυνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω σειριακής σύνδεσης. Τα υποσυστήματα αυτά αφορούν στην βαθμίδα Inertial Measurement Unit (IMU) που ελέγχει το γυροσκόπιο του drone και τη βαθμίδα πλοήγησης που λαμβάνει δεδομένα από το GPS. Οι δύο βαθμίδες ανταλλάσσουν δεδομένα τηλεμετρίας μεταξύ τους, κατά τη διάρκεια της πτήσης του μέσου και έχει καθεμία ένα ασύρματο κανάλι επικοινωνίας με την κονσόλα χειρισμού στα 2,4 GHz.

Οι εκπομπές H/M σημάτων υλοποιήθηκαν σε δύο περιοχές συχνοτήτων, όπως παρακάτω:

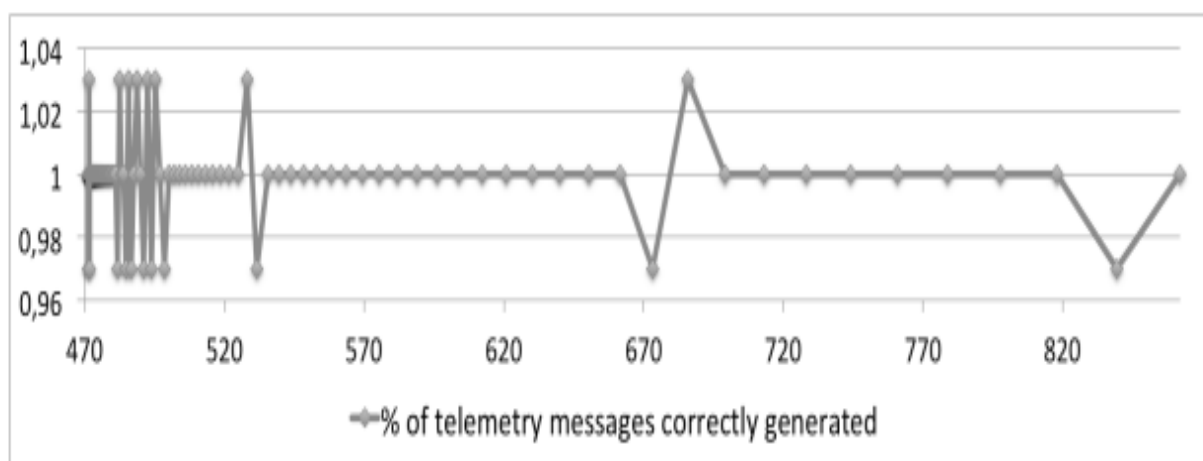
α. 470 – 862 MHz, για προσομοίωση εκπομπών της ψηφιακής τηλεόρασης.

β. 1,4 – 2,7 GHz, για εξέταση των παρεμβολών στη λειτουργία του GPS και στη ζεύξη δεδομένων.

Το drone εκτέθηκε σε πεδίο H/M ενέργειας στα 10 V/m και σε συχνότητες που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος με δυνατότητα αυτοματοποιημένης αλλαγής τους και με διεξαγωγή εκπομπών σε οριζόντια και κάθετη πόλωση.

Η αξιολόγηση της επίδρασης του πεδίου εκτιμήθηκε με βάση τη μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης των μηνυμάτων τηλεμετρίας και την ακεραιότητα αυτών στη σειριακή διασύνδεση των δύο υποσυστημάτων, καθώς και τη διερεύνηση για εύρεση μηνυμάτων αναφοράς δυσλειτουργίας των αισθητήρων και των κρίσιμων διεπαφών της συσκευής. Η εναλλαγή συχνότητας με σταθερό ρυθμό κατέστησε εφικτό τον υπολογισμό του λόγου των παραχθέντων προς τον αναμενόμενο αριθμό μηνυμάτων, ως ένδειξη παρεμβολής της λειτουργίας του UAV. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν έχουν ως εξής:

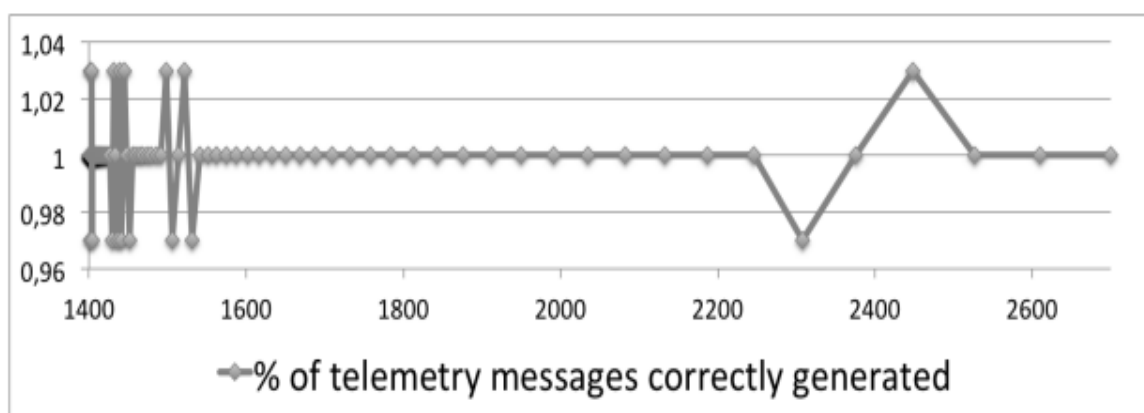
α. Στην πρώτη ζώνη (470-862 MHz), παρατηρήθηκε μικρή αύξηση του λόγου, λαμβάνοντας τιμές άνω του 1 (περισσότερα παραχθέντα από τα αναμενόμενα μηνύματα) σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. Ωστόσο το εύρος μεταβολής του λόγου (0,97 – 1,03) δεν αξιολογείται ως κρίσιμης σημασίας.



Εικόνα 2.4 - Ποσοστιαία Καταγραφή Ορθών Μηνυμάτων Τηλεμετρίας στη ζώνη 470 έως 862 MHz

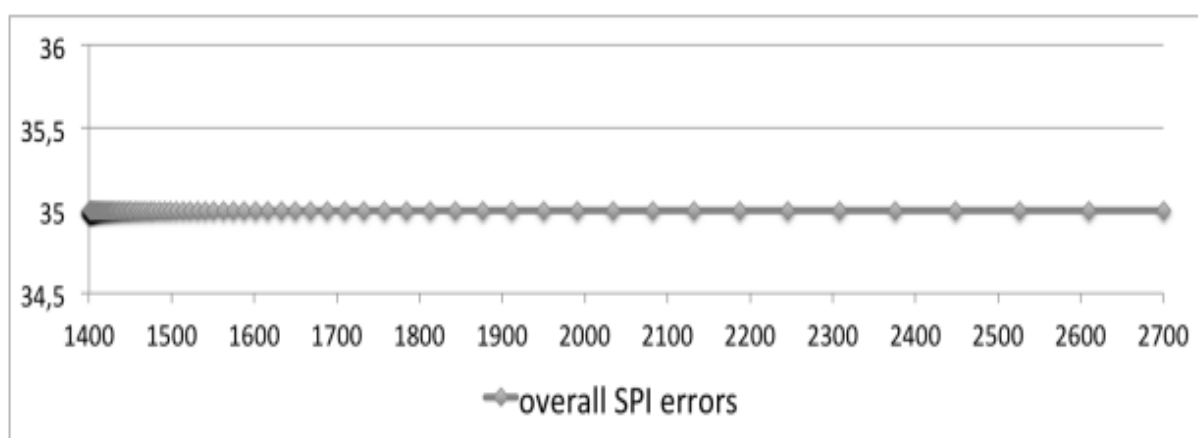
β. Στη δεύτερη ζώνη (1,4 – 2,7 GHz) πέραν της σταθερής εναλλαγής της συχνότητας, διενεργήθηκαν μετρήσεις και στους δύο τύπους πόλωσης της κεραίας (οριζόντια και κάθετη). Στην αρχή της εν λόγω ζώνης παρατηρείται μια διαρκή μεταβολή του λόγου και για τις δύο πολώσεις αλλά μετά τη συχνότητα των 1550 MHz ο λόγος

αυτός σταθεροποιείται στην τιμή 1, με εξαίρεση την υποζώνη 2250 -2600 MHz, όπου με κάθετη πόλωση της κεραίας παρατηρείται σταθερή αλλαγή του λόγου αυτού.



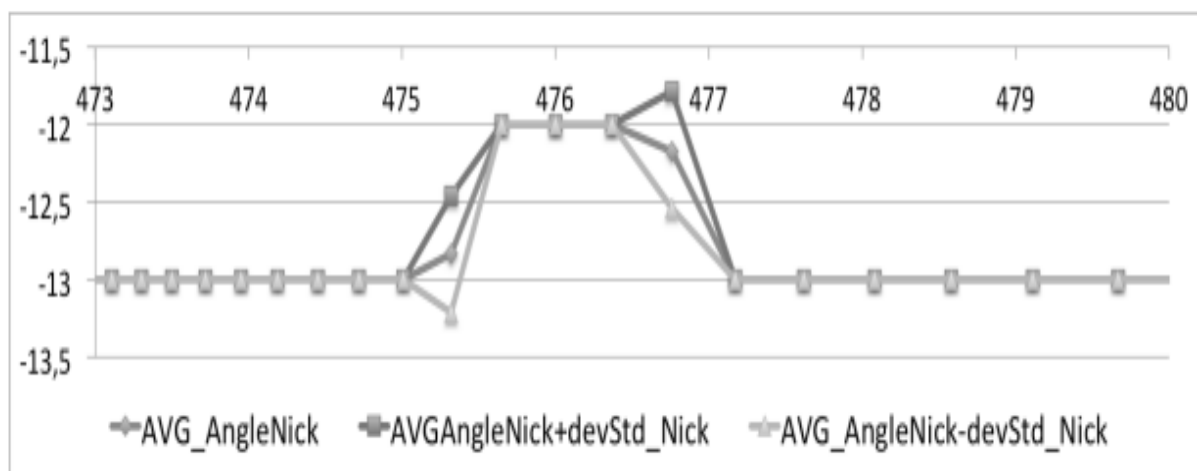
Εικόνα 2.5 - Ποσοστιαία Καταγραφή Ορθών Μηνυμάτων Τηλεμετρίας στη ζώνη 1,4 έως 2,7 GHz

γ. Ο αριθμός των αναφορών λαθών επικοινωνίας-δυσλειτουργίας της διασύνδεσης των υποσυστημάτων ακολούθησε τις προδιαγραφές του συστήματος, και η έκθεση της συσκευής στην ακτινοβολία δε φαίνεται να τροποποιεί τον αναμενόμενο αριθμό λαθών.



Εικόνα 2.6 - Μεταβολή Αριθμού Λαθών ανά Συχνότητα

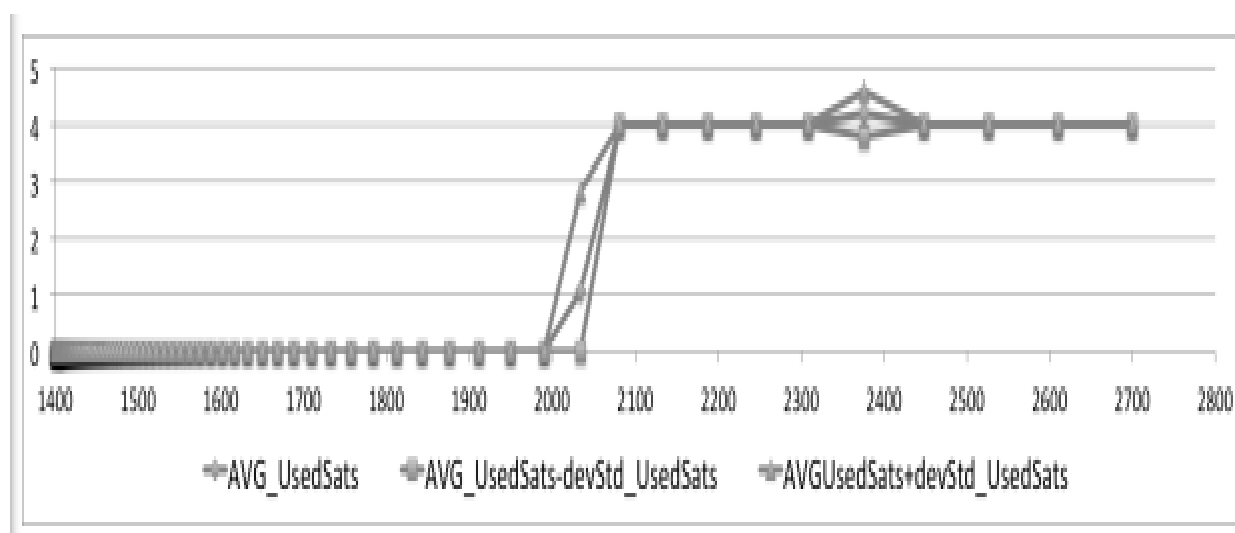
δ. Λόγω της στατικής θέσης του UAV, καθόσον κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν εκτελούσε πτήση, και των λειτουργιών φιλτραρίσματος κατά την εναλλαγή των συχνοτήτων, τα συλλεχθέντα δεδομένα από τους αισθητήρες, αναμένονταν σταθερά. Στην πρώτη περιοχή, πράγματι, οι εγγραφές των αισθητήρων βρίσκονται διαρκώς στο μέσο όρο, πλην μίας μόνο περιοχής εύρους 2 MHz, που παρατηρείται ελαφριά απόκλιση που αποδίδεται στο θόρυβο. Στη δεύτερη περιοχή ο αριθμός αυτός κινείται ομοίως στο μέσο όρο.



Εικόνα 2.7 - Καταγραφή Δεδομένων Αισθητήρων ανά Συχνότητα

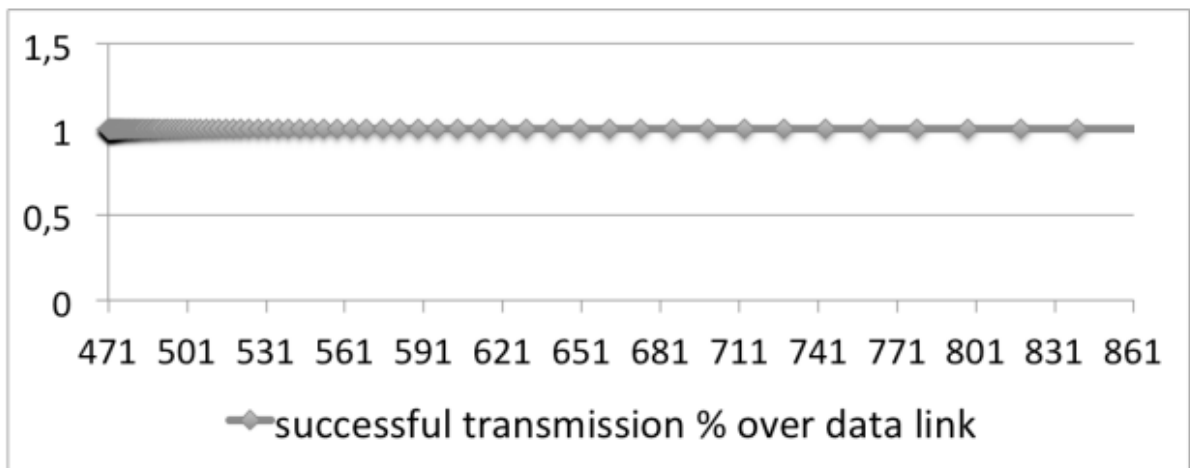
ε. Η πόλωση και η συχνότητα δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά των αισθητήρων.

στ. Το υποσύστημα του GPS εμφάνισε απώλεια σήματος μόνο κατά την έκθεσή του στο εύρος συχνοτήτων 1,4-2,7 GHz, όπου απαιτήθηκε η επανεκκίνησή του λόγω της παρεμβολής. Σημαντική διαπίστωση σε αυτό το σημείο είναι η διακοπή λειτουργίας του GPS, λόγω της έκθεσης στο Η/Μ σήμα, ακόμα και σε συχνότητες που διαφέρουν από το φασματικό εύρος λειτουργίας του GPS.

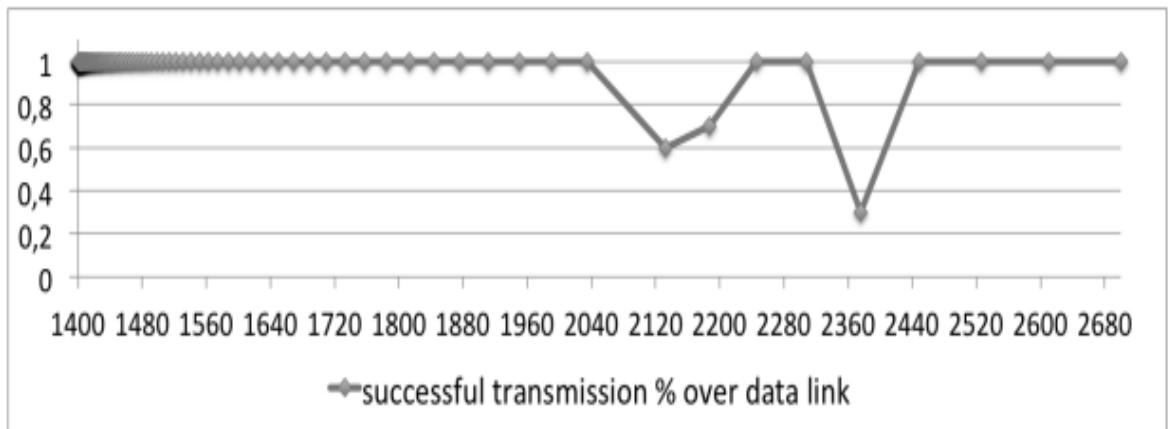


Εικόνα 2.8 - Καταγραφή Διακοπής Λειτουργίας GPS ανά Συχνότητα

ζ. Το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας εμφανίζεται ανθεκτικό στην παρεμβολή, με εξαίρεση τη συχνότητα όπου το σήμα παρεμβολής συμπίπτει με αυτή του καναλιού (2,405 GHz), και στην οποία παρατηρείται σημαντική υποβάθμιση και μεγάλος αριθμός λαθών στη μετάδοση. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται και όταν αλλαχθεί η πόλωση της κεραίας.



Εικόνα 2.9 - Παρακολούθηση Λειτουργίας Ασύρματου Καναλιού με παρεμβολή στη ζώνη 471 έως 861 MHz



Εικόνα 2.10 - Παρακολούθηση Λειτουργίας Ασύρματου Καναλιού με παρεμβολή στη ζώνη 1,4 έως 2,68 GHz

Επιγραμματικά, τα συμπεράσματα της [8] μελέτης δίνουν μια γενικά εικόνα για το βαθμό επίδρασης ενός ισχυρού πεδίου στη λειτουργία του drone και έχουν όπως παρακάτω:

- α. Αξιοπιστία ελέγχου της συσκευής, ακόμα και εντός ισχυρού Η/Μ πεδίου.
- β. Το σύστημα τηλεμετρίας παραμένει εξίσου αξιόπιστο.
- γ. Το GPS παρουσίασε απώλεια σήματος στην παρεμβολή εντός της ζώνης 1,4-2,7 GHz.
- δ. Το ασύρματο κανάλι παρουσιάζεται ανθεκτικό στην Η/Μ παρεμβολή, όταν δεν αφορά στη συχνότητα λειτουργίας του.

2.4 Μελέτη Πρόκλησης Δυσλειτουργίας στα Κανάλια Επικοινωνίας των ΜΕΑ

Ένα αρκετά πιο δημοφιλές και εμπορικό drone αποτελεί το αντικείμενο μελέτης [9] για την επίδραση λειτουργίας του, όταν εκτεθεί σε ένα ισχυρό ευρυζωνικό Η/Μ παλμό. Το μοντέλο Phantom 3 της εταιρείας DJI είναι το πιο δημοφιλές μοντέλο drone της κατηγορίας του, με ενσωματωμένο υποσύστημα GPS, πολλαπλούς αισθητήρες και δύο κανάλια επικοινωνίας σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων. Το κανάλι ελέγχου-χειρισμού του UAV εκμεταλλεύεται τη μπάντα από 5,725 έως 5,825 GHz ενώ το κανάλι τηλεμετρίας και μετάδοσης της εικόνας της ενσωματωμένης κάμερας αξιοποιεί τη ζώνη από 2,4 έως 2,483 GHz. Στην εν λόγω πειραματική μελέτη, εξετάζεται η πρόκληση από απόσταση, δυσλειτουργίας στο χειρισμό και την επικοινωνία, μέσω παρεμβολής στα κανάλια επικοινωνίας του drone με το χειριστή είτε στο σύστημα πλοήγησης (παρεμβολή GPS), το γνωστό jamming.

Στην εν λόγω μελέτη, ένα αξιοπρόσεκτο σημείο αναφοράς είναι η αξιολόγηση τριών διαφορετικών τύπων ακτινοβολήσης, ως προς τις κρίσιμες παραμέτρους του Η/Μ παλμού και ο υπολογισμός της απόστασης από την οποία είναι δυνατή η πρόκληση κρίσιμων δυσλειτουργιών στο ιπτάμενο μέσο. Το μέγεθος που ορίζεται ως συγκριτικό χαρακτηριστικό (figure of merit) της παραμετροποίησης των ακτινοβολητών είναι το γινόμενο της δύναμης του πεδίου σε kV/m επί την απόσταση μέτρησής του, δηλαδή:

$$FOM = E \times R$$

Η παραμετροποίηση των τριών ακτινοβολητών φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:

Parameter	Value		
	R-1	R-2	R-3
Figure of merit (FOM), kV	49.5	3.5	1.6
Pulse full width at half maximum (FWHM), ps	270	200	200
Repetition rate, kHz	1	300	1000
Antenna Type	4 TEM-horns (2x2)	4 TEM-horns (4x1)	4 TEM-horns (2x2)

Εικόνα 2.11 - Παραμετροποίηση Ακτινοβολητών

Το πλάτος του φάσματος που καταλαμβάνει ο παλμός και στις τρεις περιπτώσεις είναι αρκετά ευρύ, με ενδεικτικές τιμές εύρους συχνοτήτων τα 2-3 GHz, μέγιστη τιμή FOM στη ζώνη 1-2 GHz (1η παραμετροποίηση ακτινοβολητή) και στενότερο εύρος αλλά 300 φορές υψηλότερο ρυθμό επανάληψης (2^η παραμετροποίηση).

Οι δυσλειτουργίες που εμφανίστηκαν κατηγοριοποιήθηκαν με κριτήριο την αναστρεψιμότητά τους. Στην πρώτη κατηγορία (type A), η εμφανιζόμενη δυσλειτουργία οδηγεί στην ενεργοποίηση αυτόματης διαδικασίας προσγείωσης και απαιτεί την επανεκκίνηση του συστήματος για να επανακτηθεί ο έλεγχος του drone. Στη δεύτερη

κατηγορία (type B), η δυσλειτουργία είναι αναστρέψιμη, εφόσον διακοπεί η έκθεση του drone στην ακτινοβολία και εκτελείται η τελευταία καταχωρημένη εντολή.

Τα σημαντικά συμπεράσματα της υπόψη μελέτης είναι ότι ο υψηλός ρυθμός επανάληψης παλμού (PRF) δημιουργεί αναστρέψιμες δυσλειτουργίες (τύπου B), οι οποίες όμως αποδίδονται στο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί και όχι αυτοτελώς στον υψηλό ρυθμό επανάληψης του παλμού. Ουσιαστικά δηλαδή όταν ξεπεραστεί ένα κατώφλι, η αύξηση της τιμής του PRF δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα δημιουργίας της δυσλειτουργίας.

Από την άλλη πλευρά, ο ακτινοβολητής r1 του πίνακα, παρά τη μικρή τιμή του PRF, προκαλεί μη αναστρέψιμες βλάβες (type A), λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί στην κατεύθυνση του drone.

Μέσω της διεξαγωγής των δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη ακτίνα πρόκλησης μη αναστρέψιμων δυσλειτουργιών από ακτινοβολητή με την r1 παραμετροποίηση είναι τα 35 μέτρα και με την r2 παραμετροποίηση τα 50 μέτρα. Η επέκταση των αποστάσεων αυτών σε μερικές εκατοντάδες μέτρα θεωρείται εφικτή με κατάλληλη παραμετροποίηση και έξυπνο σχεδιασμό του συστήματος εκπομπής.

2.5 Μελέτη Κατηγοριοποίησης και Τρωτότητας των ΜΕΑ

Μια πιο συγκεκριμένη ανάλυση της κατηγοριοποίησης των UAV επιχειρείται στην [10]. Πέραν των μετρήσιμων χαρακτηριστικών, όπως το βάρος τους, η εμβέλεια τους, η διάρκεια πτήσης, το μέγιστο ύψος πτήσης, η ταχύτητα ή το φορτίο του, βάση των οποίων μπορεί να συσταθούν ευρείες ομάδες drone, εισάγεται η κατηγοριοποίηση με γνώμονα το ποιοτικό χαρακτηριστικό της «εξυπνάδας» της συσκευής, το οποίο πρακτικά απλοποιεί τον έλεγχο της πτήσης και εξασφαλίζει την αυτόματη προστασία της συσκευής.

Επιπρόσθετα, στην υπόψη μελέτη γίνεται διάκριση του συστήματος των UAV στο επίγειο και στο εναέριο μέρος. Το επίγειο μέρος του συστήματος περιλαμβάνει το προσωπικό χειρισμού και τα υποσυστήματα απομακρυσμένου ελέγχου και λήψης του φορτίου, ήτοι π.χ. δεδομένα, εικόνα, βίντεο, υποσύστημα επιτήρησης κ.ά. Η επικοινωνία του χειριστή με τα δύο υποσυστήματα υλοποιείται μέσω δύο RF ζεύξεων, ένα για την ανταλλαγή δεδομένων ελέγχου του drone και ένα για τη λήψη της εικόνας και video. Το εναέριο υποσύστημα συντίθεται από την κεντρική μονάδα, τους αισθητήρες, τα πτητικά μέσα και το φορτίο του drone (κατά βάση οπτικό).

Η πειραματική φάση της εργασίας περιλαμβάνει την ανάλυση του στόχου-drone σε πολλαπλές διεπαφές σύζευξης. Οι διεπαφές που μπορεί να λειτουργήσουν ως πηγές σύζευξης είναι οι παρακάτω:

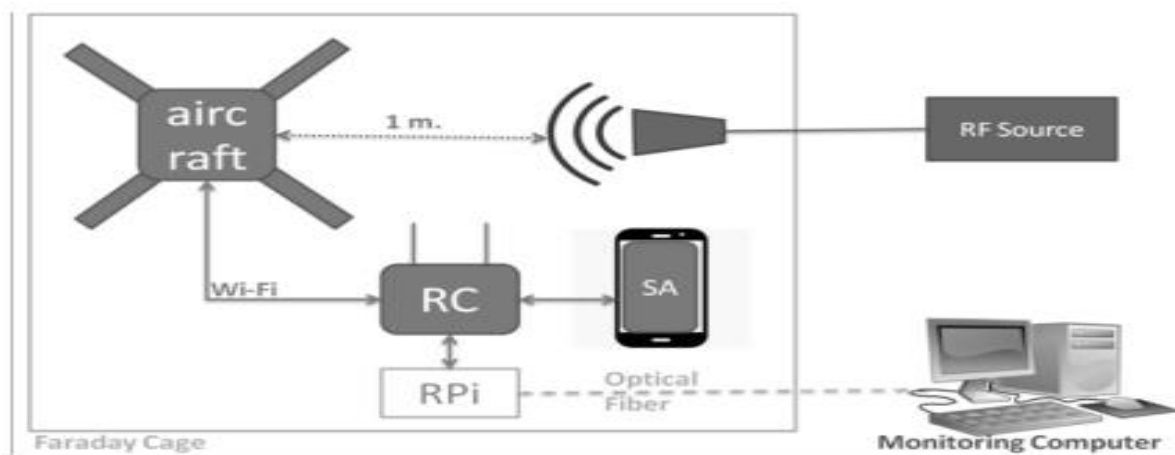
α. Απευθείας σύζευξη

Δύναται να πραγματοποιηθεί μέσω της κεραίας του Wi-Fi, του καναλιού ελέγχου του drone στα 5,8 GHz και μέσω του GPS.

β. Έμμεση σύζευξη

Δύναται να προκύψει μέσω της καλωδίωσης του κινητήρα, της τυπωμένης πλακέτας, της τροφοδοτικής διάταξης, των αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων και των αισθητήρων του drone.

Για την ανάλυση της επίδρασης της έκθεσης του drone σε Η/Μ ακτινοβολία υλοποιήθηκε η τοπολογία, εντός κλωβού Faraday, όπως στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2.12 - Τοπολογία Πειράματος

Μέσω της διασύνδεσης με το Wi-Fi και με τη χρήση κατάλληλης συνδεσμολογίας έξυπνων συσκευών κατεγράφησαν τα logs του drone για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων περί της πρόκλησης τυχόν παρεμβολών.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, το drone στην απόσταση του ενός μέτρου εκτέθηκε σε continuous wave ακτινοβολία κεραίας οριζόντιας πολώσεως, στο εύρος συχνοτήτων από 100 MHz έως 2 GHz διαμορφωμένη κατά πλάτος και με PRF στο εύρος από 1 Hz έως 20 KHz. Σε όλες τις μετρήσεις έγινε καταγραφή του ηλεκτρικού πεδίου στο οποίο εκτέθηκε το UAV και αναζητήθηκε η συσχέτιση της παραμετροποίησης της πηγής με τα αποτελέσματα στη λειτουργία του. Επιπλέον, το σήμα GPS παρέμενε ανενεργό, όπως είναι φυσικό, λόγω της απομόνωσης στο εσωτερικό του κλωβού.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εν λόγω μελέτη σε σχέση με την έκθεση του drone στην ακτινοβολία, είναι τα παρακάτω:

α. Τα λάθη που προέκυψαν, όπως φάνηκε από την πρόσβαση στα δεδομένα, έχουν αντίκτυπο στον αισθητήρα θερμοκρασίας και συγκεκριμένα κατεγράφη απόκλιση 10 βαθμών σε ένα εύρος τιμών έντασης πεδίου μεταξύ των 75 και 95 V/m.

β. Τα λάθη πρόσβασης της μονάδας ελέγχου στα δεδομένα σχετίζονται με το ηλεκτρικό πεδίο που προσπίπτει στο drone.

γ. Οι αισθητήρες του drone κατέγραψαν λανθασμένα δεδομένα ως προς την κάθετη του ταχύτητα.

δ. Η καταγραφή του υψομέτρου επηρεάζεται κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης, αλλά το drone σε πραγματικές συνθήκες πλοηγείται με το GPS του.

ε. Παρατηρήθηκαν διακοπές των RF ζεύξεων αλλά και διακοπή των εσωτερικά ενσωματωμένων link του UAV, καθώς και υποβάθμιση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στις διεπαφές του.

Το ηλεκτρικό πεδίο που μετρήθηκε όταν παρατηρήθηκαν τα ανωτέρω δυσμενή αποτελέσματα στο drone, απεικονίζεται στον ακόλουθο πίνακα:

Observable	Field magnitude	Effect
Embedded serial protocol rate	75 V/m	Disruption
Vertical speed	55 V/m	Unrealistic variations
Yaw angle	100 V/m	Unrealistic variations
Gimbal data	100 V/m	Loss of sensor data at the ground station

Εικόνα 2.13 - Κατώφλι Πεδίου για Πρόκληση Παρεμβολής

Η ανωτέρω μελέτη εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά του UAV και των επιμέρους εξαρτημάτων του, κατά την έκθεσή του σε ισχυρό πεδίο, με καταγραφή των πραγματικών αποτελεσμάτων-συνεπειών στη λειτουργία του αλλά και των εκάστοτε απαιτούμενων τιμών του πεδίου έτσι ώστε αυτά να αποκτήσουν κρίσιμη σημασία. Από την άλλη πλευρά, η μη δυνατότητα αξιοποίησης του GPS εντός του εργαστηριακού περιβάλλοντος των δοκιμών δημιουργεί μερική ασάφεια περί της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, καθόσον σε πραγματικές συνθήκες πτήσης η παρέμβαση του στη διόρθωση αυτών των αποκλίσεων δεν μπορεί να αποκλειστεί.

Κεφάλαιο 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟ ΕΥΡΟΣ 1,5 – 2,5 GHz ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΜΕΑ

3.1 Πειραματικός Εξοπλισμός

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση των συσκευών- οργάνων μέτρησης που συνθέτουν τα δομικά στοιχεία της διάταξης του πειράματος, καθώς και παρατίθενται βασικά στοιχεία λειτουργίας των drone – στόχων, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η δυσλειτουργία που εκδηλώνεται, όταν εκτίθενται σε ελεγχόμενα μεταβαλλόμενο, ως προς τη συχνότητα εκπομπής, παραμετροποιημένο μικροκυματικό παλμό υψηλή ισχύος. Σύνομη αναφορά γίνεται επίσης στις συνθήκες διάδοσης του παλμικού σήματος και στους περιορισμούς που καθόρισαν την όλη πειραματική διαδικασία.

3.1.1 Γενικά

Ο διαθέσιμος πειραματικός εξοπλισμός επέτρεψε την παραμετροποίηση του παλμικού μικροκυματικού σήματος, σύμφωνα με τις ανάγκες διεξαγωγής του πειράματος ενώ δεν παρατηρήθηκαν δυσλειτουργίες-βλάβες στα επιμέρους στοιχεία του, καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Ενδεχόμενες προτάσεις τροποποίησης των επιμέρους δομικών στοιχείων θα αναφερθούν ως μελλοντικές προεκτάσεις στον επίλογο της παρούσας εργασίας.

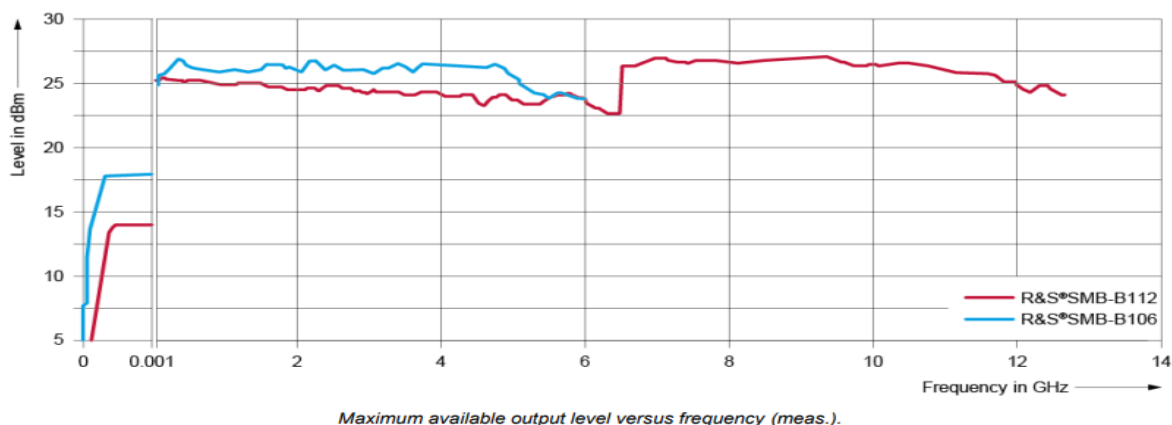
3.1.2 Γεννήτρια παραγωγής σημάτων βασικής ζώνης [11]

Η γεννήτρια παραγωγής σημάτων βασικής ζώνης της εταιρείας Rohde & Schwarz SMB 100A αξιοποιήθηκε για την παραγωγή μικροκυματικών κυματομορφών εντός του επιθυμητού εύρους συχνοτήτων (1,5 έως 2,5 GHz).



Εικόνα 3.1 - Γεννήτρια Παραγωγής Σήματος Βασικής Ζώνης Rohde & Schwarz SMB 100A

Το ονομαστικό εύρος συχνοτήτων λειτουργίας της γεννήτριας εκτείνεται από 9 kHz έως 6 GHz και μπορεί να παράγει υψηλή ισχύ της τάξης των 27 dBm (0,5 W) στην περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος του πειράματος.



Εικόνα 3.2 -Επίπεδο Ισχύος Εξόδου Γεννήτριας με τη μεταβολή της συχνότητας

Παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης ψηφιακής εναλλαγής (κύλισης) της συχνότητας (frequency sweep) σε όλο το εύρος λειτουργίας της ή σε επιλεγμένο τμήμα αυτού, με ελάχιστο βήμα το 0,001 Hz. Ο χρόνος παραμονής (dwell time) σε κάθε βήμα αλλαγής συχνότητας δύναται να καθορισθεί στο χρονικό εύρος (dwell time range) από 10 msec έως 10 sec με ελάχιστο χρονικό βήμα (dwell time resolution) το 0,1 msec. Δίνει τη δυνατότητα διαμόρφωσης του παραγόμενου σήματος κατά πλάτος (AM), συχνότητα (FM) και φάση (PM), ενώ τα νέα μοντέλα της σειράς γεννητριών έχουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης παλμού (Pulse Modulation).

Το περιβάλλον λειτουργίας του λογισμικού της γεννήτριας είναι windows και δίνει τη δυνατότητα πλήρους ελέγχου και δικτυακής παραμετροποίησής της, μέσω κατάλληλου γραφικού interface.

3.1.3 Γεννήτρια Διαμόρφωσης [12]

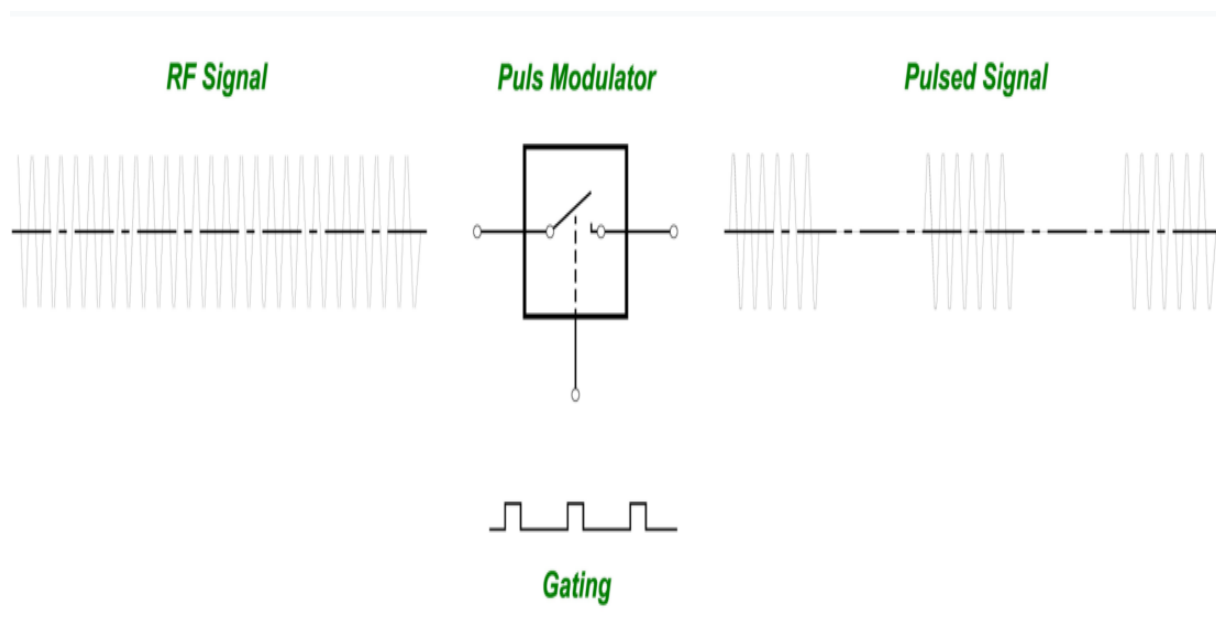
Η διαμόρφωση και η παραμετροποίηση του παλμικού σήματος υλοποιήθηκε με τη γεννήτρια RF διαμόρφωσης κυματομορφών Agilent 33220A.



Εικόνα 3.3 - Γεννήτρια Διαμόρφωσης RF κυματομορφών Agilent 33220A

Η γεννήτρια μπορεί να παράγει παλμούς διαφόρων τύπων (sine, square, ramp, triangle, pulse, noise, DC), συχνότητας έως 5 MHz. Δίνει τη δυνατότητα πλήρους παραμετροποίησης του παλμού με τον καθορισμό του/της:

- α. συχνότητας επανάληψης των παλμών (PRF).
- β. διάρκειάς τους.
- γ. κύκλου λειτουργίας (duty cycle).
- δ. πλάτους.



Εικόνα 3.4 - Διαμόρφωση RF κυματομορφών

Υποστηρίζει τη διαμόρφωση των παραμέτρων για AM, FM, PM, FSK και PWM (Pulse Width Modulation) σήματα και δίνει τη δυνατότητα καθορισμού ακόμα και Frequency Hopping pattern καθορίζοντας το ρυθμό εναλλαγής συχνοτήτων.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας, ο χειρισμός και παραμετροποίηση της συσκευής γινόταν χειροκίνητα, καθώς δεν υφίσταται η δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης της συσκευής.

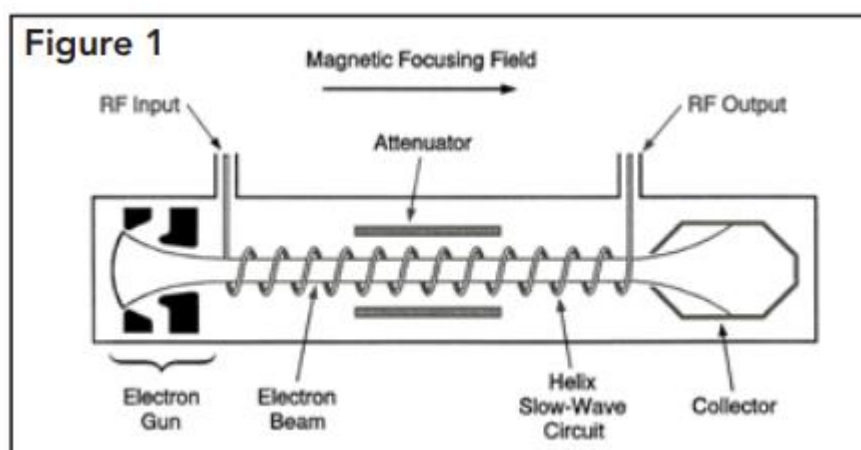
3.1.4 Συσκευή Ενίσχυσης Ισχύος Παλμών [13]

Ο ενισχυτής ισχύος παλμών BONN Elektronik TWAP 0103-1000 επιτυγχάνει την ενίσχυση του παλμικού σήματος στην είσοδο του εκμεταλλευόμενος την τεχνολογία TWT (Travelling Wave Tube).



Εικόνα 3.5 - Ενισχυτής BONN Elektronik TWAP 0103-1000

Συνοπτικά η αρχή λειτουργίας της κατηγορίας αυτής των ενισχυτών έγκειται στην εκπομπή μίας δέσμης ηλεκτρονίων από την κάθοδο, η ροή της οποίας ενισχύεται κατά μήκος του κυκλώματος, λόγω τη διάδρασής της με το ίδιας κατεύθυνσης ισχυρό πεδίο του προς ενίσχυση μικροκυματικού παλμικού σήματος εισόδου, και το οποίο διέρχεται ενισχυμένο από το συλλέκτη στο άλλο άκρο του ενισχυτή.



Εικόνα 3.6 -Λειτουργία Travelling Wave Tube(TWT)

Ο ενισχυτής BONN λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων από 1,0 GHz - 2,5 GHz με μέγιστη ισχύ εξόδου 1 KW (60 dbm) +/- 7,5 % ενώ οι τεχνικές προδιαγραφές υποστηρίζουν κύκλο λειτουργίας (duty cycle) έως 6 % και μέγιστη συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) έως 50 KHz.

3.1.5 Φίλτρο - Κυκλοφορητής [14]

Για την αποκοπή ανεπιθύμητων συχνοτήτων και ειδικότερα της 2ης αρμονικής που παράγεται από τον TWT ενισχυτή χρησιμοποιήθηκε το ζωνοπερατό φίλτρο συχνοτήτων τύπου HD 30267-A, με ζώνη διέλευσης 1,5 - 2,5 GHz.



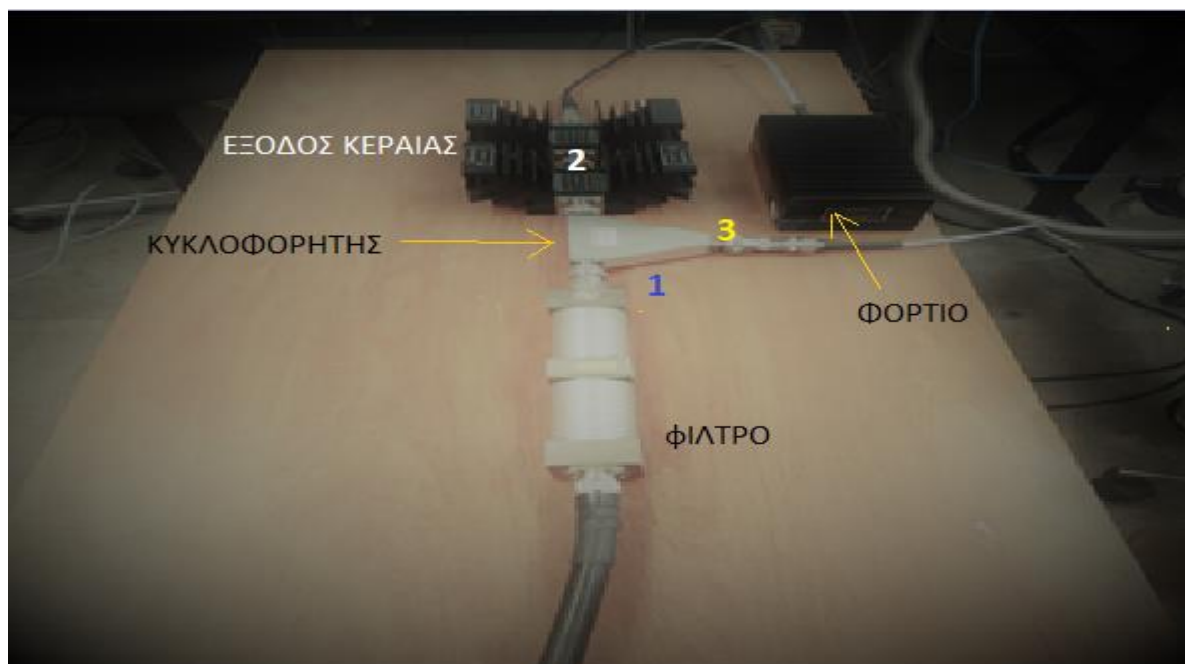
Εικόνα 3.7 -Φίλτρο HD 30267-A με ζώνη διέλευσης 1,5 - 2,5 GHz

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκε διάταξη κυκλοφορητή για την ορθή μετάδοση του ενισχυμένου μικροκυματικού σήματος στην κεραία και την προστασία του ενισχυτή από ενδεχόμενες ανακλάσεις.



Εικόνα 3.8 -Κυκλοφορητής Raditek

Οι κυκλοφορητές τύπου Y-junction 3 θυρών, επί της αρχής, μεταφέρουν το σήμα εισόδου εξ' ολοκλήρου από τη μία πόρτα στην άλλη διαδοχικά, απομονώνοντας την τρίτη πόρτα. Σε περίπτωση που προκύψει κάποιου είδους ανεπιθύμητο σήμα (π.χ. ανακλώμενο), αυτό οδηγείται μέσω της τρίτης πόρτας σε κατάλληλο φορτίο για να επιτευχθεί η απόσβεσή του και η γενικότερη προστασία της διάταξης.



Εικόνα 3.9 -Συνδεσμολογία Κυκλοφορητή¹

3.1.6 Κεραία [15]

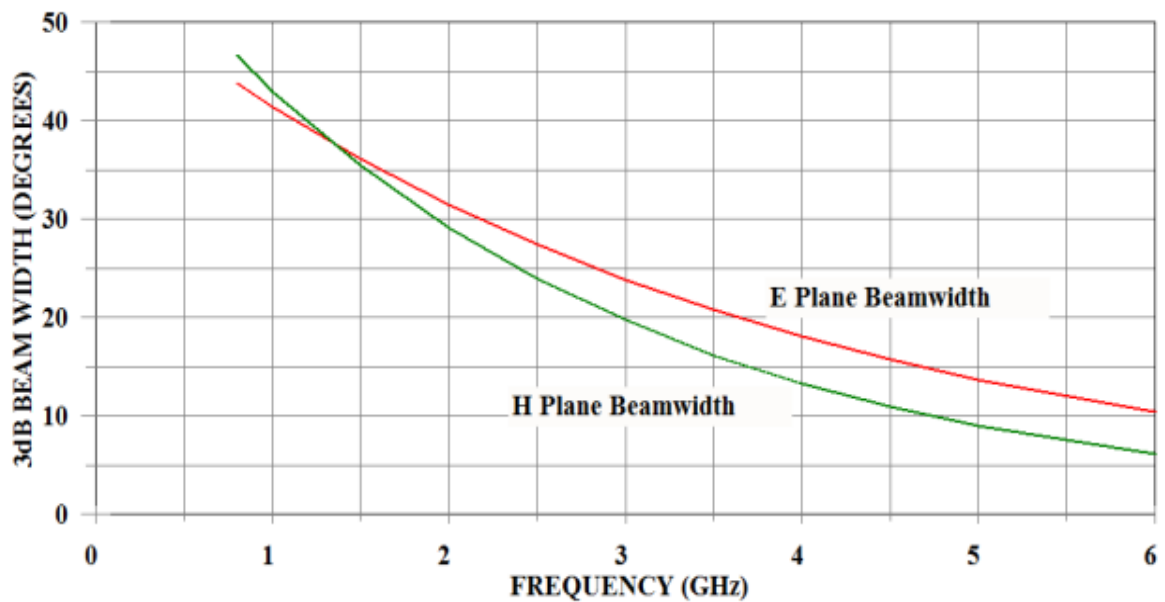
Για την εκπομπή της ενισχυμένης παλμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε η μικροκυματική κεραία τύπου χοάνης μοντέλου ATH800M5GA της εταιρείας Amplifier Research.



Εικόνα 3.10 -Κεραία ATH800M5GA της εταιρείας Amplifier Research

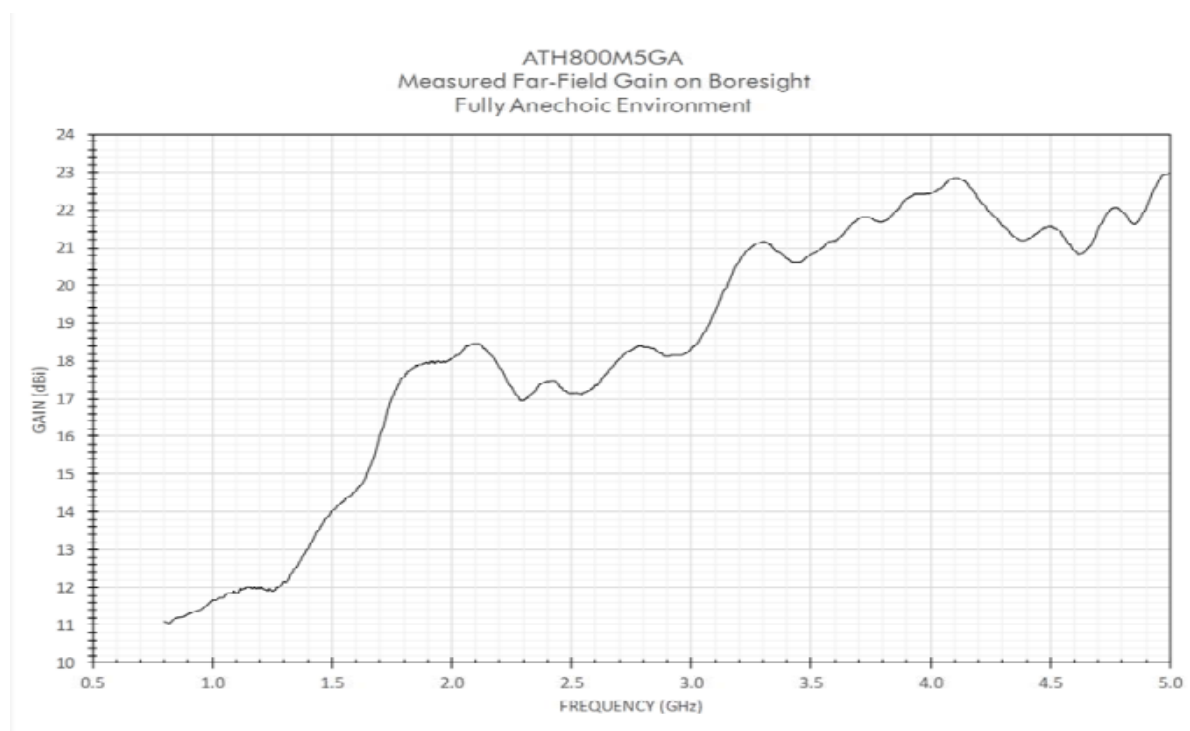
Πρόκειται για μία κεραία υψηλού κέρδους, ειδικά σχεδιασμένη για τη δημιουργία και την εργαστηριακή δοκιμή ισχυρών πεδίων. Ο τρόπος κατασκευής της κεραίας εξασφαλίζει την υψηλή κατευθυντικότητα της έτσι ώστε να δημιουργούνται ιδανικές συνθήκες για εργαστηριακές δοκιμές σε απόσταση έως 3 μέτρα.

¹ Σύνδεση 1: Φίλτρο εύρους συχνοτήτων 1,5 έως 2,5 GHz
 Σύνδεση 2: Κεραία
 Σύνδεση 3: Εξασθενητής



Εικόνα 3.11 -Διάγραμμα Κατευθυντικότητας Κεραίας (ανά πόλωση) στο Εύρος Συχνοτήτων της

Το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας εκτείνεται από 800 MHz έως 5 GHz, με ελάχιστο μακρινό πεδίο τα 11 dbi. Το κέρδος της κεραίας ανά συχνότητα λειτουργίας σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 3.12 -Κέρδος Κεραίας σε dbi στο Εύρος Συχνοτήτων Λειτουργίας της

Τα αναλυτικά τεχνικά στοιχεία της κεραίας, έχουν όπως στον παρακάτω πίνακα:

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Ονομαστικές Τιμές
Εύρος Συχνοτήτων	0,8 έως 5 GHz
Κέρδος Κεραίας	11 έως 21 dbi
Αντίσταση	50 Ohm
Σύνδεσμος	Type N(F)
Βάρος	7,26 kg
Διαστάσεις	46.3 x 46.3 x 69.2 cm

Πίνακας 3.1–Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κεραίας ATH800M5GA

3.1.7 Όργανο Μέτρησης Πεδίου [16]

Για τις διαδοχικές μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε το πεδιόμετρο Narda NBM 550. Το εν λόγω πεδιόμετρο μετράει με εξαιρετική ακρίβεια μη-ιονισμένη ακτινοβολία στο εύρος συχνοτήτων από 100 KHz έως 60 GHz. Δύναται με χρήση κατάλληλης κεραίας να «αντιληφθεί» παλμό διάρκειας 1 μsec και με duty cycle της τάξης του 1%.



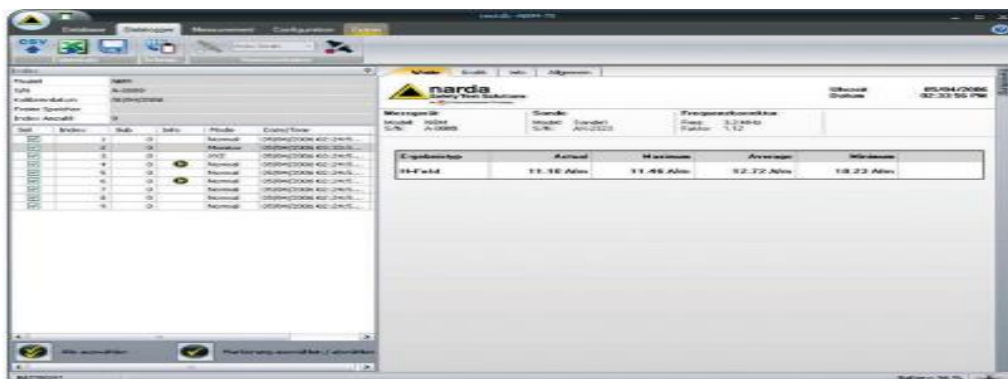
Εικόνα 3.13 -Πεδιόμετρο Narda NBM 550 [36]

Το menu χειρισμού του προσφέρει ένα πλήθος δυνατοτήτων παραμετροποίησης του, καθώς και δυνατότητα επιλογής του τύπου του αποτελέσματος μέτρησης. Αναλυτικότερα, ο χρήστης δύναται να επιλέξει την απεικόνιση αποτελεσμάτων ως εξής:

- α. Πραγματική τιμή πεδίου στο χρόνο (Actual).
- β. Μέση τιμή πεδίου (Average).
- γ. Μέγιστη τιμή πεδίου (Max Avg).

Η επιλογή της μονάδας μέτρησης ισχύος περιλαμβάνει την καταμέτρηση σε W/m^2 ή mW/cm^2 και οι μονάδες μέτρησης (RMS τιμές) της έντασης του πεδίου δύναται να ληφθούν σε V/m ή A/m .

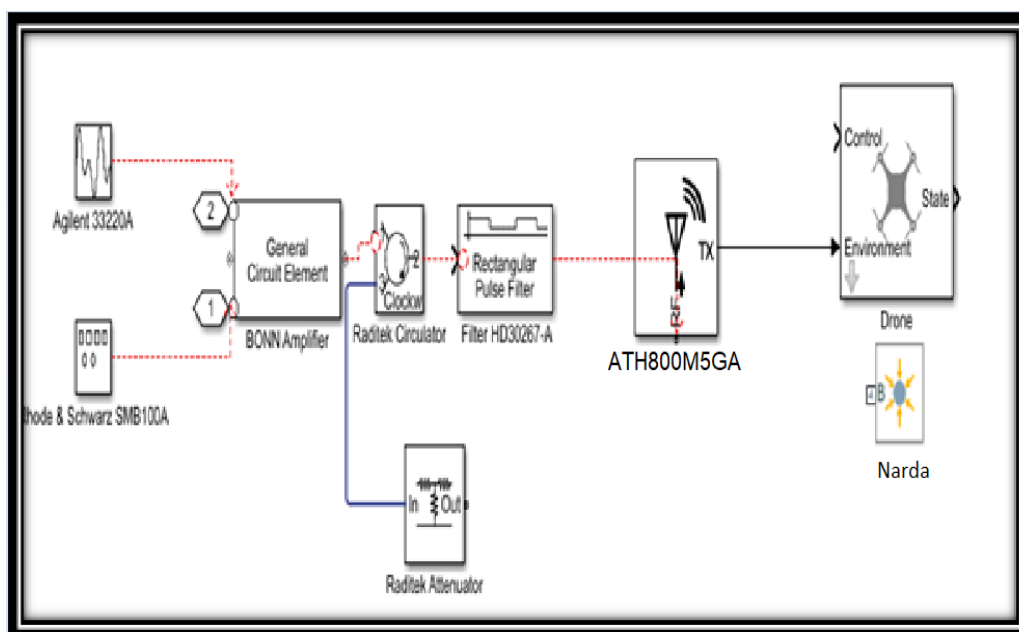
Η τροφοδοσία του με ρεύμα γίνεται μέσω τροφοδοτικού ή με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Επιπρόσθετα, το πεδίομετρο παρέχει τη δυνατότητα διασύνδεσης με Η/Υ, μέσω μοντέρνων διεπαφών (USB, οπτική ίνα), για τον απομακρυσμένο χειρισμό και παραμετροποίηση του, με χρήση της εφαρμογής NBM-TS. Μέσω της εφαρμογής υλοποιείται και η βαθμονόμηση της συσκευής για την εγκυρότητα των μετρήσεων.



Εικόνα 3.14 -Περιβάλλον Εφαρμογής NBM-TS για διαχείριση πεδίομετρου NARDA

3.2 Διάταξη Παραγωγής Μικροκυματικού Παλμού

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή παλμών απεικονίζεται στην Εικόνα 3.15.



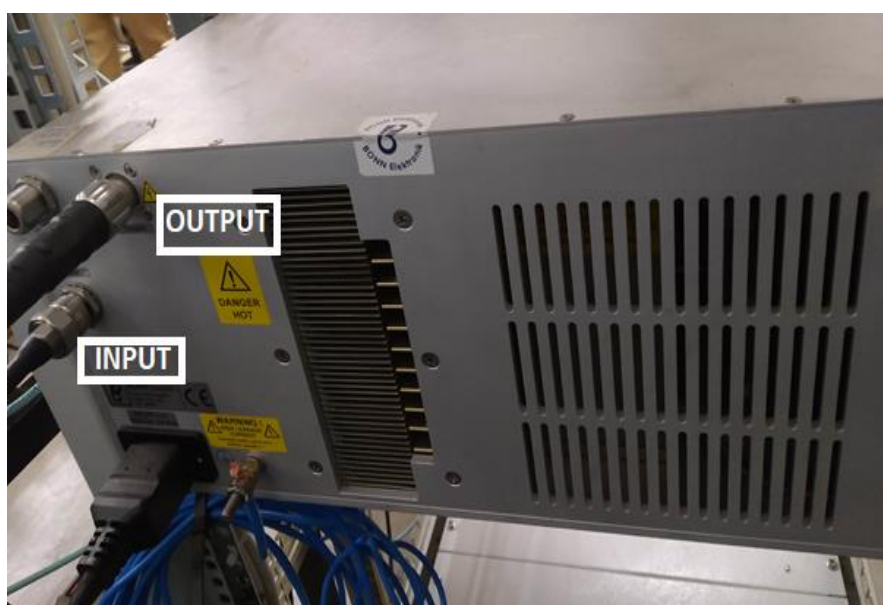
Εικόνα 3.15 -Τοπολογία και Διασύνδεση Συσκευών

Σύμφωνα με την τοπολογία της διάταξης, το RFσήμα παράγεται από την αναλογική γεννήτρια RSSMB100A (RFASG) με χαμηλό επίπεδο ισχύος. Τα χαρακτηριστικά της παλμικής διαμόρφωσης -διάρκεια παλμού και συχνότητα επανάληψης παλμών - καθορίζονται από τη γεννήτρια χαμηλών συχνοτήτων Agilent 33220A (Pulse Modulation).



Εικόνα 3.16 -Τοπολογία και Διασύνδεση Συσκευών για την παραγωγή και διαμόρφωση σήματος

Αυτό το σήμα χαμηλό ισχύος ενισχύεται από τον παλμικό ενισχυτή Bonn TWAP 0103-1000 (TWT), ο οποίος στην έξοδο του παράγει ένα παλμικό σήμα με πλάτος κορυφής έως και 280 V (ισχύ κορυφής 1.6kW).



Εικόνα 3.17 -Συνδεσμολογία στο οπίσθιο μέρος του ενισχυτή BONN

Η έξοδος του ενισχυτή τροφοδοτεί την κεραία, αφού το προς εκπομπή σήμα διέλθει από τα παρακάτω δύο μικροκυματικά στοιχεία:

α. Ένας μικροκυματικός κυκλοφορητής (Circulator), εισάγεται στη διάταξη για την προστασία των κυκλώματα εξόδου του ενισχυτή, σε περίπτωση ανεπιθύμητης επιστροφής ανακλώμενης ισχύος. Ο κυκλοφορητής κατευθύνει τυχόν ανακλώμενο σε προσαρμοσμένο φορτίο (Z_0 Load), το οποίο συνδέεται στην τρίτη θύρα του, προκειμένου να εξασθενήσει και να μην επηρεάσει τη λειτουργικότητα των λοιπών κυκλωμάτων.

β. Ένα Φίλτρο (Filter), το οποίο χρησιμοποιείται προκειμένου να αποκόπτεται την ανεπιθύμητη διέλευση συχνοτήτων εκτός της ζώνης λειτουργίας τους. (1,5 έως 2,5 GHz).

Η έξοδος του φίλτρου συνδέεται με την εντός του ανηχοϊκού θαλάμου κεραία μέσω ομοαξονικού καλωδίου σχετικά μικρού μήκους, που πληροί κατάλληλες και ελεγμένες προδιαγραφές για τον περιορισμό των απωλειών. Η διασύνδεση με την κεραία, που βρίσκεται εντός του ανηχοϊκού θαλάμου, εξυπηρετείται από κατάλληλης κατασκευής και διαστάσεων πάνελ διασύνδεσης καλωδίων.



Εικόνα 3.18 -Πάνελ εισόδου καλωδιώσεων εντός του ανηχοϊκού θαλάμου

Για την καταγραφή των αποτελεσμάτων της εκπομπής του μικροκυματικού παλμού στη λειτουργία των drone, τοποθετήθηκε σε κατάλληλη θέση εντός του ανηχοϊκού θαλάμου κάμερα με ενσωματωμένο μικρόφωνο έτσι ώστε η οποιαδήποτε επίδραση να εντοπίζεται και να καταγράφεται μέσω των οπτικών και ηχητικών σημάτων που εκπέμπει το τελευταίο, όταν επηρεάζεται η φυσιολογική λειτουργία του.

3.3 Περιγραφή του ΜΕΑ –Στόχου [17]

Για την καταγραφή των αποτελεσμάτων της έκθεσης ενός ΜΕΑ σε μικροκυματικό παλμό υψηλής ισχύος, προκειμένου να καταγραφεί η συμπεριφορά του σε διαφορετικές συχνότητες, χρησιμοποιήθηκε το τετρακόπτερο Quantum Nova. Το συγκεκριμένο drone είναι ένα σχετικά χαμηλού κόστους ΜΕΑ, με σύγχρονες και προηγμένες δυνατότητες για τα αεροχήματα της κατηγορίας του, όπως η στατική αιώρηση, η χρήση συστήματος γεωγραφικού εντοπισμού (GPS) για τον προσανατολισμό του και για την εκτέλεση προκαθορισμένου σχεδίου πτήσης, ακόμα και η αυτόματη επιστροφή στο σημείο απογείωσης σε έκτακτες καταστάσεις. Διαθέτει ενσωματωμένη πυξίδα και αισθητήρα καταγραφής υψομέτρου.



Εικόνα 3.19 – Drone Quantum Nova Pro

Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τετρακόπτερου παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Χαρακτηριστικό ΜΕΑ	Τιμή
Διάμετρος Βραχίονα	365 mm
Διάμετρος Πτερυγίου	205 mm
Μήκος	300 mm
Πλάτος	300 mm
Ύψος	200 mm
Βάρος	875 gr.
Χρόνος Αυτονομίας	15 min.
Τροφοδοσία	LiPo (Lithium - polymer) 2700 mAh

Πίνακας 3.2 – Τεχνικά Χαρακτηριστικά Drone Quanam Nova Pro

Ο χειρισμός του drone γίνεται με το αντίστοιχο χειριστήριο, μέσω του οποίου επιλέγονται οι διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του. Οι ενέργειες επί του ΜΕΑ γίνονται μέσα από συγκεκριμένες και αυστηρά καθορισμένες διαδικασίες και η ανάληψη ενεργειών επί αυτού απαιτεί συγκεκριμένη αλληλουχία ενεργειών μέσα από τη μεταβολή της θέσης των μοχλών του χειριστηρίου. Γενικότερα, ο χειρισμός του NOVA Quanam παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, με πιο χαρακτηριστική την ανάγκη επανατοποθέτησης της μπαταρίας κάθε φορά όπου προκύπτει διακοπή λειτουργίας του, καθώς δεν υπάρχει ενσωματωμένος διακόπτης εκκίνησης.



Εικόνα 3.20 -Χειριστήριο Ελέγχου Drone Quanam Nova Pro

Το κανάλι επικοινωνίας του drone με το χειριστήριο λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων στα 2,4 GHz (7 κανάλια εκπομπής) και για τη λειτουργία του απαιτείται η τοποθέτηση 4 μπαταριών τύπου AAA.

Επιπρόσθετα, το drone διαθέτει στο περίβλημά του ενδείξεις κόκκινου χρώματος για να είναι δυνατός ο αρχικός προσανατολισμός του χειριστή ενώ για τον ίδιο λόγο, καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης παραμένουν ενεργά δύο κόκκινα LED στο εμπρόσθιο μέρος και δύο αντίστοιχα πράσινα στο οπίσθιο μέρος. Αμέσως μετά την εκκίνηση εκτελείται μία σειρά αυτοελέγχων της συσκευής και με κατάλληλες ενδείξεις των εμπροσθεν φώτων μικρού μεγέθους επιβεβαιώνεται η βαθμονόμηση και η κανονική λειτουργία του GPS για να ξεκινήσει η πτήση.

Τέλος, με τη χρήση των παραπάνω φωτεινών ενδείξεων, το MEA ειδοποιεί το χειριστή για οποιαδήποτε μη φυσιολογική κατάσταση προκύψει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Λόγου χάρη στην περίπτωση της πτώσης τάσης της μπαταρίας έχουμε το σύνολο των φωτεινών ενδείξεων να αναβοσβήνουν, κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης της πλακέτας ελέγχου τα έμπροσθεν φώτα αναβοσβήνουν εναλλάξ, η διακοπή λειτουργίας του κινητήρα υποδεικνύεται με αργό αναβόσβημα της κόκκινης ένδειξης στο έμπροσθεν μέρος ενώ η απώλεια του σήματος GPS εκφράζεται με αναβόσβημα της πράσινης φωτεινής ένδειξης.



Εικόνα 3.21 -Εσωτερικό Drone Quantum Nova Pro

Στο εσωτερικό του droneένα κεντρικός ελεγκτής (controller)ρυθμίζει τη κίνηση των πτερύγων του τετρακόπτερου, επικοινωνώντας και δίνοντας εντολές σε μικροπλακέτες, μέσω καλωδιώσεων σχετικά μεγάλου μήκους ως προς τις φυσικές διαστάσεις του drone.



Εικόνα 3.22 – Ελεγκτής Drone Quantum Nova Pro

3.4 Ανηχοϊκός Θάλαμος

Το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων και της καταγραφής των οπτικών-ηχητικών σημάτων του drone υλοποιήθηκε σε ελεγχόμενο περιβάλλον, εξασφαλίζοντας αφενός την ακρίβεια των μετρήσεων και αφετέρου την ασφάλεια του εμπλεκόμενου προσωπικού και του πειραματικού εξοπλισμού. Η χρήση του διαθέσιμου ανηχοϊκού θαλάμου παρείχε τη δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων χωρίς παρεμβολές και ενδεχόμενες αποκλίσεις προερχόμενες από εξωτερικούς παράγοντες, ενώ ταυτόχρονα το φαινόμενο των ανακλάσεων αποσβενόταν λόγω της ειδικής κατασκευής του. Η κατασκευή αυτή έγκειται στην επένδυση των επιφανειών του θαλάμου με απορροφητικά υλικά και συγκεκριμένα με αφρό πολυουρεθάνης σε κατάλληλο σχήμα (πυραμίδα) και πλακίδια φερρίτη που ευνοεί την απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Οι διαστάσεις του θαλάμου είναι 7,355 x 3,755 x 3,3 μέτρα (Μ x Π x Υ) και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του κυμαίνεται από 9 KHz έως 18 GHz.

Κεφάλαιο 4

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Θεωρητική Προσέγγιση

Προ της εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας απαιτείται η θεωρητική ανάλυση του πλαισίου βάσει του οποίου αντλήθηκαν τα αποτελέσματα της έκθεσης των ΜΕΑ σε ισχυρό Η/Μ Παλμό και οι προϋποθέσεις διεξαγωγής της ανάλυσης των αποτελεσμάτων αυτών. Για το σκοπό αυτό στο παρών κεφάλαιο εξετάζονται θέματα βαρύνουσας σημασίας για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, όπως η θέση και απόσταση του ΜΕΑ ως προς την κεραία εκπομπής, η ακριβής μέτρηση της έντασης του πεδίου, το αποδεκτό χρονικό κατώφλι για την εκδήλωση της παρεμβολής, η καταγραφή των αποτελεσμάτων και η επεξεργασία τους για την εξαγωγή των βέλτιστων συχνοτήτων, καθώς και ο καθορισμός της αλγοριθμικής διαδικασίας για την ολοκληρωμένη εκτέλεση τους.

Το πειραματικό πλαίσιο εκτέλεσης της μελέτης του θέματος προϋποθέτει την προσομοίωση πραγματικών σεναρίων πτήσης σε περιβάλλον πλήρως ελεγχόμενο και ασφαλές για το προσωπικό εκτέλεσής τους και τον πειραματικό εξοπλισμό. Τα υπό εξέταση σενάρια δοκιμών οφείλουν να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό απαιτείται η εξέταση διαφόρων διατάξεων του ΜΕΑ-στόχου, προκειμένου να εξασφαλισθεί ένα σύνολο πιθανών γωνιών προσβολής της επιφάνειας του στόχου με Η/Μ ακτινοβολία και με διαφορετική πόλωση ως προς αυτόν. Με δεδομένη τη δυσχέρεια εγκατάστασης του πειραματικού εξοπλισμού σε εναέρια πλατφόρμα λόγω των περιορισμών που προκύπτουν από το βάρος και τον όγκο του, εξετάζονται οι πιθανές διατάξεις του drone που δύναται να προσβληθούν κατά τη διάρκεια μιας πραγματικής πτήσης.

Ένα άλλο αντικείμενο εξέτασης είναι η ακρίβεια των μετρήσεων της έντασης του πεδίου με τα διαθέσιμα όργανα, καθόσον αυτό διαφαίνεται να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή και τεκμηριωμένη ερμηνεία των φαινομένων που δημιουργούνται επί του drone, σύμφωνα με ένα μεγάλο αριθμό μελετών του θέματος. Η ακριβής μέτρηση του πεδίου προϋποθέτει πέραν του ελεύθερου από ανακλάσεις και άλλα φαινόμενα περιβάλλοντος διάδοσης, και τη διεξαγωγή διακρίβωσης (calibration) των οργάνων μέτρησης του πεδίου. Οι μετρήσεις του πεδίου απαιτείται να εκτελούνται στο σημείο πρόπτωσης της ακτινοβολίας στο drone για να εξαχθεί η πραγματική του τιμή ανά συχνότητα ακτινοβολίας. Επιπλέον, το χρονικό κατώφλι της επιτυχούς προσβολής απαιτείται να καθοριστεί σύμφωνα με τα αρχικά ληφθέντα αποτελέσματα των δοκιμών.

Επιπρόσθετα, η απόσταση της κεραίας από το στόχο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, λόγω του υποβιβασμού της τιμής της έντασης του πεδίου με την αύξηση της απόστασης. Στο πλαίσιο της ελεγχόμενης διαδικασίας διεξαγωγής των πειραμάτων, η επιλογή της απόστασης του στόχου από την κεραία περιορίζεται από τις διαστάσεις του αηχοϊκού θαλάμου και δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών σε

αποστάσεις από 1 έως 3,5 μέτρα. Αν και υφίσταται ο ανωτέρω περιορισμός, η εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιλογή κατάλληλων συχνοτήτων δεν αναμένεται να επηρεαστεί.

Λόγω της ανάγκης για λήψη ενός μεγάλου αριθμού μετρήσεων και συχνών αλλαγών της διάταξης του στόχου απαιτείται η άμεση καταγραφή των αποτελεσμάτων και η διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας σε φάσεις, έτσι ώστε να αξιολογηθεί το πλήρες σύνολο των παραμέτρων που επενεργούν στην επιτυχή προσβολή του ΜΕΑ. Ο καθορισμός μιας αλγοριθμικής διαδικασίας για τη διεξαγωγή και αξιολόγηση-επιλογή των βέλτιστων συχνοτήτων θα εξασφαλίσει την πληρότητα και θα συνεισφέρει καίρια στην ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων.

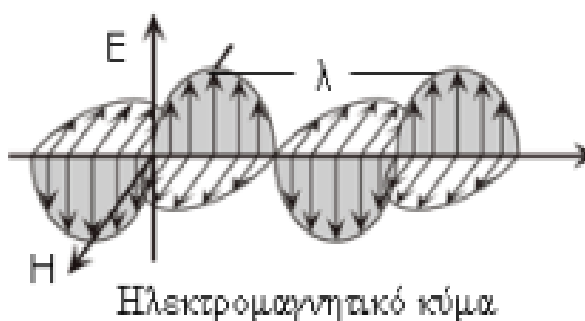
4.1.1 Διάκριση Περιοχών H/M Πεδίου και Ιδιότητες

Τα μεγέθη και οι μονάδες μέτρησης που θα χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή των αποτελεσμάτων ακολουθούν το διεθνές πρότυπο μονάδων (International System of Units). Ο συγκεντρωτικός πίνακας των χρήσιμων μεγεθών για την εκτέλεση του πειράματος, έχει όπως παρακάτω [18] :

Φυσικό Μέγεθος	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης	Σύμβολο
Συχνότητα	f	Hertz	Hz
Μήκος κύματος	λ	meter	m
Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου	E	Volt per meter	V/m
Ένταση Μαγνητικού Πεδίου	H	Ampere per meter	A/m
Πυκνότητα Μαγνητικής Ροής	B	Tesla	T
Πυκνότητα Ισχύος	S	Watt per square metre	W/m ²
Εμπέδηση	Z	Ohm	Ω
Μεγάλη Διάσταση κεραίας	D	meter	m

Πίνακας 4.1 – Χρήσιμα Μεγέθη και Μονάδες Μέτρησης κατά S.I.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεταφέρει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Διαδίδονται στον αέρα ή στο κενό με την ταχύτητα του φωτός και δομούνται από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο ταυτόχρονα, όντας συμφασικά δηλαδή λαμβάνουν τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τους ταυτόχρονα.



Εικόνα 4.1 -Ηλεκτρομαγνητικό κύμα και επιμέρους πεδία

Το Η/Μ κύμα καθώς διαδίδεται στο χώρο υπόκειται σε τροποποίηση των χαρακτηριστικών του [19]. Το ακτινοβολούμενο Η/Μ πεδίο χαρακτηρίζεται από το διάνυσμα Poynting, το οποίο ισούται με $E \times H^*$. Στην περιοχή εγγύς της κεραίας το πεδίο χαρακτηρίζεται ως αντιδρών (imaginary) και υποβιβάζεται δραματικά με την απόσταση. Καθώς απομακρύνεται από την κεραία χαρακτηρίζεται ως ακτινοβολών (πραγματικό), με το ρυθμό υποβιβασμού του να σταθεροποιείται σε $1/r$, όπου γείναι η απόσταση σε μέτρα από την κεραία.

Με βάση των ανωτέρω χαρακτηρισμό του διανύσματος Poynting, μπορούμε να διακρίνουμε στην κατεύθυνση εκπομπής της κεραίας τρεις βασικές περιοχές.

Αντιδρών Περιοχή

Είναι η περιοχή που περιβάλλει την κεραία και εκτείνεται στην περιοχή $0 < r < \lambda/2\pi$. Σε αυτή την περιοχή το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο δε βρίσκονται σε γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους και ανάλογα με τον τύπο της κεραίας ένα εκ των δύο είναι ισχυρότερο. Το ηλεκτρικό πεδίο (e-field) φθίνει με την απόσταση κατά $1/r^2$ και το μαγνητικό κατά $1/r^3$. Σε αυτή την περιοχή έχουμε αποθήκευση αέργου ισχύος δηλαδή ισχύ που διατηρείται «στάσιμη» και η ενέργεια ταλαντώνεται μεταξύ των δύο μορφών της χωρίς να ακτινοβολείται. [20]

Περιοχή Κοντινού πεδίου

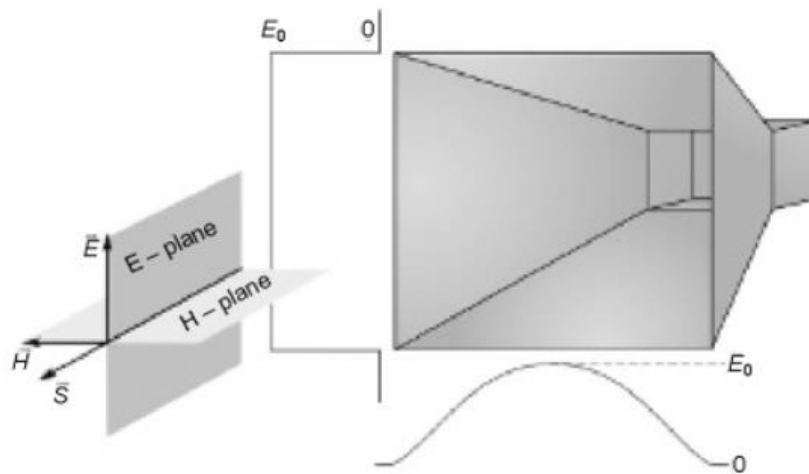
Η μεταβατική περιοχή από την αντιδρών στην περιοχή μακρινού πεδίου είναι αυτή του κοντινού πεδίου και χαρακτηρίζεται ως ακτινοβολών περιοχή κοντινού πεδίου ή περιοχή Fresnel. Στην υπόψη περιοχή το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο βρίσκονται σε γωνία 90 μοιρών με μηδενική μετατόπιση φάσης. Η έκταση της ξεκινά από το πέρας του αντιδρώντος πεδίου και φτάνει σε απόσταση που ισούται με $2D^2/\lambda$. Η περιοχή αυτή μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω σε υποπεριοχές, με βάση το ρυθμό μείωσης της τιμής του πεδίου. Έτσι, έχουμε την υποπεριοχή $\lambda/2\pi < r < D^2/4\lambda$ όπου το πεδίο μειώνεται με ρυθμό μεγαλύτερο του $1/r$ και την υποπεριοχή $D^2/4\lambda < r < 2D^2/\lambda$, όπου το πεδίο φθίνει με ρυθμό ίσο με $1/r$ και η μεταβολή του γετρηράζει το διάγραμμα ακτινοβολίας.

Γενικότερα, η περιοχή του κοντινού πεδίου χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα και ανομοιογένεια, αφού τα ακρότατα των τιμών του πλάτους των επιμέρους πεδίων δεν παρατηρούνται ταυτόχρονα και δύναται η επικράτηση του ενός έναντι του άλλου σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής αυτής. [20]

Περιοχή Μακρινού πεδίου

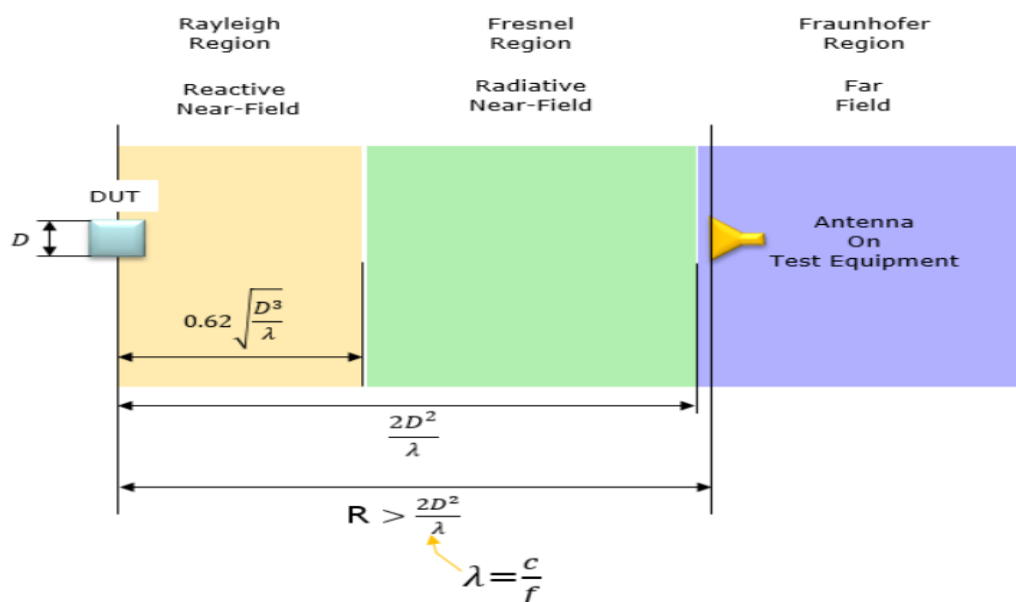
Το ακτινοβολούμενο Η/Μ πεδίο έχει ορθογωνικά τα επιμέρους πεδία (ηλεκτρικό και μαγνητικό) στη μακρινή περιοχή της κεραίας ή περιοχή Fraunhofer. Σε αυτή την περιοχή το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι ανεξάρτητο της απόστασης από την κεραία και η κατεύθυνση διάδοσης είναι κάθετη στα δύο πεδία ενώ η ακτινοβολούμενη ισχύς διαδίδεται ακτινικά. Η περιοχή μακρινού πεδίου εκτείνεται από το τέλος της περιοχής κοντινού πεδίου ($2D^2/\lambda$) και πέρα. Σε αυτή την περιοχή η ένταση του πεδίου μπορεί να υπολογιστεί με τον τύπο του Friis. Ο επιμέρους λόγος των τιμών (πλάτους) των διανυσμάτων E και H (intrinsic impedance) παραμένει σταθερός στο χρόνο και ισούται με $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ και ενδεικτική τιμή στον αέρα τα 377 Ω. Τέλος, η πυκνότητα

ισχύος S που εκφράζει την ισχύ ανά μονάδα επιφανείας συνδέεται με τα επιμέρους πεδία με βάση τη σχέση $S = E \times H = 377 \times H^2$ [20].



Εικόνα 4.2 - Ηλεκτρομαγνητικό κύμα και κεραία χοάνης

Επίσης, κρίνεται σκόπιμο να αποτυπωθεί ότι η πόλωση του τύπου κεραίας που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση των πειραμάτων είναι γραμμική και το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται στο ίδιο επίπεδο με το Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.



Εικόνα 4.3 - Περιοχές διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η εξάρτηση της απόστασης των ανωτέρω περιοχών από το μήκος κύματος (εμμέσως δηλαδή από τη συχνότητα) και από τις διαστάσεις της κεραίας (μέγιστη διάσταση συμπεριλαμβανομένης της διαγωνίου) επιτάσσει τον υπολογισμό των περιοχών για το εύρος συχνοτήτων που θα διερευνηθεί. Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κεραίας προκύπτει ότι η μέγιστη διάσταση είναι η διαγώνιος της, οπότε το D ισούται με 0,692 m. Οι σχέσεις που πρέπει να επιλυθούν για κάθε συχνότητα σε αυτό το εύρος ανά περιοχή έχουν όπως παρακάτω:

Αντιδρών περιοχή (Reactive Near Field) : $R_1 = 0,62 \times \sqrt{\frac{0,692^3}{\lambda}}$

Περιοχή κοντινού πεδίου (near field region) : $R_2 = \frac{0,692^2}{\lambda}$

Περιοχή Μακρινού πεδίου (far field region) : $R_3 > R_2$

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικός πίνακας υπολογισμού της έκτασης κάθε περιοχής του πεδίου με δεδομένη συχνότητα ενδιαφέροντος.

Συχνότητα (MHz)	Μήκος Κύματος (cm)	R1 (m)	R2 (m)	R3 (m)
1500	19,986	0,8	4,79	>4,79
1600	18,737	0,82	5,11	>5,11
1700	17,635	0,85	5,43	>5,43
1800	16,655	0,87	5,75	>5,75
1900	15,778	0,9	6,07	>6,07
2000	14,99	0,92	6,39	>6,39
2100	14,276	0,94	6,71	>6,71
2200	13,627	0,97	7,03	>7,03
2300	13,034	0,99	7,35	>7,35
2400	12,491	1,01	7,67	>7,67
2500	11,992	1,03	7,99	>7,99

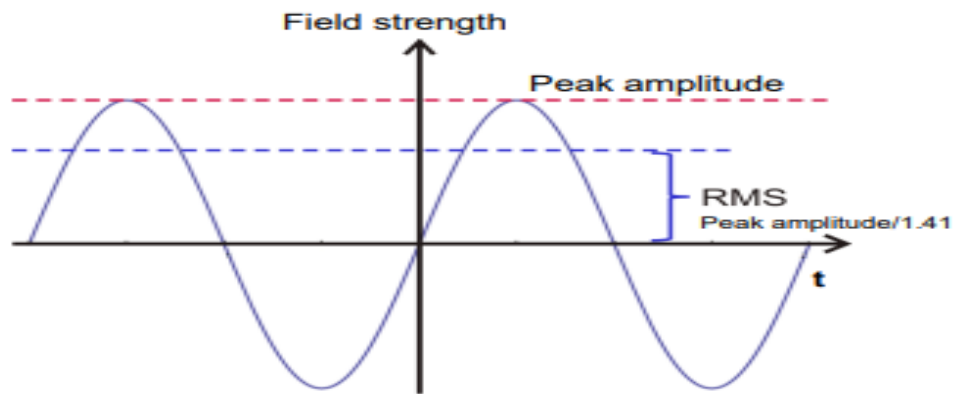
Πίνακας 4.2– Υπολογισμός έκτασης περιοχών πεδίου ανά συχνότητα

Τα ανωτέρω στοιχεία σε συνδυασμό με τις διαστάσεις του χώρου εκτέλεσης των πειραμάτων (ανηχοϊκός θάλαμος) ελήφθησαν υπόψη κατά την επιλογή της θέσης τοποθέτησης του MEA – στόχου.

4.1.2 Ένταση Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου

Πλήθος μελετών συσχετίζουν την ικανότητα της εφαρμογής επίδρασης στις ηλεκτρονικές διατάξεις με την ένταση και την ισχύ του Ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργεί μια κατάλληλα παραμετροποιημένη πηγή ακτινοβολίας. Αυτό σε σχέση με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας συνεπάγεται την ανάγκη καταγραφής του πεδίου που δημιουργεί η εκπομπή μικροκυματικής παλμικής ακτινοβολίας σε κάθε συχνότητα στο εύρος «ενδιαφέροντος». Τα όργανα μέτρησης έχουν τη δυνατότητα καταγραφής RMS (Root Mean Square) τιμών εκφράζοντας την ισοδύναμη μέση τιμή ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου καταγραφής.

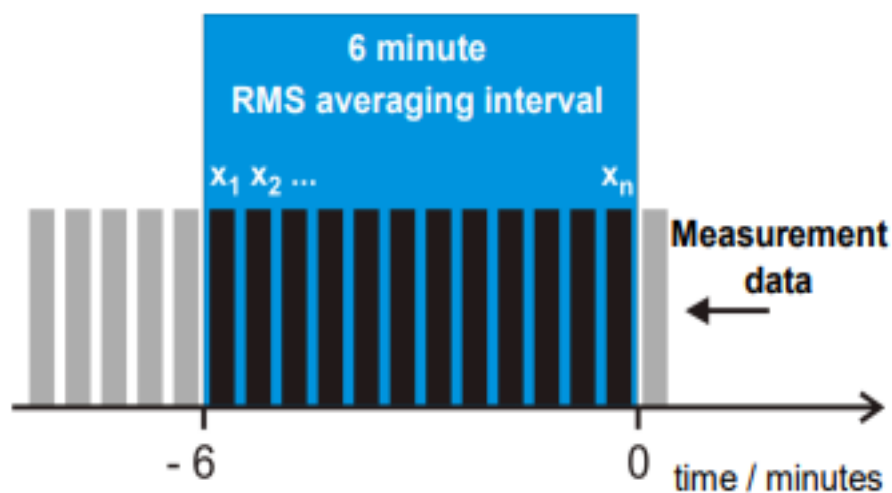
Η RMS τιμή εκφράζει την τιμή καταγραφής ενός ημιτονικού σήματος διαιρεμένης κατά $\sqrt{2}$. Η αναγωγή της καταγραφής σε RMS τιμή έχει μεγάλη σημασία καθώς αντιπροσωπεύει τη σχετική τιμή των θερμικών αποτελεσμάτων που προκαλεί η εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 4.4 - RMS τιμή ενός ημιτονικού σήματος στο χρόνο

Το πεδίομετρο NARDA για τη μέτρηση της τιμής του πεδίου παρέχει μια DC τάση μέσω ενός ανιχνευτή ανάλογη με το τετράγωνο της τιμής του πεδίου. Ο ανιχνευτής βασίζεται στη λειτουργία των διόδων και άλλων θερμοστοιχείων. Τα φαινόμενα μη γραμμικότητας που συμβαίνουν στους ανιχνευτές διόδου από σήματα μεγάλο πλάτους εξισορροπούνται από το ίδιο το όργανο με την αξιοποίηση των λοιπών καταγραφών. Η δυνατότητα καταγραφής και αποθήκευσης RMS τιμών από τη συσκευή δίνει τη δυνατότητα καταγραφής διαφόρων χαρακτηριστικών του πεδίου σε καθοριζόμενο χρονικό διάστημα με την κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

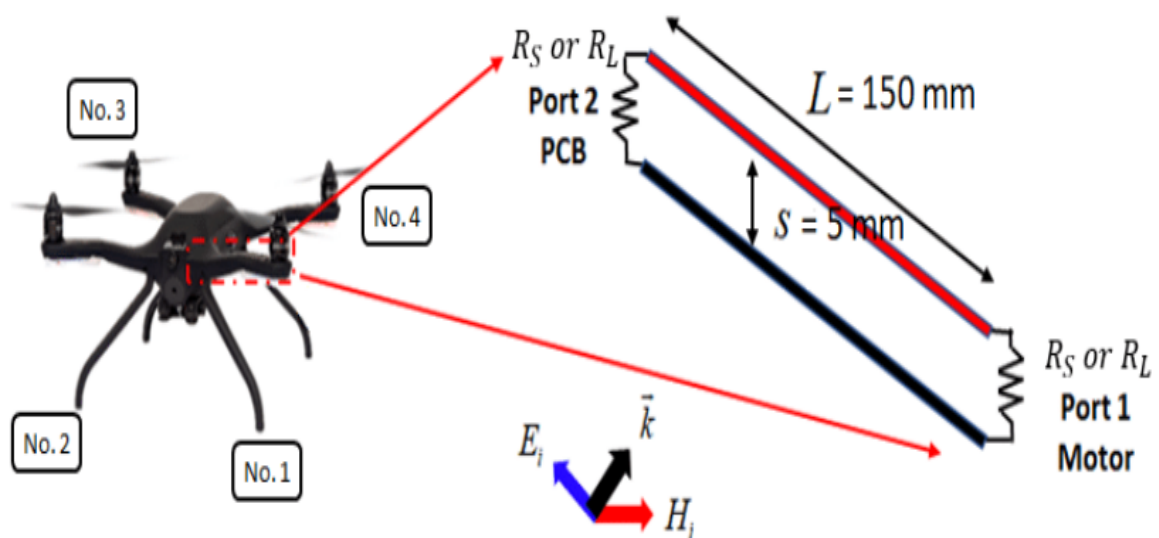


Εικόνα 4.5 - Γραφική αναπαράσταση της μέσης τιμή του πεδίου

4.1.3 Σύζευξη λόγω Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου

Εκτός από τα χαρακτηριστικά διάδοσης της μικροκυματικής κυματομορφής και το πεδίο που προκύπτει από αυτή, εξίσου σημαντικό είναι να αναγνωριστούν τα αποτελέσματα της παρεμβολής στα drone. Σαφώς, η πρόκληση δυσλειτουργίας στα επιμέρους προηγμένα συστήματα (GPS, accelerometer, γυροσκόπιο, κανάλια επικοινωνίας, κ.ά.) που αξιοποιεί το εναέριο μέσο για να εκτελέσει την αποστολή του με ασφάλεια είναι ένα πεδίο διερεύνησης για την αναγνώριση της τρωτότητάς του. Όμως, η χρήση του μικροκυματικού παλμού υψηλής ισχύος δύναται να προκαλέσει δραστικά αποτελέσματα παρεμβολής μέσα από τη δημιουργία σύζευξης με καλωδιώσεις, κεραία και κάθε είδους ανοίγματα στη θωράκισή του, τα οποία δύναται να αποτελέσουν οδούς πρόκλησης παρεμβολής σε κάθε drone ανεξαρτήτως τεχνολογικής γενιάς [22].

Μία προφανής πηγή πρόκλησης ενδεχόμενης σύζευξης στην περίπτωση μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι οι καλωδιώσεις που διασυνδέουν τον κεντρικό επεξεργαστή με τους κινητήρες πτήσεως. Τα χαρακτηριστικά των πηγών σύζευξης καθορίζονται από την τιμή και τη γωνία πρόσπτωσης του H/M κύματος συναρτήσει των ηλεκτρικών ιδιοτήτων και των διαστάσεων των καλωδιώσεων. Γενικότερα η τιμή της τάσης σύζευξης είναι ανάλογη με την τιμή και τη συχνότητα του κύματος παρεμβολής αλλά και των φυσικών αποστάσεων των καλωδιώσεων. Η σύζευξη μεταξύ πεδίου και εσωτερικών κυκλωμάτων είναι επίσης εφικτή αλλά λόγω των μικρών διαστάσεων των ενσωματωμένων κυκλωμάτων, η προκληθείσα σύζευξη είναι δύσκολο να υπολογιστεί. Επιπρόσθετα, το Radar Cross Section (RCS) φαίνεται να έχει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία σύζευξης, καθόσον η αύξηση του συνεπάγεται μεγαλύτερη επιφάνεια έκθεσης στη μικροκυματική ακτινοβολία.



Εικόνα 4.6 – Κυκλωματική Απεικόνιση Σύζευξης MEA

4.2 Αλγόριθμος Εκτέλεσης Πειραματικής Διαδικασίας

Δεδομένου του μεγάλου εύρους του φάσματος εντός του οποίου πρόκειται να υλοποιηθεί η αναζήτηση βέλτιστων συχνοτήτων και προκειμένου να διερευνηθεί η ικανότητα παρεμβολής της λειτουργίας του ΜΕΑ-στόχου, κρίθηκε σκόπιμη η δημιουργία τυποποιημένης αλγοριθμικής διαδικασίας για την εξασφάλιση της συνολικής εικόνας στην εν λόγω φασματική περιοχή. Προς τούτο, η πειραματική διαδικασία κατανεμήθηκε σε τρία στάδια με επιμέρους φάσεις για καθένα εξ'αυτών. Τα επιμέρους στάδια εκτέλεσης του πειράματος έχουν ως εξής:

1^ο Στάδιο (Καθορισμός Απόστασης Εκτέλεσης Δοκιμής)

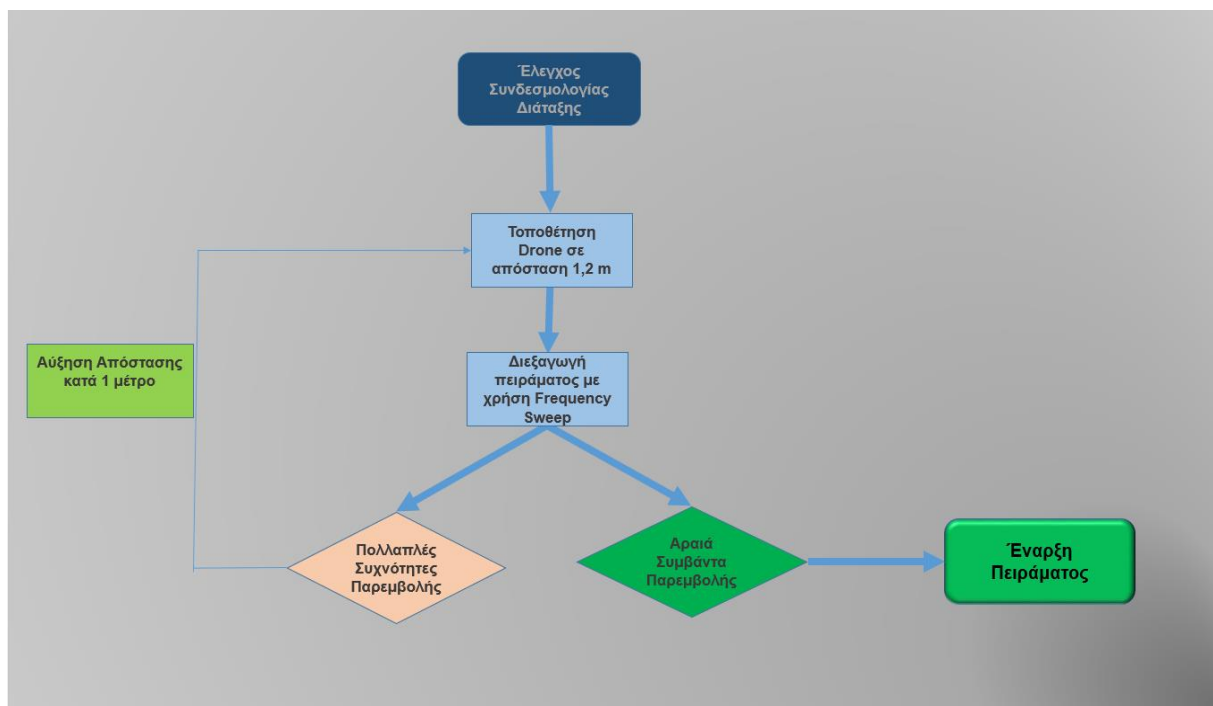
Κατά την πρώτη φάση του πειράματος απαιτείται ο καθορισμός της απόστασης τοποθέτησης του drone, προκειμένου να είναι δυνατός ο έλεγχος συχνοτήτων όπου ο στόχος παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία και είναι ευάλωτος στην ακτινοβολία.

Η επιλογή της απόστασης του στόχου από την πηγή της μικροκυματικής ακτινοβολίας αποτελεί σημαντική φάση του πειράματος, καθόσον καθορίζει τη τάξη μεγέθους της έντασης του πεδίου στην οποία εκτίθεται το ΜΕΑ και από την άλλη πλευρά, η επιλογή της οφείλει να επιτρέπει τη διάκριση συχνοτήτων που επιφέρουν ταχύτερα και ισχυρότερα αποτελέσματα σε αυτό. Ο καθορισμός του πεδίου δύναται να γίνει και μέσω της γεννήτριας σήματος, με αλλαγή της στάθμης ισχύος του παραγόμενου σήματος, πλην όμως στο προκαταρκτικό στάδιο προετοιμασίας της πειραματικής διαδικασίας, η τροποποίηση της απόστασης θεωρήθηκε ως πιο αξιόπιστο και επωφελέστερο κριτήριο για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Λόγω των χωροταξικών περιορισμών που θέτουν οι διαστάσεις του χώρου εκτέλεσης του πειράματος (ανηχοϊκός θάλαμος), η θέση του στόχου επιλέχθηκε να βρίσκεται εκτός της αντιδρώντος περιοχής, ήτοι απόσταση μεγαλύτερη του ενός μέτρου σύμφωνα με τον Πίνακα καταγραφής των περιοχών του πεδίου (Πίνακας 4.2), αλλά εντός του κοντινού πεδίου αφού η περιοχή του μακρινού πεδίου (far field region) ξεκινά μετά την απόσταση των 5 μέτρων. Με βάση τα παραπάνω, αρχικά πραγματοποιήθηκε δοκιμή για πρόκληση παρεμβολής του στόχου με τη λειτουργία κύλισης συχνότητας της γεννήτριας στο εύρος 1,5 έως 2,5 GHz με βήμα των 10 MHz και χρόνο παραμονής σε καθεμία εξ' αυτών στα 30 sec.

Συναφώς, στην περίπτωση όπου προκύπτουν διαδοχικά αποτελέσματα παρεμβολής/διακοπής λειτουργίας του ΜΕΑ, η απόσταση του drone αυξάνεται κατά 1 μέτρο και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. Αντιθέτως, στο ενδεχόμενο όπου στην επιλεγείσα απόσταση παρατηρείται μικρή συχνότητα επανάληψης δυσμενών αποτελεσμάτων στη λειτουργία του στόχου, η εκκίνηση του πειράματος καθίσταται δυνατή. Στο προκαταρκτικό στάδιο επιλέχθηκε η δοκιμαστική απόσταση του 1,2 μέτρων, με γνώμονα την υπόθεση ότι εάν η λειτουργία του drone δεν επηρεάζεται σε τόσο κοντινή απόσταση, όπου το πεδίο είναι ισχυρότερο, τότε η δυνατότητα πρόκλησης παρεμβολής σε μεγαλύτερη απόσταση θα αποτελεί αδύναμο ενδεχόμενο και αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης και ερμηνείας για την αιτία του.

Συμπερασματικά, το 1^ο στάδιο αποτελεί το τελικό στάδιο της προετοιμασίας της πειραματικής διαδικασίας, έτσι ώστε να επιτευχθεί η συντεταγμένη εκτέλεσή του και να καθορισθούν με συνέχεια και συνέπεια τα δύο επόμενα στάδια, τα οποία αποτελούν τη βάση εξαγωγής των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων της εργασίας.



Εικόνα 4.7 - Αλγοριθμική διαδικασία 1^{ου} σταδίου εργασίας

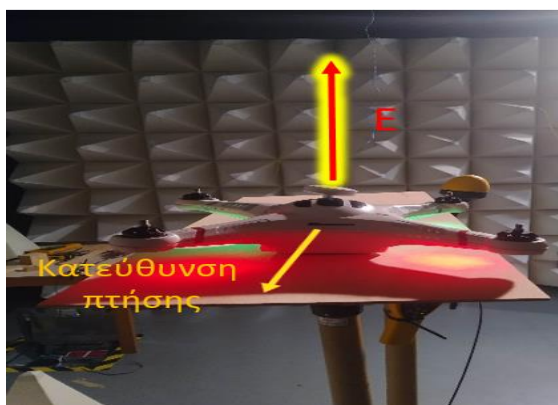
2^ο Στάδιο (Εκτέλεση Δοκιμών ανά διάταξη ΜΕΑ)

Το 2^ο στάδιο αποτελεί τον πυρήνα εκτέλεσης των πειραμάτων από όπου θα προκύψουν τα δεδομένα, βάσει των οποίων θα εξαχθούν τα σχετικά συμπεράσματα. Για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων προτιμήθηκε η επιλογή της συχνότητας να πραγματοποιείται χειροκίνητα και όχι αυτόματα με τη λειτουργία frequency sweep της γεννήτριας. Η παραπάνω επιλογή αποφασίσθηκε με σκοπό την εξάλειψη του ενδεχομένου να προκύψουν λάθη καταγραφής της συχνότητας στην οποία προέκυψε το αποτέλεσμα επί του ΜΕΑ.

Επιπρόσθετα, κατόπιν της αρχικής διερεύνησης (1^ο στάδιο), προέκυψε ότι η αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας του ΜΕΑ λόγω παρεμβολής, συμβαίνει άμεσα, οπότε εκτιμήθηκε ότι ο καθορισμός των 10 δευτερολέπτων ως χρόνο παραμονής σε κάθε συχνότητα είναι επαρκής για την εκδήλωση των φαινομένων παρενόχλησης της λειτουργίας του. Εξάλλου η ταχύτητα εκδήλωσης της παρενόχλησης αναμένεται να αποτελέσει βασικό κριτήριο αξιολόγησης των συχνοτήτων. Ενισχυτικός παράγοντας για τον περιορισμό του χρόνου είναι ένα πραγματικό σενάριο-γεγονός εφαρμογής μέτρων εναντίον ενός ΜΕΑ, όπου η δυνατότητα ενεργοποίησης του συστήματος αντιμετώπισής του και ο χρόνος προσβολής του οφείλει να είναι σύντομος, λόγω της ταχύτητας και των μικρών διαστάσεων του εναέρια κινούμενου αεροχήματος δημιουργώντας δυσχέρειες στον εντοπισμό του σε μακρινές αποστάσεις.

Μία άλλη παράμετρος του πειράματος που αποτελεί δομικό στοιχείο για την επιτυχία του, είναι η υλοποίηση πραγματικών σεναρίων προσβολής του στόχου. Αυτό συνεπάγεται ότι η εξέταση της προσβολής του στόχου θα πρέπει να γίνει σε 8 διαφορετικές διατάξεις του ΜΕΑ. Ως διάταξη αναφέρεται η διαφορετική θέση και γωνία θέασης της άμεσα εκτεθειμένης επιφάνειας του drone προς την κεραία εκπομπής. Με βάση τις δυνατότητες της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή και εκπομπή του παλμικού σήματος αποκλείστηκε η εξέταση της προσβολής του στόχου στην άνωθεν επιφάνεια του, καθώς στον πραγματικό κόσμο αυτό προϋποθέτει τη φόρτωση εξοπλισμού σε εναέριο μέσο, το οποίο περιορίζεται από τις διαστάσεις του εξοπλισμού.

Οι έξι διατάξεις του drone που δύναται να προσβληθούν με την υφιστάμενη μικροκυματική διάταξη και το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου (E) απεικονίζονται και κωδικοποιούνται ως εξής:



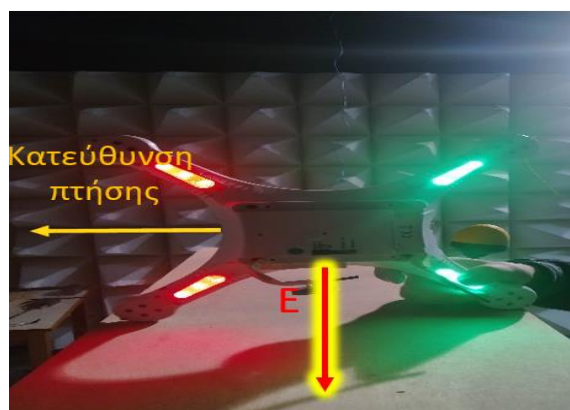
Διάταξη Head 1



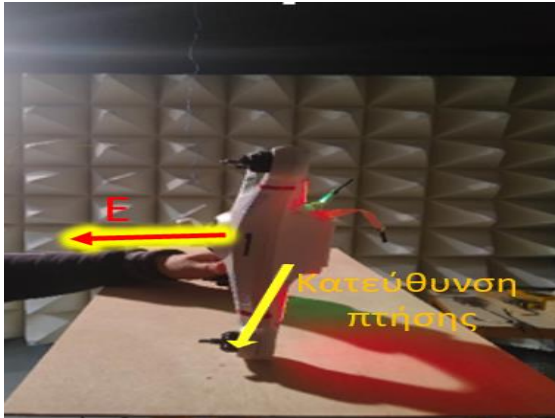
Διάταξη Head 2



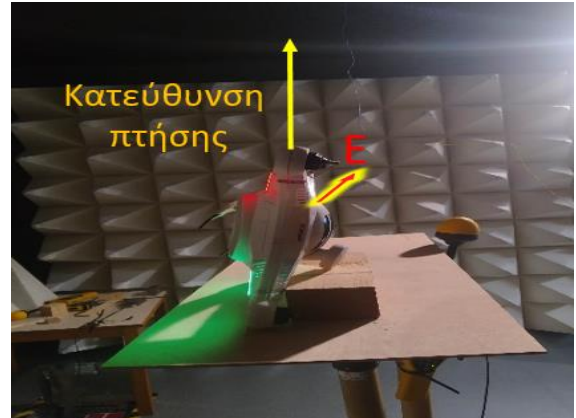
Διάταξη Bottom 1



Διάταξη Bottom2



Διάταξη Side 1



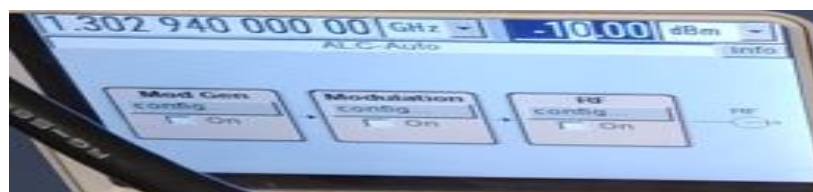
Διάταξη Side 2

Η παραμετροποίηση του μικροκυματικού σήματος παλμού, στο 2^ο στάδιο της διαδικασίας, αφορά στον καθορισμό του ρυθμού επανάληψης παλμών (PRF), το οποίο ορίστηκε σε αυτή τη φάση του πειράματος στο 1 KHz, το πλάτος του παλμού (pulse width) ορίστηκε στα 50 μs και επομένως, το duty cycle οροθετήθηκε στο 5% έτσι ώστε να βρίσκεται εντός των τεχνικών προδιαγραφών του ενισχυτή. Η παραμετροποίηση του σήματος που διαμορφώνει η γεννήτρια Agilent γίνονταν υποχρεωτικά εντός του εργαστηριακού χώρου, ελλείψει δυνατότητας απομακρυσμένου χειρισμού μου της από το κέντρο ελέγχου (control room).



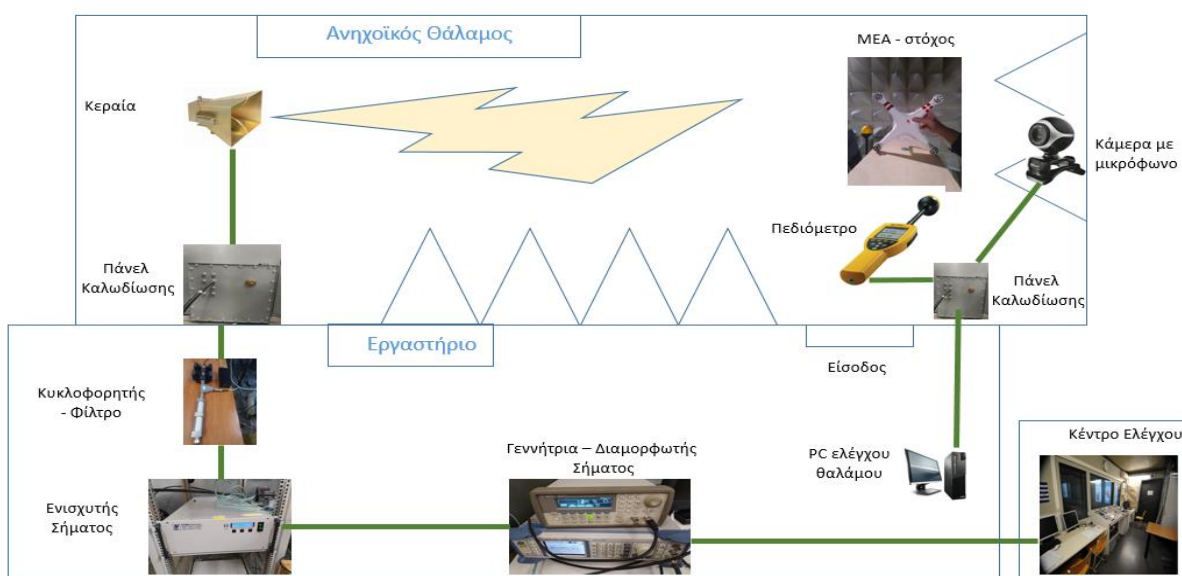
Εικόνα 4.8 - Πρόσθια όψη γεννήτριας και μενού επιλογών για παραμετροποίηση του σήματος παλμού

Αντιθέτως, η παραμετροποίηση της γεννήτριας σήματος Rhode&Schwarz, καθώς και η έναρξη/παύση της εκπομπής της, γινόταν μέσω της δικτυακής διεπαφής της από το κέντρο ελέγχου. Επομένως, ο καθορισμός της συχνότητας εκπομπής του σήματος και η έναρξη εκπομπής, καθώς και η παύση της όταν αυτή ξεπερνούσε σε διάρκεια το κατώφλι του χρόνου (10 sec) υλοποιούνταν απομακρυσμένα. Η στάθμη εκπομπής της γεννήτριας ορίστηκε στο -1 dbm, κατόπιν ελέγχων στη φάση της προπαρασκευής (1^ο στάδιο του πειράματος).



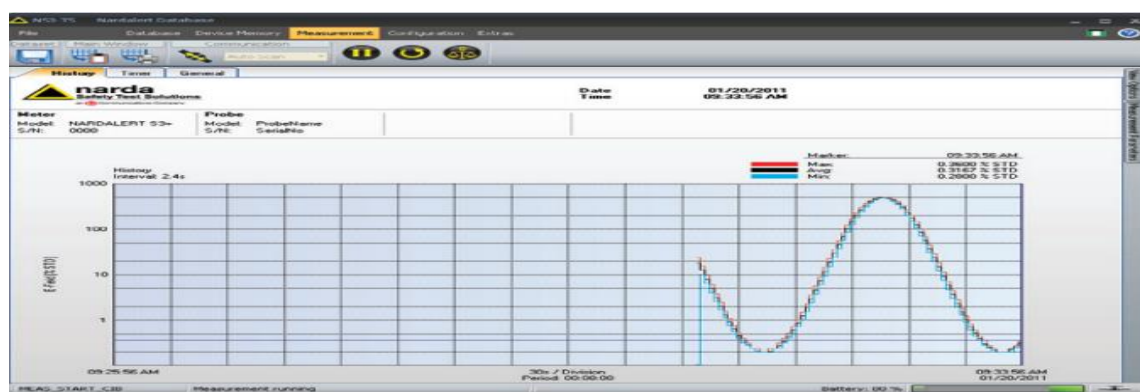
Εικόνα 4.9 – Web Interface της γεννήτριας σήματος

Όπως είναι αντιληπτό, ο εργαστηριακός χώρος παρέμεινε διαβαθμισμένος και απαγορευόταν η παρουσία προσωπικού στον περιβάλλοντα χώρο για λόγους ασφαλείας, κατά τη διάρκεια της εκπομπής. Προκειμένου να είναι δυνατή η καταγραφή των αποτελεσμάτων τοποθετήθηκε κάμερα καλής ανάλυσης με ενσωματωμένο μικρόφωνο για τη λήψη τυχόν ακουστικών και οπτικών σημάτων, τα οποία θα επιβεβαίωναν την παρενόχληση ή διακοπή της λειτουργίας του drone-στόχου. Σε περίπτωση εκδήλωσης οποιασδήποτε ένδειξης από το drone, γινόταν άμεσα καταγραφή του χρόνου που μεσολάβησε από την έναρξη της εκπομπής έως τη διακοπή της και κατηγοριοποίηση της επίδρασης που παρατηρήθηκε για δεδομένη συχνότητα.



Εικόνα 4.10 - Χωροταξική Κατανομή Πειραματικού Εξοπλισμού

Επιπρόσθετα, μέσω της δικτυακής εφαρμογής παρακολούθησης του πεδιόμετρου NARDA, το οποίο κατέγραφε διαρκώς τις τιμές πεδίου εντός του ανηχοϊκού θαλάμου και συγκεκριμένα στην εγγύς στην κεραία επιφάνεια του drone, υλοποιήθηκε η καταγραφή πεδίου ως αποτέλεσμα της μικροκυματικής εκπομπής σε όλες τις συχνότητες του εύρους ενδιαφέροντος.



Εικόνα 4.11 - Web Interface του πεδιόμετρου NARDA

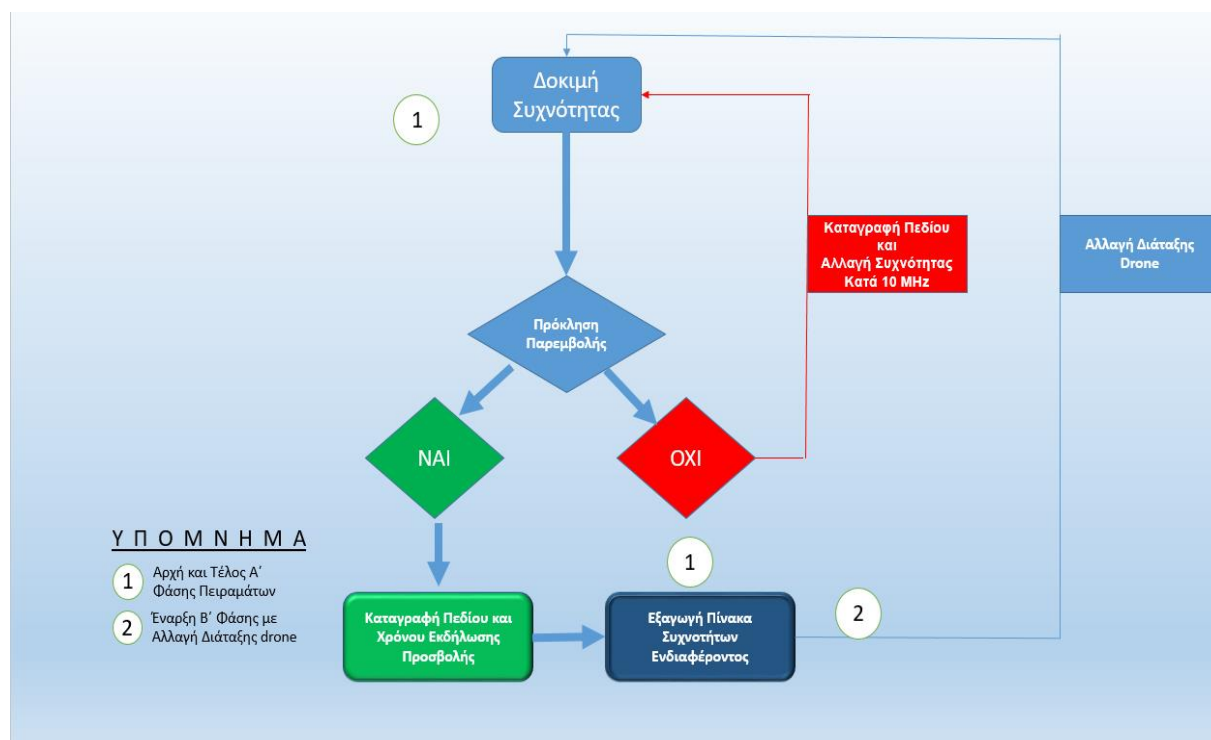
Για καθεμία διάταξη του drone, εκ των έξι συνολικά εξεταζόμενων, πραγματοποιήθηκε σάρωση του φασματικού εύρους ενός (1) GHz (1,5 – 2,5 GHz) με βήμα 10 MHz, δηλαδή ελήφθησαν συνολικά 100 μετρήσεις. Ο τελικός πίνακας αποτελεσμάτων περιλάμβανε 600 εγγραφές των αποτελεσμάτων των δοκιμών, με πλήρη στοιχεία για τη συχνότητα εκπομπής, τη παρενόχληση ή μη της λειτουργίας, το απαιτούμενο χρόνο εκδήλωσης της παρενόχλησης/διακοπής και τη τιμή του πεδίου που κατεγράφη.



FREQUENCY (GHz)	DISTANCE (m)	HEAD1 (-1dBm)		HEAD2 (-1dBm)		BOTTOM1		SIDE2		SIDE1		BOTTOM2	
		TIME of FLASHING (s)	RMS FIELD (V/m)	TIME of FLASHING (s)	RMS FIELD (V/m)	TIME of FLASHING (s)	RMS FIELD (V/m)	TIME of FLASHING (s)	RMS FIELD (V/m)	TIME of FLASHING (s)	RMS FIELD (V/m)	TIME of FLASHING (s)	RMS FIELD (V/m)
1,5	0	265	0	261	0	46	0	61	0	152	0	61	0
1,51	0	247	0	245	0	46	0	77	0	192	0	60	0
1,52	0	178	0	179	0	34	0	68	0	183	0	46	0
1,53	0	213	0	211	0	58	0	50	0	148	0	74	0
1,54	0	203	0	201	0	82	0	33	0	117	0	101	0
1,55	0	280	0	275	0	89	0	46	0	117	0	109	0
1,56	0	231	0	257	1	67	0	88	0	184	0	93	0
1,57	0	197	5	234	1	41	0	85	0	206	0	55	0
1,58	0	152	0	189	0	36	0	85	0	189	0	56	0
1,59	0	239	0	283	0	85	0	69	0	167	0	83	0
1,6	0	265	5	299	0	86	1	62	0	155	0	104	0

Εικόνα 4.12 - Προεπισκόπηση του συγκεντρωτικού πίνακα αποτελεσμάτων

Εν κατακλείδι, κατά το 2^ο στάδιο του πειράματος, γίνεται η συνολική καταγραφή των δεδομένων για τη συλλογή των μετρήσεων από τα οποία θα προκύψει η επιλογή των συχνοτήτων που εμφανίζουν αυξημένο ενδιαφέρον και χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης. Η συνολική διαδικασία που εφαρμόστηκε σε αυτό το στάδιο περιγράφεται σχηματικά από την ακόλουθη εικόνα:

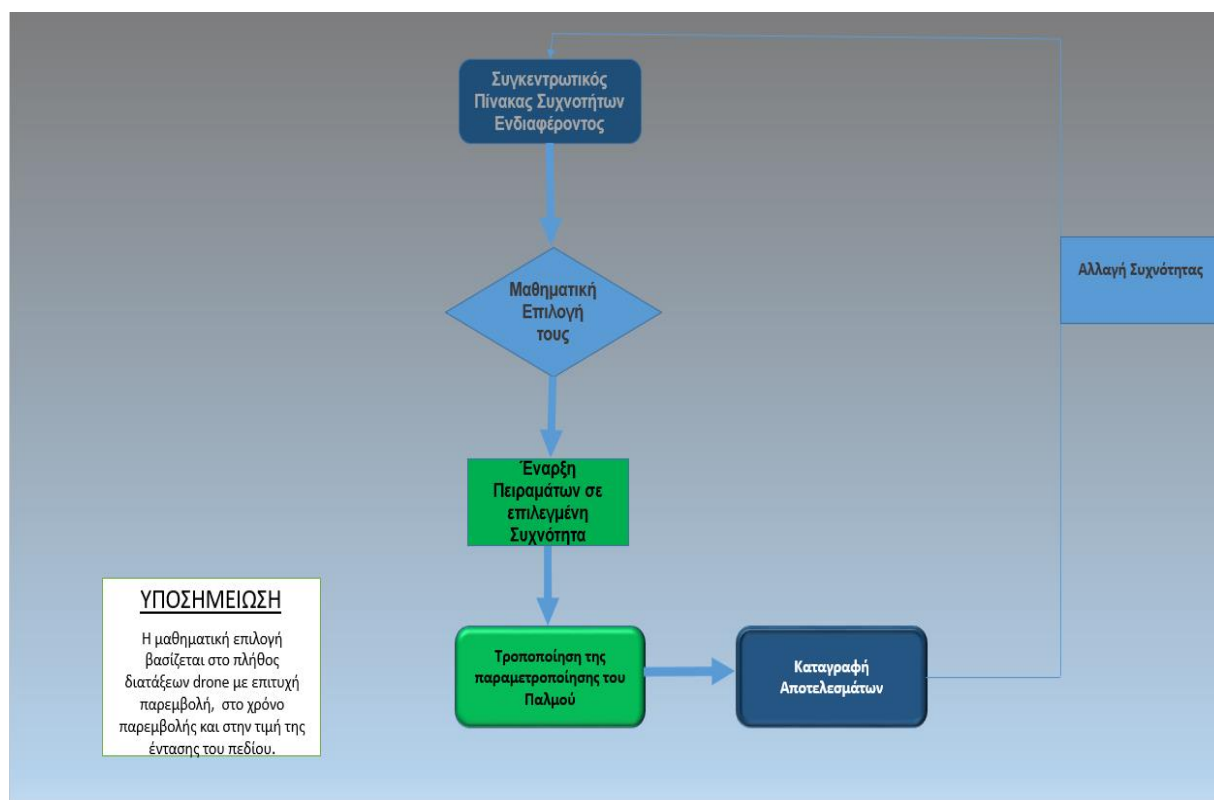


Εικόνα 4.13 - Αλγοριθμική διαδικασία 2^{ου} σταδίου εργασίας

3^ο Στάδιο (Επεξεργασία καταγραφής αποτελεσμάτων και παραμετροποίηση του παλμού)

Στο 3^ο και τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, υλοποιήθηκε, σε πρώτη φάση, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από το προηγούμενο στάδιο, προκρίθηκε/επιλέχθηκε μικρός αριθμός συχνοτήτων και εν συνεχεία, σε δεύτερη φάση, πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις των παραμέτρων της διαμόρφωσης της παλμικής μικροκυματικής κυματομορφής, αποσκοπώντας στον εντοπισμό μέσω της εκτέλεσης μετρήσεων των κρίσιμων παραμέτρων της για την επιτυχή πρόκληση της παρεμβολής.

Η διαδικασία που εφαρμόστηκε σε αυτό το στάδιο περιγράφεται σχηματικά από την ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4.14 - Αλγοριθμική διαδικασία 3^{ου} σταδίου εργασίας

Στην ανωτέρω εικόνα είναι εμφανές ότι αρχικά καταρτίστηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις συχνότητες, όπου κατεγράφησαν παρεμβολές του drone, ανεξαρτήτως επαναληψιμότητας στις διαφορετικές διατάξεις.

Η επιλογή «φίλτρου» συχνοτήτων για πρόκριση προς περαιτέρω μελέτη των βέλτιστων εξ αυτών, δημιούργησε την ανάγκη διατύπωσης ενός μαθηματικού-αλγοριθμικού τρόπου επιλογής τους. Στην επιλεχθείσα μαθηματική διατύπωση της αξιολόγησής τους είναι απαραίτητη η συμμετοχή του συνόλου των παραμέτρων που κατεγράφησαν στο προηγούμενο στάδιο. Εξάλλου το γενικό πλαίσιο επιλογής της κατάλληλης συχνότητας συντίθεται από τη δυνατότητα άμεσης παρεμβολής του drone με το μικρότερο δυνατό πεδίο στο οποίο θα εκτεθεί. Εξίσου κρίσιμη παράμετρος είναι η επαναληψιμότητα των παρεμβολών σε διαφορετικές διατάξεις στην ίδια

συχνότητα και επομένως, η ποιοτική αυτή παράμετρος απαιτείται να ενταχθεί στη μαθηματική διατύπωση της τελικής επιλογής.

Κατόπιν των παραπάνω, η μαθηματική επιλογή των συχνοτήτων ενδιαφέροντος βασίστηκε στο αντίστροφο γινόμενο του χρόνου σε δευτερόλεπτα που απαιτήθηκε για την εκδήλωση της σκόπιμης παρεμβολής επί την τιμή μέτρησης του πεδίου το οποίο κατεγράφη. Με το αντίστροφο πηλίκο εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη βαρύτητα στη σύντομη παρεμβολή με μικρό πεδίο αφού το βάρος w της καταγραφής γίνεται μεγαλύτερο. Για συχνότητες όπου η παρεμβολή επαναλήφθηκε σε διαφορετικές διατάξεις του drone, λαμβάνεται το συνολικό άθροισμα των επιμέρους βαρών (αποτέλεσμα του μαθηματικού μοντέλο ανά διάταξη).

Επομένως, το επιμέρους βάρος w ανά διάταξη ισούται με

$$W = \frac{1}{t \times (RMS \ value)}$$

Ουπολογισμός του αθροίσματος των επιμέρους βαρών (βάρος ανά διάταξη drone) ενισχύει την πιθανότητα επιλογής συχνοτήτων ικανών να παρεμβάλλουν το drone-στόχου σε πολλαπλές διατάξεις του. Η εξασφάλιση του παραπάνω όμως απαιτείται να προκύψει μετά τον υπολογισμό του συνολικού βάρους της κάθε συχνότητας.

Στη δεύτερη φάση του 3^{ου} σταδίου και αφού έχει ολοκληρωθεί η επιλογή των συχνοτήτων ενδιαφέροντος ακολουθεί η πραγματοποίηση μετρήσεων με παραμετροποίηση της διαμόρφωσης της εκπεμπόμενης κυματομορφής. Η σχετική παραμετροποίηση αφορά σε τιμές της συχνότητας παραμετροποίησης παλμού (PRF) και στο πλάτος του παλμού (pulse width), τροποποιώντας ουσιαστικά το duty cycle εντός των προδιαγραφών του ενισχυτή. Σκοπός της ενέργειας αυτής είναι ο τυχόν εντοπισμός παραμέτρου που κατέχει κρισιμότερο ρόλο στην πρόκληση της παρεμβολής για δεδομένη συχνότητα.

Η επιλεγείσα παραμετροποίηση της κυματομορφής του παλμού εμφανίζεται στον ακόλουθο πίνακα:

Pulse Width (μ s)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)
50	1	5
50	0,200	1
50	0,020	0,1
1	50	5
1	10	1
1	1	0,1
1	0,100	0,01
0,5	50	2,5
0,5	20	0,5
0,5	2	0,05
0,5	0,500	0,025

Πίνακας 4.3 - Παραμετροποίηση της κυματομορφής του παλμού

Η επιλογή της μεταβολής των ανωτέρω παραμέτρων έγινε με απώτερο σκοπό τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών του παλμού που αποτελούν βαρόμετρο για την πρόκληση των σκόπιμων παρεμβολών και για αυτό το λόγο παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές στις τιμές του πλάτους παλμού (50,1,0.5 μ s) και του PRF (100 Hz έως 1 KHz). Συναφώς, παρατηρείται μεγάλη μεταβολή των τιμών του duty cycle, το οποίο έθεσε το πλαίσιο επιλογής των τιμών των υπόλοιπων παραμέτρων, καθόσον λόγω των τεχνικών περιορισμών που εισάγει ο ενισχυτής δε θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερο του 5%.

Το σύνολο των ενεργειών διαμόρφωσης της κυματομορφής του μικροκυματικού σήματος επί της γεννήτριας διαμόρφωσης Agilent απαιτήθηκε να γίνεται από το πάνελ της συσκευής εντός του εργαστηρίου, όπως ήδη έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο.

4.3 Εκτέλεση Πειραματικής Διαδικασίας

Η τυποποίηση σε στάδια της διαδικασίας εκτέλεσης των πειραμάτων διευκόλυσε σε μεγάλο βαθμό το συντονισμό και την ολοκλήρωσή τους σε μικρό χρονικό διάστημα. Μέσα από τον καθορισμό της σειράς ενεργειών για τη λήψη των μετρήσεων αποφεύχθηκαν τυχόν παραλείψεις και πρόκληση βλαβών σε επιμέρους συσκευές που θα ήταν δυνατόν να προκύψουν λόγω του πλήθους των επαναλήψεων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο ελάχιστος αριθμός εκτέλεσης του πειράματος σε ένα drone απαιτεί την επανάληψη του με τροποποίηση των επιμέρους παραμέτρων και έλεγχο του συνόλου των διατάξεων με 732 επαναλήψεις.

Αναλυτικά, η διαδικασία εκτέλεσης μιας μέτρησης για την καταγραφή τυχόν παρεμβολής του ΜΕΑ σε μια συγκεκριμένη συχνότητα περιελάμβανε τα παρακάτω βήματα:

α. Απενεργοποίηση της λειτουργίας/εκπομπής των συσκευών παραγωγής και διαμόρφωσης σήματος, προκειμένου να είναι δυνατή η είσοδος προσωπικού στον εργαστηριακό χώρο.

β. Ενεργοποίηση του drone και τοποθέτησή του στην επιθυμητή διάταξη. Το χειριστήριο ελέγχου της πτήσης του drone τοποθετείται πίσω από τη κεραία εκπομπής έτσι ώστε να μην επηρεάζει τη διεξαγωγή του πειράματος και την καταγραφή του πεδίου. Επισημαίνεται ότι τα πτερύγια έχουν αφαιρεθεί από τους βραχίονες του drone, προκειμένου να παραμένει σε κατάλληλο ύψος απέναντι από την κεραία σε βάση επί τρίποδα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

γ. Έλεγχος και μηδενισμός του πεδίου έτσι ώστε να ξεκινήσει η μέτρηση του πεδίου όταν ξεκινήσει η εκπομπή του σήματος παρεμβολής. Το πεδίο μετρούμενο παρέμεινε τοποθετημένο δίπλα στο drone σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.

δ. Σβήσιμο του φωτισμού και ασφάλιση της εισόδου του ανηχοϊκού θαλάμου έτσι ώστε να γίνεται άμεσα αντιληπτή κάθε μεταβολή (οπτική και ακουστική) της κατάστασης λειτουργίας του.

ε. Ενεργοποίηση της γεννήτριας διαμόρφωσης του σήματος Agilent και της κατάστασης του ενισχυτή από αυτή του STANBY σε κατάσταση ενίσχυσης του εισερχόμενου σήματος.

στ. Ασφάλιση του εργαστηριακού χώρου και ανάληψη εργασίας στο χώρο του κέντρου ελέγχου.

ζ. Έλεγχος της εισόδου εικόνας και του ήχου της κάμερας στον απομακρυσμένο υπολογιστή και της διασύνδεσης της εφαρμογής διαχείρισης του πεδιόμετρου NARDA. Μέσω της εφαρμογής διαχείρισης του πεδιόμετρου είναι δυνατή η βαθμονόμησή του, η οποία απαιτείται να εκτελείται περιοδικά.

η. Εισαγωγή της επιθυμητής συχνότητας για έλεγχο στο λογισμικό της γεννήτριας σήματος και καθορισμός της επιθυμητής στάθμης ισχύος. Η παραμετροποίηση της γεννήτριας σήματος γίνονταν μέσω απομακρυσμένης σύνδεσης με αυτή.

θ. Έναρξη εκπομπής του μικροκυματικού σήματος για 10 δευτερόλεπτα παράλληλα με την εκκίνηση χρονομέτρου ακριβείας, καταγραφή τυχόν πρόκλησης παρεμβολών ή διακοπής της λειτουργίας του MEA και του χρόνου εκδήλωσης της, καθώς και της τιμής του πεδίου που ασκήθηκε σε αυτό.

ι. Διακοπή της εκπομπής, μηδενισμός του χρονομέτρου, κύλιση της συχνότητας του σήματος της γεννήτριας κατά 10 MHz και επανάληψη του προηγούμενου βήματος (4.2.θ) για τη νέα συχνότητα. Σε περίπτωση πρόκλησης παρεμβολής – διακοπής λειτουργίας του MEA εκτελέστηκαν οι αντίθετες ενέργειες των βημάτων (β) έως (στ) με την αντίστροφη σειρά.

Η σειρά ενεργειών, όπως περιγράφεται παραπάνω, τηρήθηκε σχολαστικά και καθολικά με σκοπό την προστασία του προσωπικού και του πειραματικού εξοπλισμού από τυχόν έκθεσή του στα υψηλά πεδία που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

4.4 Αποτελέσματα Πειράματος

4.4.1 Αρχικοποίηση των Μετρήσεων

Κατά το 1^ο στάδιο ελέγχου του πειράματος βρέθηκε ότι η κατάλληλη απόσταση για τη διενέργεια του πειράματος και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, συνυπολογίζοντας τους χωροταξικούς περιορισμούς του ανηχοϊκού θαλάμου, είναι η απόσταση των 2,2 μέτρων. Ουσιαστικά δηλαδή διαπιστώθηκε ότι αυτή είναι η απόσταση στην οποία εξασφαλιζόνταν η επιλεκτικότητα στη συχνότητα της παρεμβολής του drone Quanium Nona Pro. Σε μικρότερη απόσταση (1,2 μέτρα) η συχνότητα εμφάνισης παρεμβολών ήταν μεγάλη ενώ σε μεγαλύτερη απόσταση (3,2 μέτρα) η εκδήλωση παρεμβολών εμφάνισε χαμηλή συχνότητα.

Η στάθμη ισχύος της γεννήτριας σήματος ορίστηκε στο -1 dbm και η κυματομορφή του παλμού διαμορφώθηκε με PRFστο 1 KHz, πλάτος παλμού (pulse width) στα 50 μs και κατ' επέκταση, ο παλμός διαμορφώθηκε να λειτουργεί με duty cycle στο 5%. Η επιλογή των παραμέτρων της διαμόρφωσης πραγματοποιήθηκε υπό

τον περιορισμό της τιμής του duty cycle (έως 5 %), οπότε σε αυτή τη φάση του πειράματος ελέγχθηκε η δυνατότητα παρεμβολής του drone με σχετικά μεγάλης διάρκειας παλμό και μικρότερη συχνότητα επανάληψης. Η επιλογή μίας μεγάλης τιμής για την παράμετρο της διάρκειας παλμού σε αυτή τη φάση κρίθηκε ως καταλληλότερη, για να εξασφαλισθεί ότι η εκπομπή του παλμού δύναται να γίνει αντιληπτή από τις ηλεκτρονικές διατάξεις του στόχου. Επιπρόσθετα, αποτελεί μία βάση εργασίας για τη σύγκριση των παραμέτρων της διάρκειας και της συχνότητας επανάληψης του παλμού ως προς τη βαρύτητα που έχουν στην παρεμβολή του ΜΕΑ, για εκτεταμένο έλεγχο σε επόμενη φάση.

4.4.2 Καταγραφή Αποτελεσμάτων

α. Διάταξη HEAD 1

Ξεκινώντας από τη διάταξη HEAD 1 του drone Quantum Nova Προπαρατηρήθηκε εκδήλωση παρεμβολών, με την πλειοψηφία εξ'αυτών να καταλήγουν σε διακοπή λειτουργίας του drone. Η διακοπή λειτουργίας του drone γινόταν αντιληπτή από το συνδυασμό των παρακάτω:

- (1) παύση της περιστροφής των κινητήρων.
- (2) χαρακτηριστικό ηχητικό σήμα το οποίο επαναλήφθηκε σε όλες τις διακοπές λειτουργίας ως αποτέλεσμα της έκθεσής του στην μικροκυματική εκπομπή.
- (3) γρήγορο «αναβόσβημα» των LED στα άκρα των βραχιόνων του, χωρίς όμως να υπάρξει τροποποίηση του χρώματος των φωτεινών ενδείξεών του.

Οι λοιπές παρεμβολές στη λειτουργία του drone που διαπιστώθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και δεν οδήγησαν σε διακοπή αυτής, αφορούσαν στην αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων του και σε παροδικά και ακανόνιστα οπτικά σήματα («αναβόσβημα» LED).

Επιπρόσθετα, σε συγκεκριμένες συχνότητες παρατηρήθηκε ότι η διακοπή λειτουργίας προέκυψε μετά την παύση τη εκπομπής της σκόπιμης ακτινοβολίας, δίχως να έχει παρατηρηθεί μεταβολή της λειτουργίας του drone ως εκείνο το χρονικό σημείο.

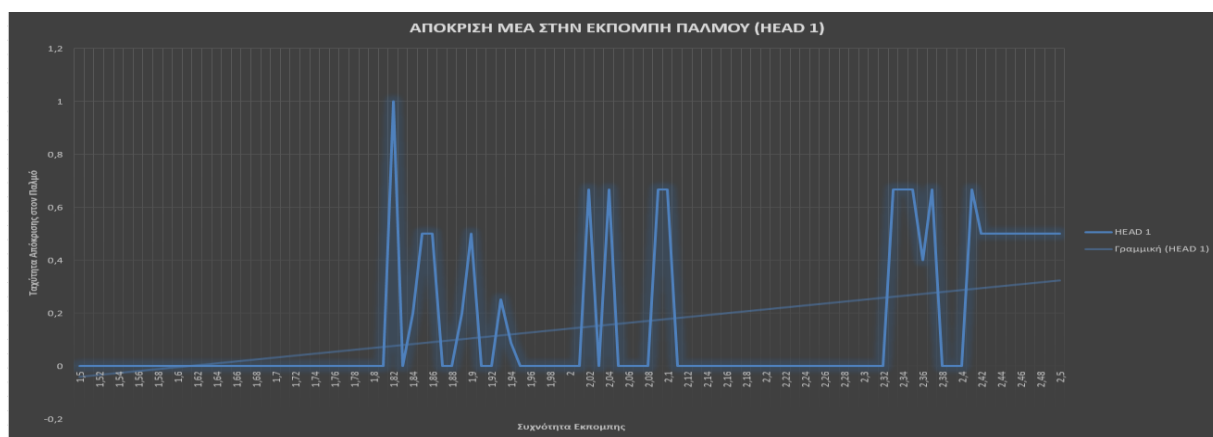
Οι συχνότητες στις οποίες παρατηρήθηκε η πρόκληση επιτυχημένων παρεμβολών με μικρής διάρκειας εκπομπή του παλμικά διαμορφωμένου σήματος εμφανίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διάταξη : HEAD 1		d =2,2 m, P =-1 dbm, PW=50 μs ,PRF=1KHz , DC=5%			
f (GHz)	t (sec)	E (V/m)	f (GHz)	t (sec)	E (V/m)
1,76	(*)	247	2,02	3	193
1,77	(*)	167	2,04	3	190
1,78	(*)	173	2,09	3	133
1,81	(*)	232	2,1	3	155
1,82	2	173	2,33	3	245

1,84	10 (**)	177	2,34	3	277
1,85	4	174	2,35	3	284
1,86	4	148	2,36	5	202
1,89	10 (**)	176	2,37	3	174
1,9	4	165	2,41	3	130
1,93	8	132	2,42	4	115
1,94	10 (**)	134	2,43	4	113
* Παρατηρήθηκε η παρεμβολή του drone, που εκδηλώθηκε με αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής των στροφείων, χωρίς να προκληθεί διακοπή της λειτουργίας του. (**) Παρατηρήθηκε η διακοπή λειτουργίας του drone με την παύση της εκπομπής του μικροκυματικού σήματος.			2,44	4	108
			2,45	4	115
			2,46	4	133
			2,47	4	124
			2,48	4	131
			2,49	4	111
			2,5	4	106

Πίνακας 4.4 - Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη HEAD 1

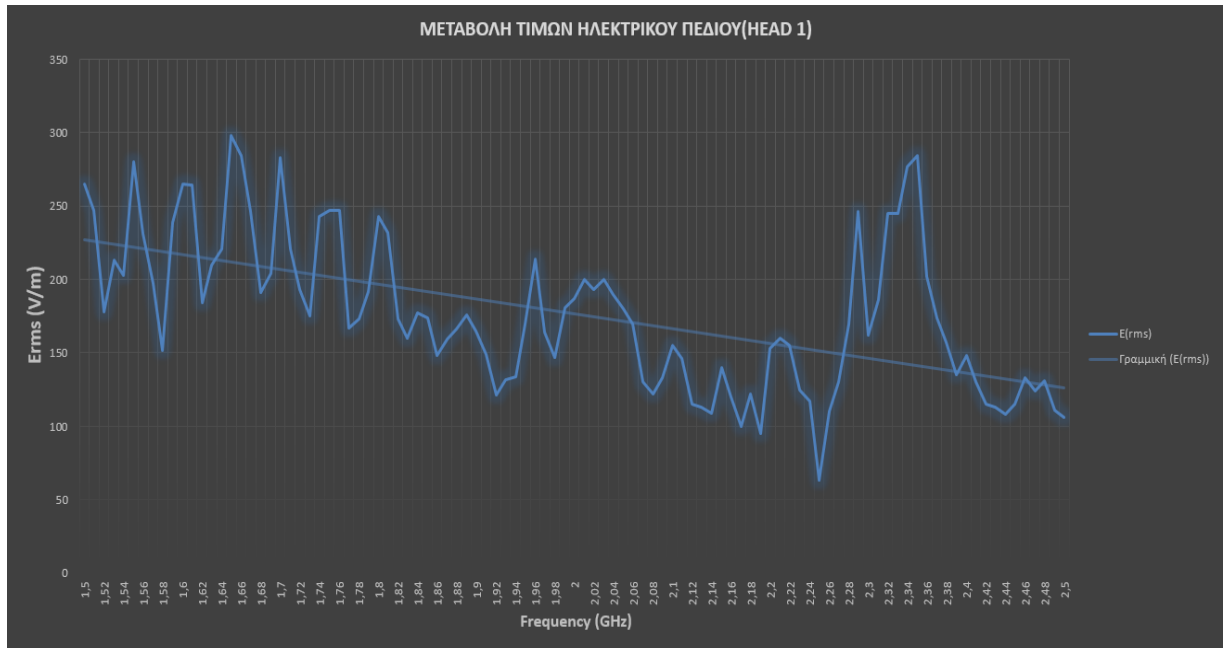
Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα που εξετάζει την ταχύτητα απόκρισης του drone, κατά την έκθεση του στη σκόπιμη παρεμβολή, όταν προκλήθηκε διακοπή της λειτουργίας του εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4.15 - Απόκριση ΜΕΑ στην εκπομπή παλμού (HEAD 1)

Σύμφωνα με το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας, η γρηγορότερη σκόπιμη παρεμβολή κατεγράφη στη συχνότητα των 1,82 GHz ενώ η ζώνη συχνοτήτων από 2,32 έως 2,5 GHz διαφαίνεται ως κατάλληλη και με σχετικά γρήγορη απόκριση του ΜΕΑ στην πρόκληση παρεμβολών σχεδόν στο σύνολό της. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται με βάση το διάγραμμα μια τάση εμφάνισης συχνότερων και ταχύτερων παρεμβολών στις ανώτερες φασματικές περιοχές εκπομπής.

Επιπρόσθετα, στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου σε σχέση με τη συχνότητα, όπου παρατηρείται ότι έχουμε μια τάση μείωσης της RMS τιμής του ηλεκτρικού πεδίου με την αύξηση της συχνότητας. Παρόλα αυτά παρατηρείται αύξηση της τιμής του πεδίου σε μία μικρή ζώνη συχνοτήτων στην ανώτερη περιοχή συχνοτήτων (από 2,29 έως 2,35 GHz).



Εικόνα 4.16 - Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (HEAD 1)

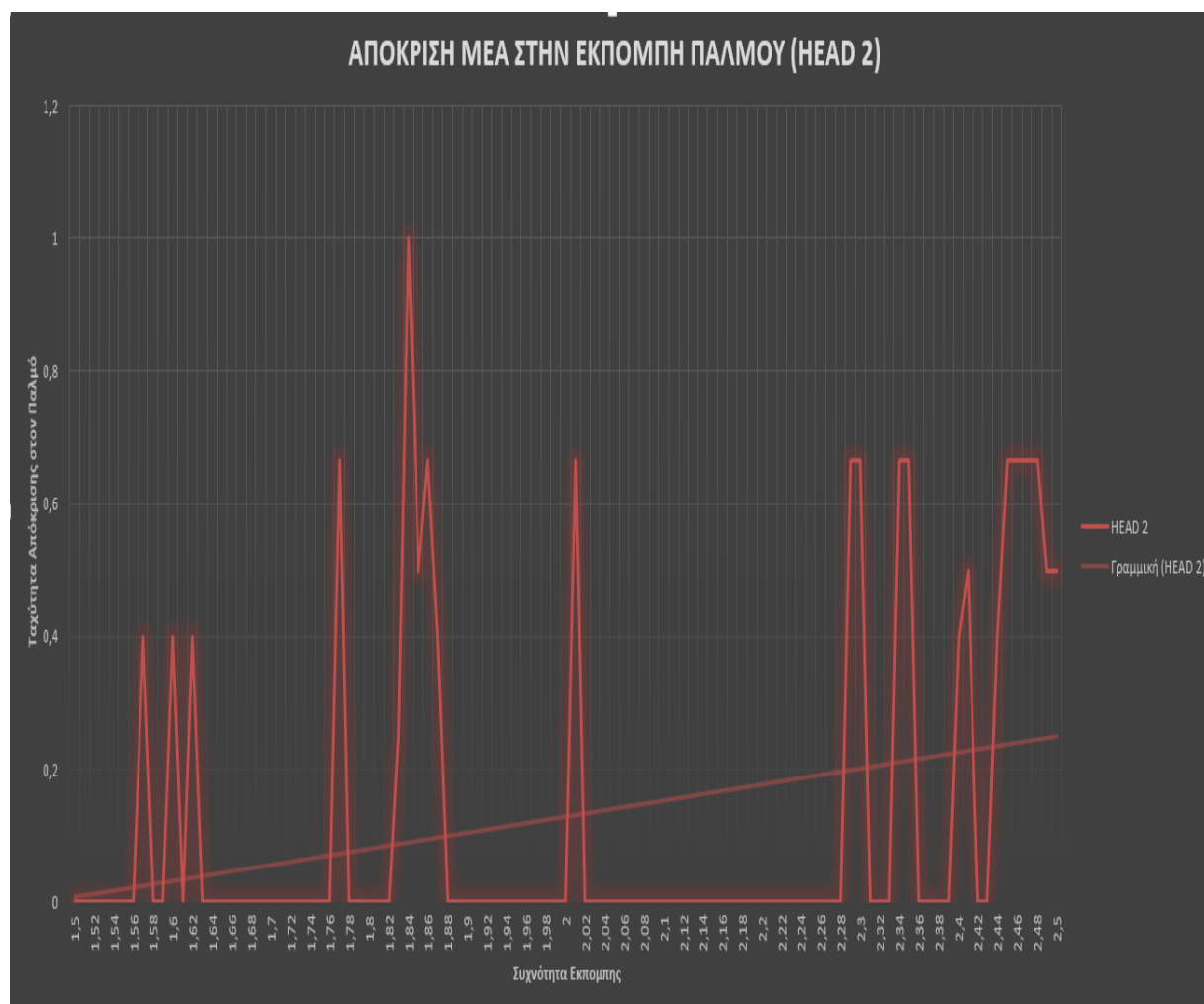
β. Διάταξη HEAD 2

Στη διάταξη HEAD 2 παρατηρήθηκε η εκδήλωση παρεμβολών σε πολλαπλές συχνότητες, οι οποίες οδήγησαν στη συντριπτική πλειοψηφία τους σε διακοπή λειτουργίας του. Οι συχνότητες αυτές αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διάταξη : HEAD 2		d =2,2 m,P =-1 dbm, PW=50 μs ,PRF=1KHz , DC=5%			
f (GHz)	t (sec)	E (V/m)	f (GHz)	t (sec)	E (V/m)
1,55	*	275	2,01	3	223
1,57	5	234	2,29	3	260
1,6	5	299	2,3	3	171
1,62	5	237	2,34	3	260
1,77	3	205	2,35	3	181
1,83	8	173	2,4	5	165
1,84	2	168	2,41	4	135
1,85	4	180	2,44	4	134
1,86	3	210	2,45	4	125
1,87	5	163	2,46	4	134
* Παρατηρήθηκε η παρεμβολή του drone, που εκδηλώθηκε με αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής των στροφείων, χωρίς να προκληθεί διακοπή της λειτουργίας του.			2,47	4	112
			2,48	4	108
			2,49	4	118
			2,5	4	118

Πίνακας 4.5 - Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη HEAD 2

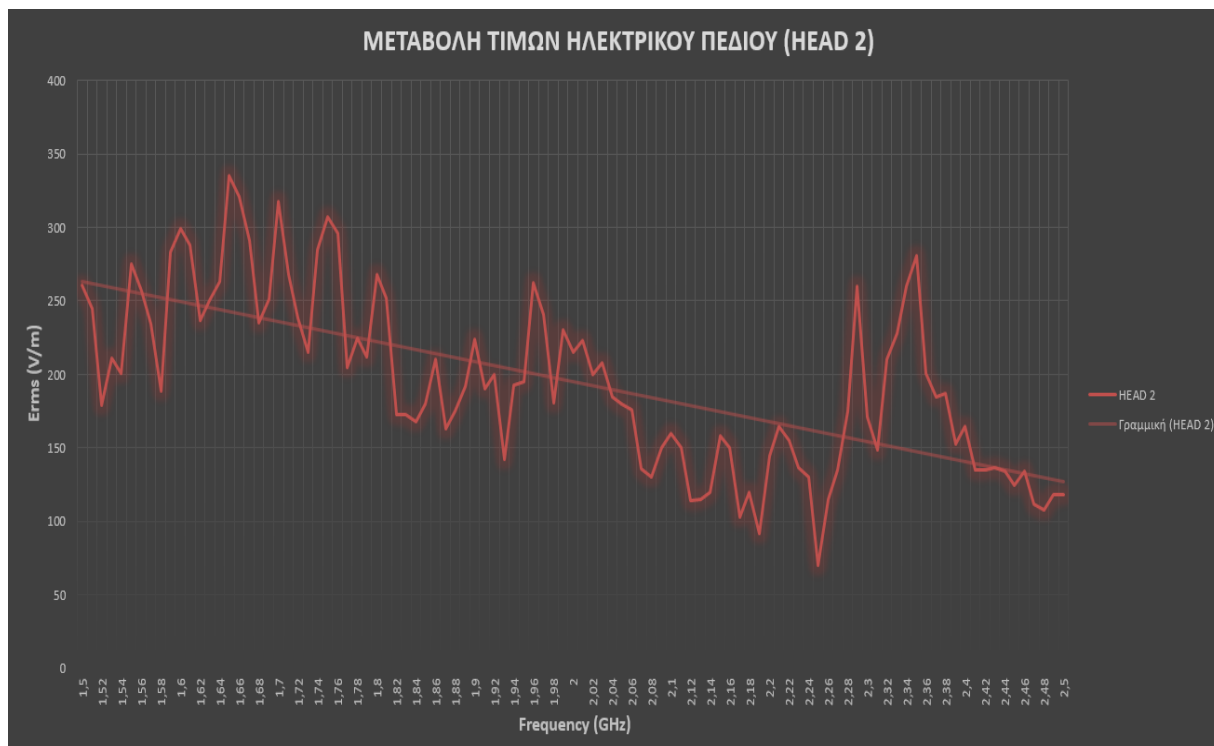
Η ταχύτητα απόκρισης του drone στην έκθεσή του στη σκόπιμη παρεμβολή, όταν προκλήθηκε διακοπή της λειτουργίας του εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4.17 - Απόκριση ΜΕΑ στην εκπομπή παλμού (HEAD 2)

Σύμφωνα με το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας, η γρηγορότερη σκόπιμη παρεμβολή κατεγράφη στη συχνότητα των 1,84GHz ενώ στη ζώνη συχνοτήτων από 2,29 έως 2,5 GHz παρατηρείται πυκνή αλλά όχι ενιαία παρουσία συχνοτήτων που προκαλούν παρεμβολή. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται με βάση το διάγραμμα μια τάση εμφάνισης συχνότερων και ταχύτερων παρεμβολών στις ανώτερες φασματικές περιοχές εκπομπής.

Επιπρόσθετα, στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου σε σχέση με τη συχνότητα όπου παρατηρείται ότι έχουμε μια τάση μείωσης της RMS τιμής του ηλεκτρικού πεδίου με την αύξηση της συχνότητας. Παρόλα αυτά παρατηρείται αύξηση της τιμής του πεδίου σε μία μικρή ζώνη συχνοτήτων στην ανώτερη περιοχή συχνοτήτων (από 2,29 έως 2,35 GHz).



Εικόνα 4.18 - Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (HEAD 2)

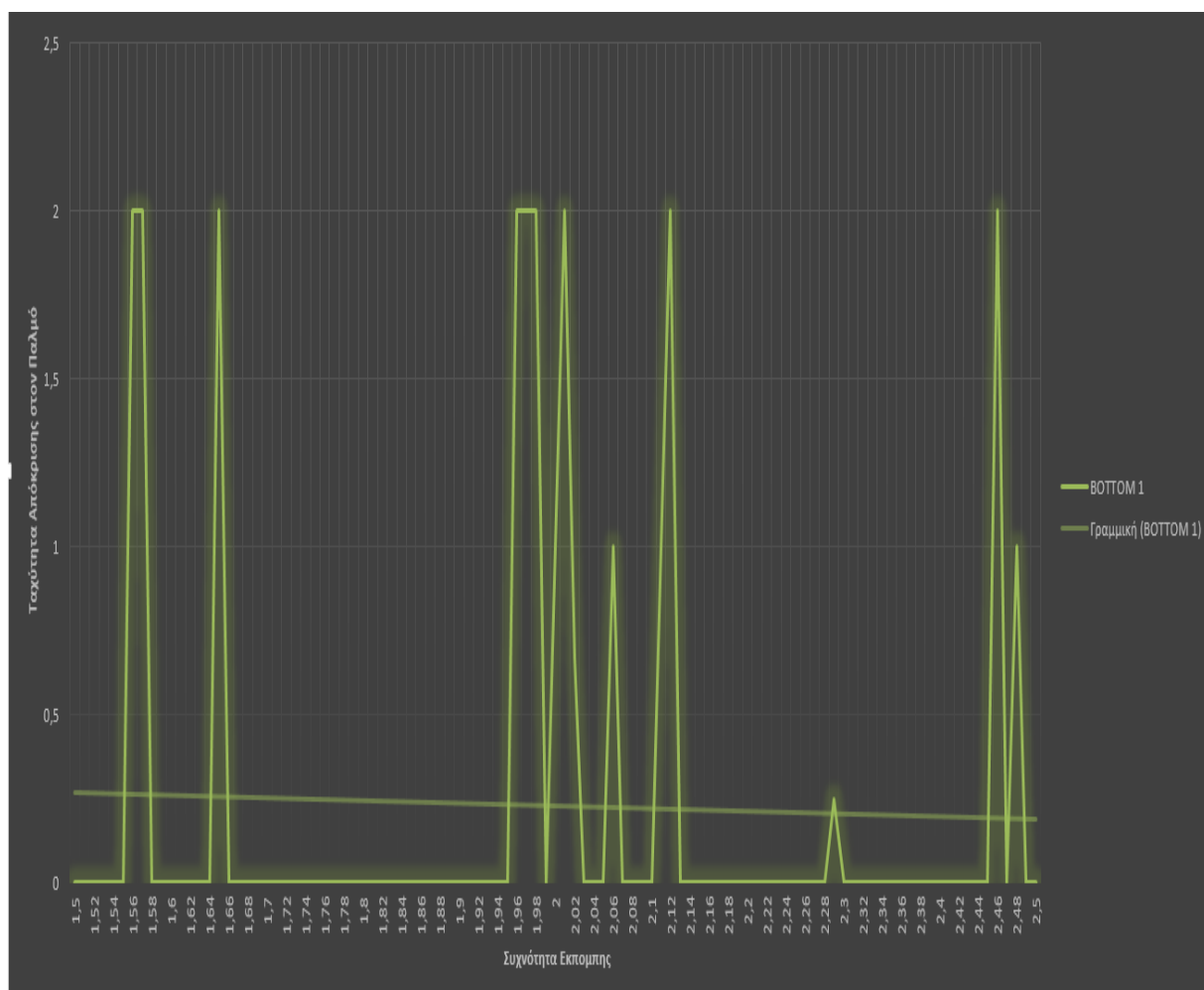
γ. Διάταξη BOTTOM 1

Στη διάταξη BOTTOM 1 απαιτήθηκε η μείωση της στάθμης ισχύος της παραγόμενης ακτινοβολίας στη γεννήτρια σήματος διότι παρατηρήθηκε έντονη πρόκληση παρεμβολής στο σύνολο των συχνοτήτων στη ζώνη 1,5 έως 1,65 GHz. Η ισχύς ορίστηκε στα -6 dbm για τη ζώνη συχνοτήτων από 1,5 έως 2 GHz και αναπροσαρμόστηκε στο -1 dbm για τον έλεγχο συχνοτήτων άνω των 2 GHz. Το σύνολο των προκληθέντων παρεμβολών σε αυτή τη διάταξη αφορούν σε πρόκληση διακοπής λειτουργίας του ΜΕΑ. Οι συχνότητες αυτές αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διάταξη : BOTTOM1			d =2,2 m, PW=50 μs , PRF=1KHz , DC=5%		
P =-1 dbm			P =-6 dbm		
f (GHz)	t (sec)	E (V/m)	f (GHz)	t (sec)	E (V/m)
1,56	1	67	2	2	238
1,57	1	41	2,01	1	237
1,65	1	71	2,02	3	250
1,96	1	33	2,06	2	251
1,97	1	28	2,11	2	185
1,98	1	22	2,12	1	175
			2,29	8	259
			2,32	6	324
			2,46	1	181
			2,48	2	163

Πίνακας 4.6 - Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη BOTTOM 1

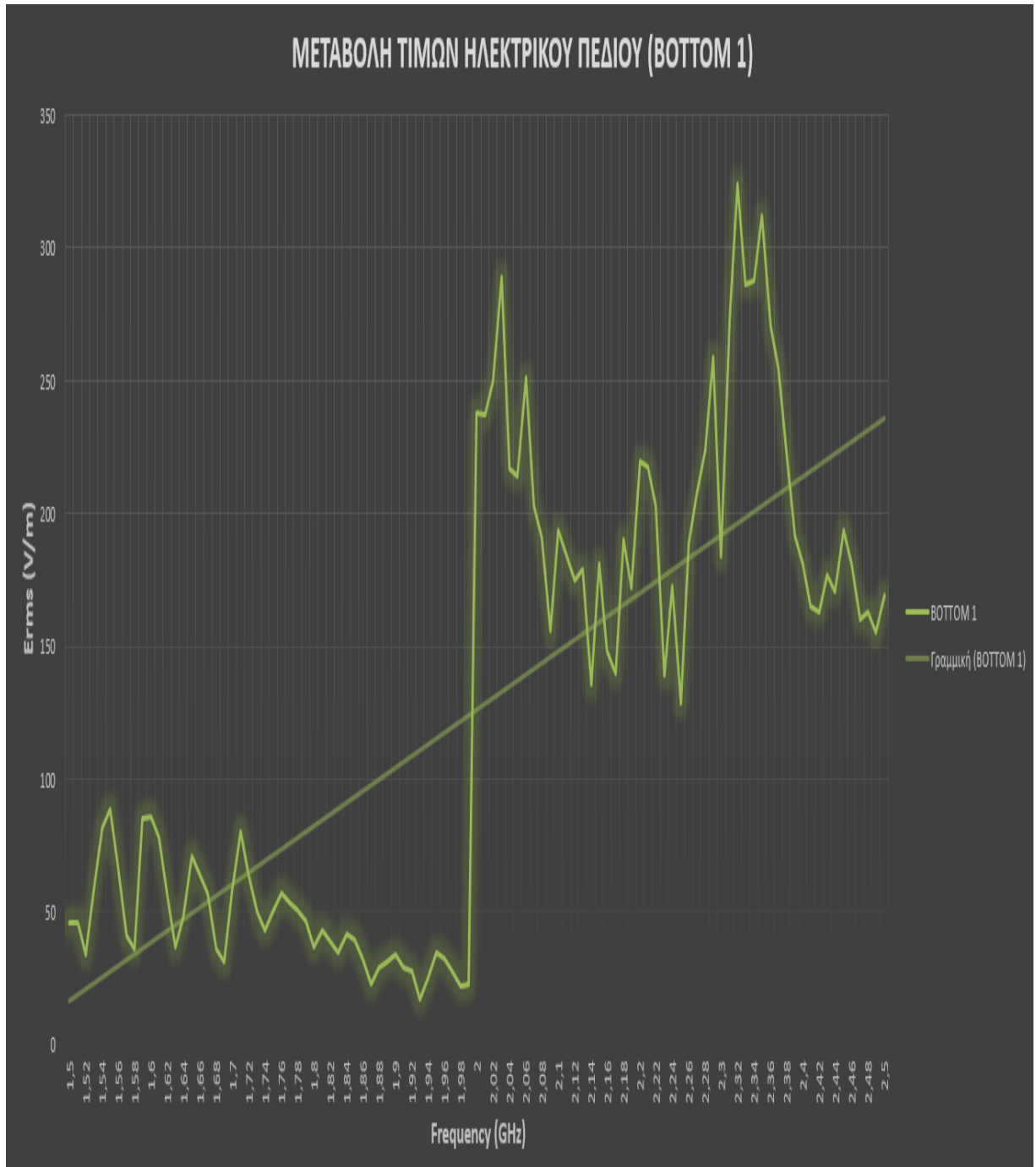
Η ταχύτητα απόκρισης του drone στην έκθεση του στη σκόπιμη παρεμβολή, όταν προκλήθηκε διακοπή της λειτουργίας του εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4.19 - Απόκριση ΜΕΑ στην εκπομπή παλμού (BOTTOM 1)

Σύμφωνα με το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας, οι συχνότητες στις οποίες προέκυψε παρεμβολή στο ΜΕΑ επιτυγχάνουν την άμεση διακοπή λειτουργίας του. Η ζώνη συνοτήτων από 1,96 έως 2,12 GHz περιλαμβάνει πυκνή παρουσία συνοτήτων που προκάλεσαν παρεμβολή, χωρίς όμως το παραπάνω να αποτελεί αξιόπιστο δεδομένο λόγω μειωμένης ισχύος εκπομπής στο πρώτο μισό της περιοχής συνοτήτων ενδιαφέροντος. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται με βάση το διάγραμμα μια τάση μείωσης της εμφάνισης παρεμβολών στις ανώτερες φασματικές περιοχές εκπομπής.

Αντίστοιχα στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου σε σχέση με τη συχνότητα αλλά για το προαναφερόμενο λόγο της μειωμένης ισχύος στο πρώτο μισό της περιοχής συνοτήτων ενδιαφέροντος, δεν αποτελεί αξιόπιστο δεδομένο.



Εικόνα 4.20 - Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (BOT TOM 1)

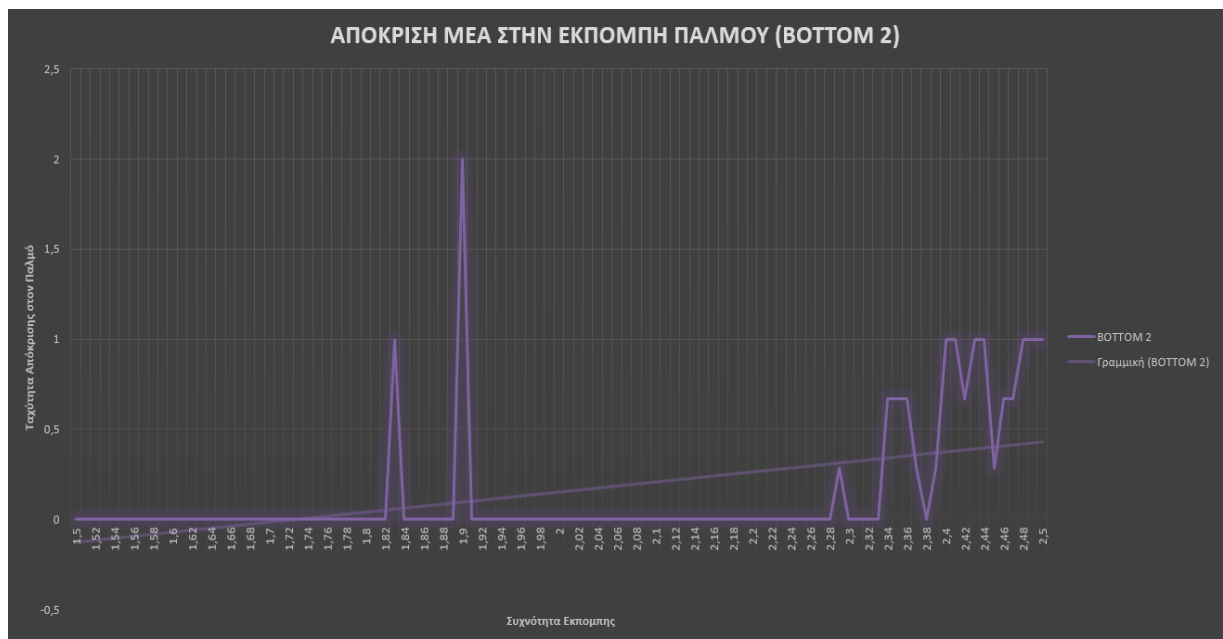
δ. Διάταξη BOT TOM 2

Στη διάταξη BOT TOM 2 απαιτήθηκε, επίσης, η μείωση της στάθμης ισχύος της παραγόμενης ακτινοβολίας στη γεννήτρια σήματος διότι παρατηρήθηκε έντονη πρόκληση παρεμβολής στο σύνολο των συχνοτήτων στη ζώνη 1,5 έως 1,6 GHz. Η ισχύς ορίστηκε στα -6 dbm για τη ζώνη συχνοτήτων από 1,5 έως 2 GHz και αναπροσαρμόστηκε στο -1 dbm για τον έλεγχο συχνοτήτων άνω των 2 GHz. Το σύνολο των προκληθέντων παρεμβολών σε αυτή τη διάταξη αφορούν σε πρόκληση διακοπής λειτουργίας του ΜΕΑ. Οι συχνότητες αυτές αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διάταξη : BOTTOM 2			d =2,2 m,PW=50 μ s ,PRF=1KHz , DC=5%		
P =-6 dbm			P =-1 dbm		
f (GHz)	t (sec)	E (V/m)	f (GHz)	t (sec)	E (V/m)
1,83	2	43	2,29	7	173
1,9	1	40	2,34	3	220
			2,35	3	245
			2,36	3	211
			2,37	7	175
			2,39	7	146
			2,4	2	138
			2,41	2	119
			2,42	3	138
			2,43	2	147
			2,44	2	137
			2,45	7	148
			2,46	3	135
			2,47	3	138
			2,48	2	143
			2,49	2	142
			2,5	2	132

Πίνακας 4.7 - Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη BOTTOM 2

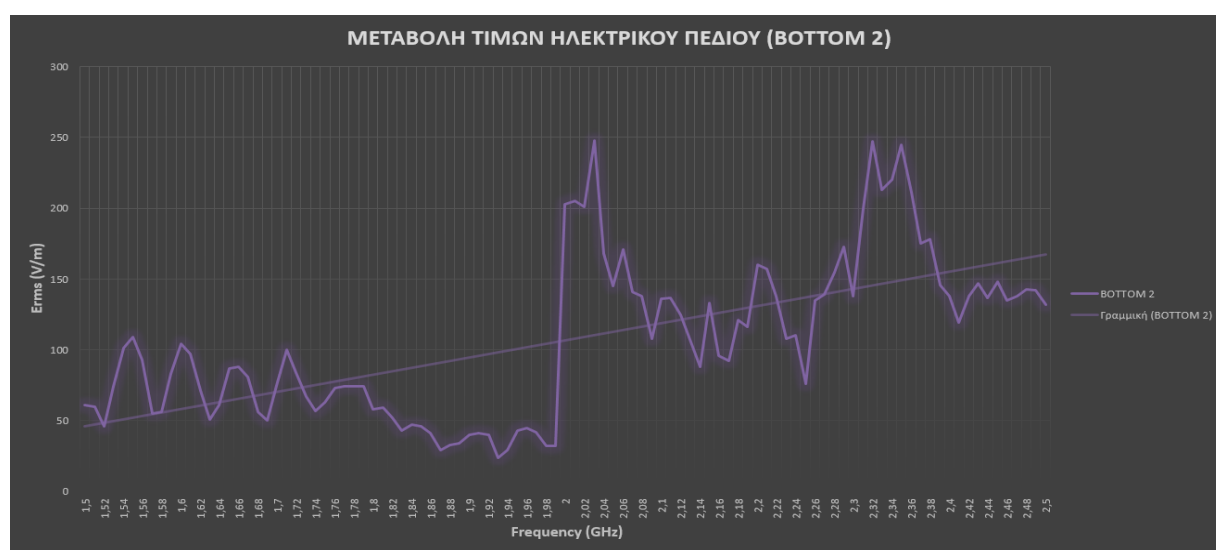
Η ταχύτητα απόκρισης του drone στην έκθεση του στη σκόπιμη παρεμβολή, όταν προκλήθηκε διακοπή της λειτουργίας του εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4.21 - Απόκριση ΜΕΑ στην εκπομπή παλμού (BOTTOM 2)

Σύμφωνα με το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας, η γρηγορότερη σκόπιμη παρεμβολή κατεγράφη στη συχνότητα των 1,9 GHz ενώ η ζώνη συχνοτήτων από 2,34 έως 2,5 GHz περιλαμβάνει πυκνή παρουσία συχνοτήτων που προκάλεσαν παρεμβολή, χωρίς όμως το παραπάνω να αποτελεί αξιόπιστο δεδομένο, λόγω μειωμένης ισχύος εκπομπής στο πρώτο μισό της περιοχής συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται με βάση το διάγραμμα μια τάση εμφάνισης συχνών παρεμβολών στις ανώτερες φασματικές περιοχές εκπομπής.

Αντίστοιχα στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου σε σχέση με τη συχνότητα αλλά για το προαναφερόμενο λόγο της μειωμένης ισχύος στο πρώτο μισό της περιοχής συχνοτήτων ενδιαφέροντος, δεν αποτελεί αξιόπιστο δεδομένο.



Εικόνα 4.22 - Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (BOTTOM 2)

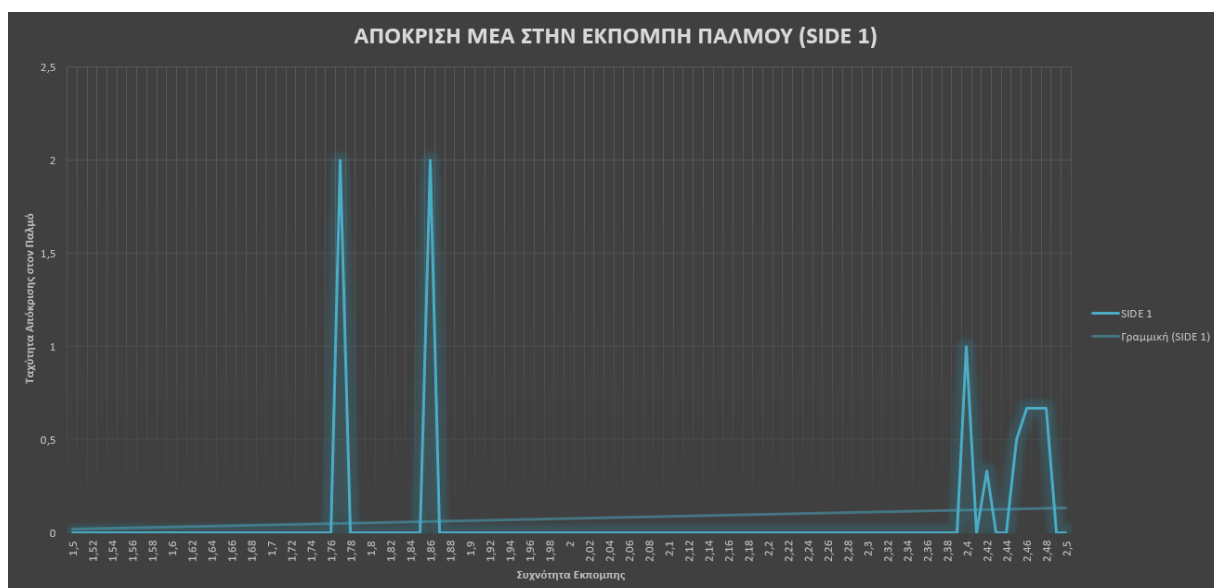
ε. Διάταξη SIDE 1

Στη διάταξη SIDE 1 παρατηρήθηκε η εκδήλωση παρεμβολών σε περιορισμένο αριθμό συχνοτήτων, οι οποίες οδήγησαν στο σύνολό τους σε διακοπή λειτουργίας του. Οι συχνότητες αυτές αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διάταξη : SIDE 1		d =2,2 m, P =-1 dbm ,PW=50 μs ,PRF=1KHz , DC=5%			
f (GHz)	t (sec)	E (V/m)	f (GHz)	t (sec)	E (V/m)
1,77	1	122	2,4	2	171
1,86	1	71	2,42	6	159
			2,45	4	182
			2,46	3	183
			2,47	3	133
			2,48	3	163

Πίνακας 4.8 - Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη SIDE 1

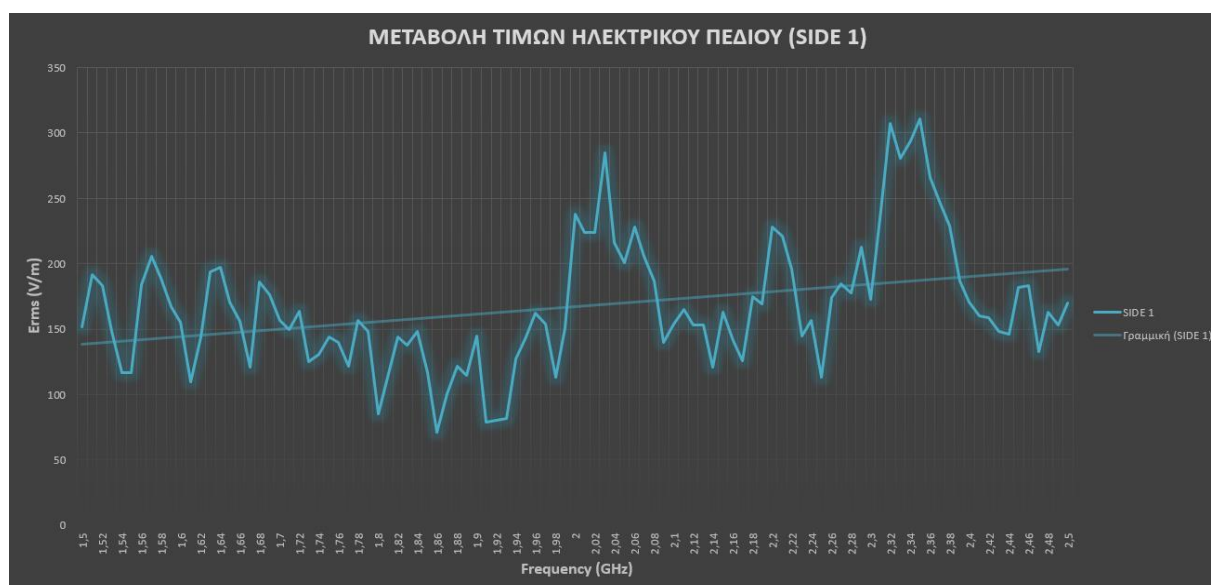
Η ταχύτητα απόκρισης του drone στην έκθεση του στη σκόπιμη παρεμβολή, όταν προκλήθηκε διακοπή της λειτουργίας του εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4.23 - Απόκριση ΜΕΑ στην εκπομπή παλμού (SIDE 1)

Σύμφωνα με το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας, η γρηγορότερη σκόπιμη παρεμβολή κατεγράφη στις συχνότητες των 1,77 και 1,84 GHz ενώ στη ζώνη συχνοτήτων από 2,4 έως 2,5 GHz παρατηρείται συχνότερη εμφάνιση συχνοτήτων που προκαλούν παρεμβολή.

Επιπρόσθετα, στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου σε σχέση με τη συχνότητα όπου παρατηρείται ότι έχουμε μια τάση αύξηση της RMS τιμής του ηλεκτρικού πεδίου με την αύξηση της συχνότητας.



Εικόνα 4.24 - Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (SIDE 1)

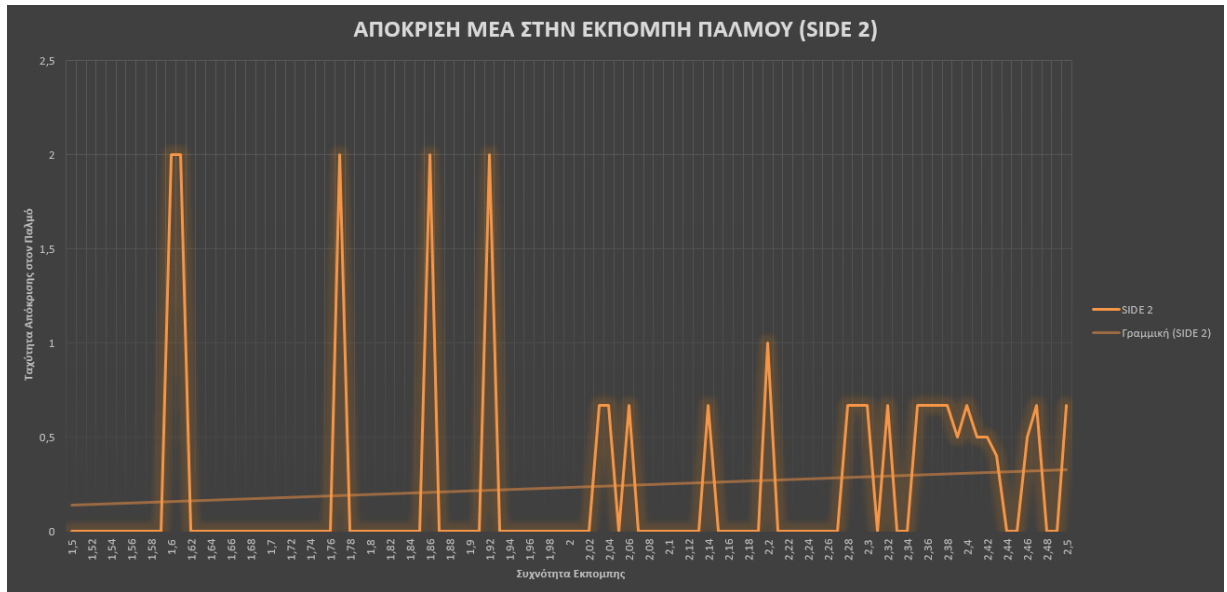
στ. Διάταξη SIDE 2

Στη διάταξη SIDE 2 απαιτήθηκε η μείωση της στάθμης ισχύος της παραγόμενης ακτινοβολίας στη γεννήτρια σήματος, όπως στις διατάξεις BOTTOM 1 και 2, διότι παρατηρήθηκε έντονη πρόκληση παρεμβολής στο σύνολο των συχνοτήτων στη ζώνη 1,5 έως 1,65 GHz. Η ισχύς ορίστηκε στα -6 dbm για τη ζώνη συχνοτήτων από 1,5 έως 2 GHz και αναπροσαρμόστηκε στο -1 dbm για τον έλεγχο συχνοτήτων άνω των 2 GHz. Το σύνολο των προκληθέντων παρεμβολών σε αυτή τη διάταξη αφορούν σε πρόκληση διακοπής λειτουργίας του MEA. Οι συχνότητες αυτές αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διάταξη : SIDE 2			d =2,2 m, PW=50 μ s ,PRF=1KHz , DC=5%		
P =-6 dbm			P =-1 dbm		
f (GHz)	t (sec)	E (V/m)	f (GHz)	t (sec)	E (V/m)
1,6	*	62	2,03	3	175
1,61	*	56	2,04	3	169
1,77	*	49	2,06	3	217
1,86	1	30	2,14	3	137
1,92	1	36	2,2	2	149
			2,28	3	156
			2,29	3	272
			2,3	3	173
			2,32	3	190
			2,35	3	225
			2,36	3	177
			2,37	3	137
* Παρατηρήθηκε η παρεμβολή του drone, που εκδηλώθηκε με αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής των τροφείων, χωρίς να προκληθεί διακοπή της λειτουργίας του.			2,38	3	161
			2,39	4	134
			2,4	3	142
			2,41	4	123
			2,42	4	100
			2,43	5	94
			2,46	4	136
			2,47	3	103
				2,5	3

Πίνακας 4.9 - Συχνότητες Παρεμβολής στη διάταξη SIDE 2

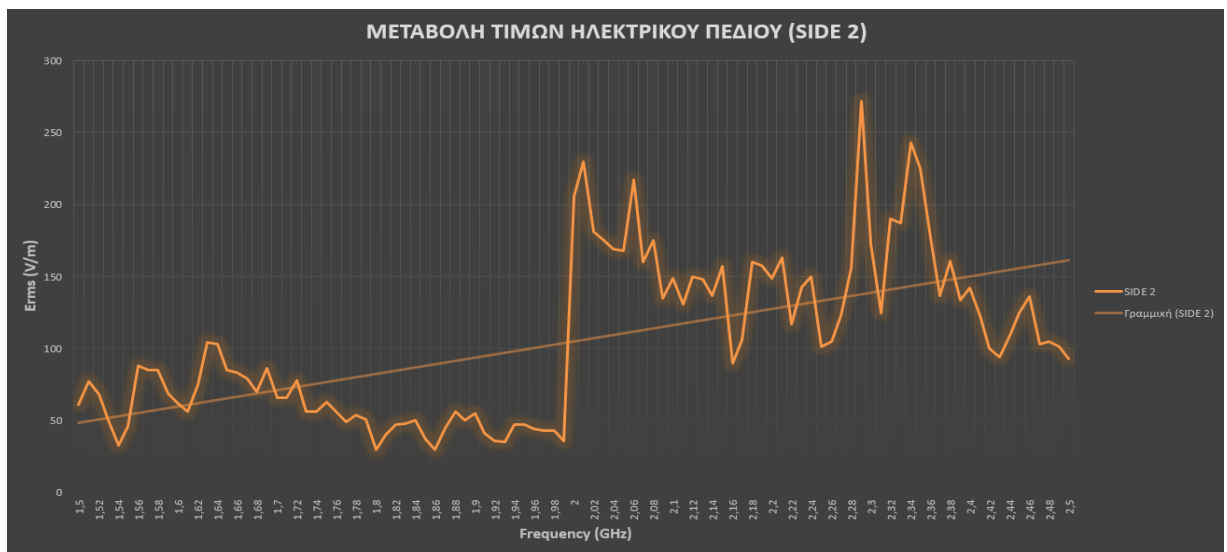
Η ταχύτητα απόκρισης του drone στην έκθεση του στη σκόπιμη παρεμβολή, όταν προκλήθηκε διακοπή της λειτουργίας του εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4.25 - Απόκριση ΜΕΑ στην εκπομπή παλμού (SIDE 2)

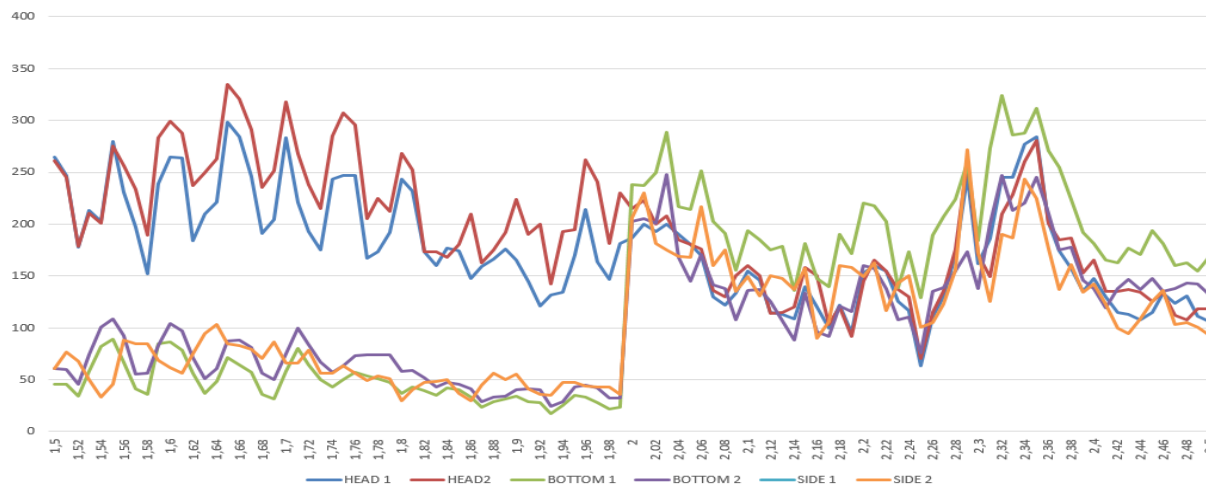
Σύμφωνα με το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας, στο πρώτο μισό του φάσματος ενδιαφέροντος εκδηλώθηκε ταχεία παρεμβολή σε 4 συχνότητες ενώ στο δεύτερο μισό της φασματικής ζώνης παρατηρείται πυκνή παρουσία συχνοτήτων που προκαλούν παρεμβολή αλλά με πιο αργή εκδήλωση των αποτελεσμάτων της. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται με βάση το διάγραμμα μια τάση εμφάνισης συχνότερων παρεμβολών στις ανώτερες φασματικές περιοχές εκπομπής.

Επιπρόσθετα, στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου σε σχέση με τη συχνότητα, όπου παρατηρείται ότι έχουμε έντονες διακυμάνσεις της RMS τιμής του ηλεκτρικού πεδίου τόσο στο πρώτο μισό του φάσματος (1,5-2 GHz) όπου η ισχύς είναι μειωμένη όσο και στο δεύτερο μισό (2-2,5 GHz).



Εικόνα 4.26 - Μεταβολή Τιμών Ηλεκτρικού Πεδίου (SIDE 2)

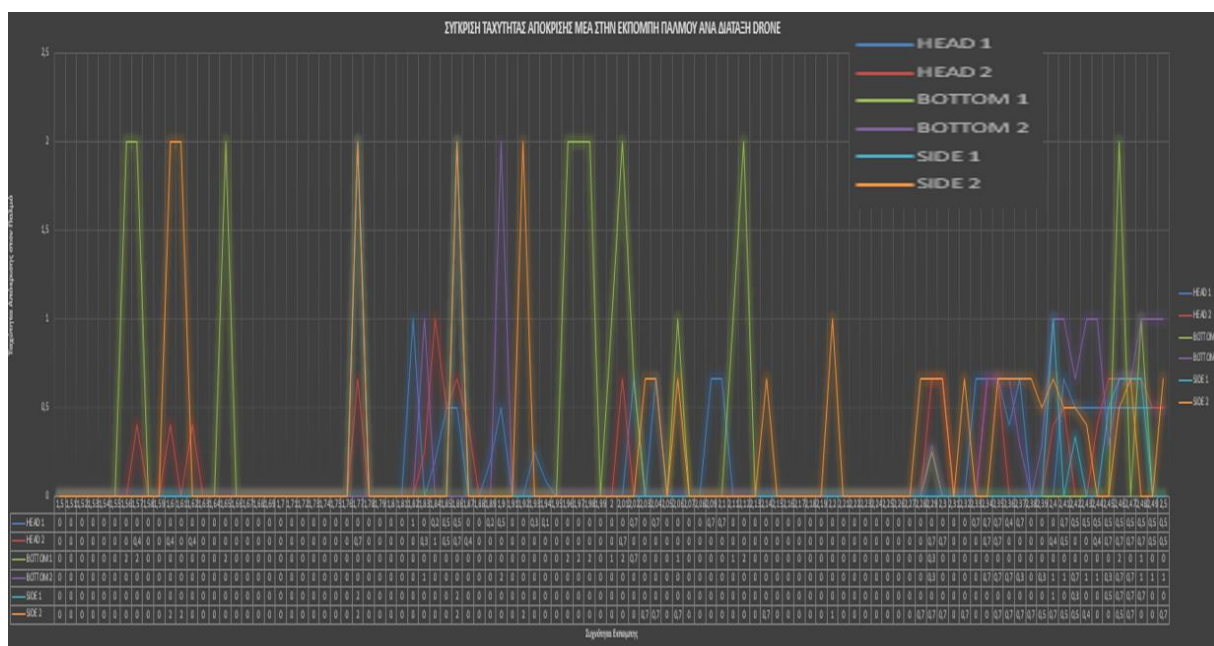
Η μεταβολή του πεδίου στις έξι καταμετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, εμφανίζεται να είναι της ίδιας μορφής χωρίς να παρουσιάζει ακρότατες τιμές σε διαφορετικές συχνότητες ενώ η συχνότητα εμφανίζεται να έχει συσχετισμό με το πεδίο που προκύπτει.



Εικόνα 4.27 - Μεταβολή Ηλεκτρικού Πεδίου στις διάφορες διατάξεις

Από την ανωτέρω εικόνα προκύπτει ότι υψηλές τιμές πεδίου εμφανίζονται στις συχνότητες 1.66 έως 1.8 και 2.3 έως 2.36 GHz ενώ στις ζώνες 1.82 έως 1.94 , 2.1 έως 2.26 και 2.42 έως 2.5 το πεδίο εμφανίζεται να φθίνει.

Τα συγκεντρωτικά συγκριτικά αποτελέσματα της ευαισθησίας του droneανά διάταξη και συχνότητα παρεμβολής εμφανίζονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.28 - Απόκριση του drone Quantum Nova Pro στην έκθεση του σε Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό ανά συχνότητα

Αναλύοντας την παραπάνω εικόνα εξάγονται χρήσιμα προκαταρκτικά συμπεράσματα, τα οποία είναι απαραίτητα να ενισχυθούν με κατάλληλη επεξεργασία. Τα κυριότερα συμπεράσματα που σχετίζονται με το 1^ο στάδιο του πειράματος είναι τα παρακάτω:

α. Στο εύρος συχνοτήτων από 1,5 έως 2,2 GHz παρατηρείται μεγάλη επιλεκτικότητα της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας του drone ως προς τη συχνότητα που δύναται να προκληθεί παρεμβολή. Άμεση απόκριση εμφανίζεται σε συγκεκριμένες διατάξεις του drone (BOTTOM 1, BOTTOM 2, SIDE 2), χωρίς όμως η απόκριση αυτή να συμβαίνει τόσο άμεσα σε περισσότερες από μία διατάξεις στις συγκεκριμένες συχνότητες.

β. Συχνότητα η οποία προκαλεί παρεμβολή σε συνολικά τέσσερις διατάξεις (HEAD 1 , HEAD 2, SIDE 1, SIDE 2) του drone είναι η 1.86 GHz.

γ. Συχνότητα η οποία προκαλεί παρεμβολή σε συνολικά τέσσερις διατάξεις (HEAD 1 , HEAD 2, SIDE 1, SIDE 2) του drone είναι η 1.77 GHz, στην οποία όμως προέκυψε διακοπή λειτουργίας σε τρεις περιπτώσεις (HEAD 2, SIDE 1, SIDE 2) ενώ στη διάταξη HEAD 1 προέκυψε παρεμβολή με χαρακτηριστικά εκδήλωσης όπως στην παράγραφο 4.3.2.α(3).

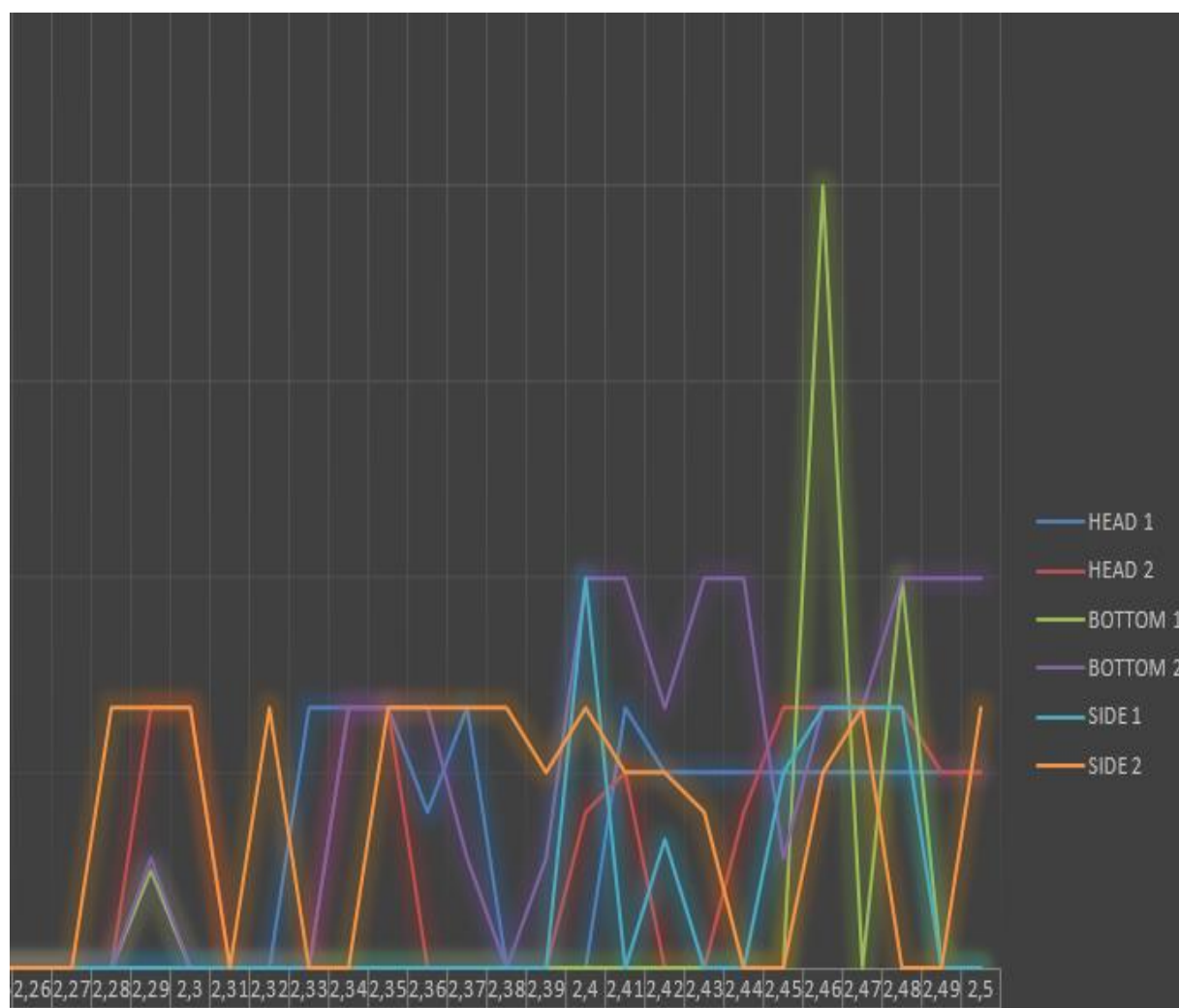


Εικόνα 4.29 - Απόκριση του drone Quantum Nova Προστην έκθεση του σε Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό συχνότητας 1,77 και 1,86 GHz

δ. Οι ζώνες συχνοτήτων 1.5 έως 1.55 GHz, 1.66 έως 1.76 GHz, 2.15 έως 2.19 GHz και 2.21 έως 2.27 GHz δεν περιλαμβάνουν συχνότητες στις οποίες προκύπτει διακοπή της λειτουργίας του ΜΕΑ.

ε. Στη διάταξη BOTTOM 1 προκύπτουν άμεσες παρεμβολές του drone σε μεγάλο αριθμό συχνοτήτων, παρά τη μικρή τιμή του πεδίου που προέκυψε ως αποτέλεσμα της τροποποίησης της στάθμης ισχύος της γεννήτριας σήματος στα -6 dbm. Συγκεκριμένα στη συχνότητα 1,98 GHz κατεγράφη παρεμβολή που οδήγησε σε διακοπή λειτουργίας του ΜΕΑ με RMS τιμή πεδίου στα 22 V/m ενώ δε προέκυψε παρεμβολή στη συχνότητα 1,55 GHz με τιμή πεδίου στα 89 V/m.

στ. Στην περιοχή συχνοτήτων από 2,27 έως 2,5 εντοπίζεται μία ευρεία ζώνη παρεμβολής και με πολλαπλές διατάξεις έκθεσης του drone σε καθεμιά από αυτές. Το σύνολο των παρεμβολών αφορά σε πλήρη διακοπή λειτουργίας του ΜΕΑ και παρατηρείται ότι αριθμός συχνοτήτων επιτυγχάνει παρεμβολή σε περισσότερες των τριών διατάξεων (Εικόνα).



Εικόνα 4.30 - Απόκριση του drone Quantum Nova Pro στην έκθεση του σε Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό στις συχνότητες 2,27 έως 2,5 GHz

ζ. Συχνότητα η οποία προκαλεί παρεμβολή σε όλες τις διατάξεις του drone είναι η 2.46 GHz.



Εικόνα 4.31 - Απόκριση του drone Quantum Nova Pro στην έκθεση του σε Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό στη συχνότητα 2,46 GHz

η. Γενικότερα, οι συχνότητες 2,45 έως 2,48 GHz πλήττον ευχερέστερα το MEA ανεξαρτήτως διάταξης. Σε αυτές τις συχνότητες δεν παρατηρήθηκε παρεμβολή στη διάταξη BOTTOM 1 στις συχνότητες εκπομπής 2,45 και 2,47 GHz και SIDE 2 στις συχνότητες εκπομπής 2,45 και 2,48 GHz.

θ. Εκτιμάται ότι οι παρατηρήσεις της παρούσας παραγράφου που σχετίζονται με τη ζώνη συχνοτήτων 2,27 έως 2,5 GHz [(στ), (ζ) και (η)] σχετίζονται άμεσα με την παρεμβολή του καναλιού επικοινωνίας- χειρισμού του drone.

Συγκεντρωτικός πίνακας με τις ενδιαφέρουσες συχνότητες, σε πρωτογενές στάδιο, όπου προκύπτουν παρεμβολές σε πολλαπλές διατάξεις, είναι ο παρακάτω:

d =2,2 m, PW=50 μ s ,PRF=1KHz , DC=5%						
P =-1 dbm			P =-6 dbm		P =-1 dbm	P =-6 dbm
f (GHz)	HEAD 1	HEAD 2	BOTTOM 1	BOTTOM 2	SIDE 1	SIDE 2
1,57	X	X	✓	✓	X	X
1,6	X	✓	X	X	X	✓
1,77	✓	✓	X	X	✓	✓
1,83	X	✓	X	✓	X	X
1,84	✓	✓	X	X	X	X
1,85	✓	✓	X	X	X	X
1,86	✓	✓	X	X	✓	✓
1,9	✓	X	X	✓	X	X
P =-1 dbm						
2,02	✓	X	✓	X	X	X
2,04	✓	X	X	X	X	✓
2,06	X	X	✓	X	X	✓
2,29	X	✓	✓	✓	X	✓
2,3	X	✓	X	X	X	✓
2,34	✓	✓	X	✓	X	X
2,35	✓	✓	X	✓	X	✓
2,36	✓	X	X	✓	X	✓
2,37	✓	X	X	✓	X	✓
2,39	X	X	X	✓	X	✓
2,4	X	✓	X	✓	✓	✓
2,41	✓	✓	X	✓	X	✓
2,42	X	X	X	✓	✓	✓
2,43	X	X	X	✓	X	✓
2,44	✓	✓	X	✓	X	X
2,45	✓	✓	X	✓	✓	X
2,46	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2,47	✓	✓	X	✓	✓	✓
2,48	✓	✓	✓	✓	✓	X
2,49	✓	✓	X	✓	X	X
2,5	✓	✓	X	✓	X	✓

Πίνακας4.10 – Καταγραφή Συχνοτήτων που προκαλούν παρεμβολή και ευάλωτες διατάξεις

4.5 Μαθηματικός Έλεγχος Βέλτιστων Συχνοτήτων

Για την εύρεση των βέλτιστων συχνοτήτων στο εύρος 1,5 έως 2,5 GHz απαιτείται η τυποποίηση κατάλληλης μαθηματικής σχέσης για την επιλογή τους, με βάση τις καταγραφές του προηγούμενου σταδίου. Οι παράμετροι που καταγράφησαν αφορούν στη τιμή του πεδίου και στο χρόνο επίτευξης πρόκλησης παρεμβολής. Επομένως, είναι αναγκαίο οι παραπάνω παράμετροι να ενσωματωθούν σε μία μαθηματική σχέση, η οποία θα επιτυγχάνει τη δυνατότητα άμεσης πρόκλησης παρεμβολής με την έκθεση του drone στη μικρότερη τιμή πεδίου. Επιπρόσθετα, σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση μιας συχνότητας είναι η ικανότητα να προκαλέσει παρεμβολή σε όσον το

δυνατόν περισσότερες διατάξεις, εφόσον η πειραματική διαδικασία επιχειρεί να προσομοιάσει πραγματικό σενάριο πρόκλησης σκόπιμης παρεμβολής.

Εξάλλου η εισαγωγή κατάλληλου συντελεστή εξέτασης της δυνατότητας πρόκλησης παρεμβολής σε πολλαπλές διατάξεις εξασφαλίζει την αποφυγή εσφαλμένης αξιολόγησης που ενδεχομένως να προκύψει στην περίπτωση όπου θα συμβεί μια ταχεία παρεμβολή με πολύ μικρό πεδίο σε μικρό αριθμό διατάξεων συγκριτικά με το ενδεχόμενο πρόκλησης αυτών σε πολλαπλές διατάξεις σε μεγαλύτερο χρόνο.

Συμπερασματικά, η μαθηματική διατύπωση για την επιλογή των κατάλληλων συχνοτήτων θα υλοποιηθεί ως το άθροισμα των βαρών για κάθε διάταξη, σύμφωνα με τον τύπο όπως αποτυπώθηκε στη σελίδα 69, δηλαδή $w = \frac{1}{tx(RMSvalue)}$, πολλαπλασιασμένο με το κλάσμα του αριθμού των διατάξεων n στις οποίες προέκυψε παρεμβολή προς τον αριθμό των συνολικών διατάξεων ($N=6$).

$$\text{Δηλαδή, } W_{\text{tot}} = (w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6) \times \frac{v}{6}$$

όπου W_{tot} είναι το άθροισμα των επιμέρους βαρών

και $A = W_{\text{tot}} \times \frac{v}{6}$, όπου A είναι ο δείκτης αξιολόγησης μίας συχνότητας.

Επιπρόσθετα, λόγω της μειωμένης ισχύος εκπομπής στη ζώνη 1,5 έως 2 GHz για τις τρεις εκ των έξι διατάξεων, θα εξεταστούν ανεξάρτητα δύο υποζώνες δηλαδή από 1,5 έως 2 GHz και από 2 έως 2,5 GHz και θα επιλεγθεί η καταλληλότερη στην καθεμία από αυτές.

Με βάση αυτό την ανωτέρω μαθηματική διατύπωση, λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα (περιλαμβάνονται μόνο οι συχνότητες όπου επιβεβαιώθηκε παρεμβολή έστω σε μία διάταξη):

f (GHz)	HEAD1 w1	HEAD2 w2	BOTTOM 1 w3	BOTTOM 2 w4	SIDE 1 w5	SIDE 2 w6	W _{tot}	A
1,56	0	0	14,9253731	0	0	0	14,9254	2,48756
1,57	0	0,8547	24,3902439	0	0	0	25,2449	8,41498
1,6	0	0,6689	0	0	0	16,129	16,7979	5,59931
1,61	0	0	0	0	0	17,8571	17,8571	2,97619
1,62	0	0,84388	0	0	0	0	0,84388	0,14065
1,65	0	0	14,084507	0	0	0	14,0845	2,34742
1,77	0	1,62602	0	0	8,19672	20,4082	30,2309	15,1155
1,82	2,89017	0	0	0	0	0	2,89017	0,4817
1,83	0	0,72254	0	11,627907	0	0	12,3505	4,11682
1,84	0,56497	2,97619	0	0	0	0	3,54116	1,18039
1,85	1,43678	1,38889	0	0	0	0	2,82567	0,94189
1,86	1,68919	1,5873	0	0	14,0845	33,3333	50,6943	33,7962
1,87	0	1,22699	0	0	0	0	1,22699	0,2045
1,89	0,56818	0	0	0	0	0	0,56818	0,0947
1,9	1,51515	0	0	25	0	0	26,5152	8,83838
1,92	0	0	0	0	0	27,7778	27,7778	4,62963
1,93	0,94697	0	0	0	0	0	0,94697	0,15783
1,94	0,32446	0	0	0	0	0	0,32446	0,05408
1,96	0	0	30,3030303	0	0	0	30,303	5,05051
1,97	0	0	35,7142857	0	0	0	35,7143	5,95238
1,98	0	0	45,4545455	0	0	0	45,4545	7,57576

Πίνακας 4.11 - Υπολογισμός Δείκτη Αξιολόγησης (A) ανά Συχνότητα στο εύρος 1,5 έως 2 GHz

f (GHz)	HEAD1	HEAD2	BOTTOM 1	BOTTOM 2	SIDE 1	SIDE 2	W _{tot}	A
	w1	w2	w3	w4	w5	w6		
2	0	0	2,1008403	0	0	0	2,10084	0,35014
2,01	0	0	4,2194093	0	0	0	4,21941	0,70323
2,02	1,72712	0	1,3333333	0	0	0	3,06045	1,02015
2,03	0	0	0	0	0	1,90476	1,90476	0,31746
2,04	1,75439	0	0	0	0	1,97239	3,72677	1,24226
2,06	0	0	1,9920319	0	0	1,5361	3,52813	1,17604
2,09	2,50627	0	0	0	0	0	2,50627	0,41771
2,1	2,15054	0	0	0	0	0	2,15054	0,35842
2,11	0	0	2,7027027	0	0	0	2,7027	0,45045
2,12	0	0	5,7142857	0	0	0	5,71429	0,95238
2,14	0	0	0	0	0	2,43309	2,43309	0,40552
2,2	0	0	0	0	0	3,3557	3,3557	0,55928
2,28	0	0	0	0	0	2,13675	2,13675	0,35613
2,29	0	1,28205	0,4826255	0,82576383	0	1,22549	3,81593	2,54395
2,3	0	1,94932	0	0	0	1,92678	3,8761	1,29203
2,32	0	0	0	0	0	1,75439	1,75439	0,2924
2,33	1,36054	0	0	0	0	0	1,36054	0,22676
2,34	1,20337	1,28205	0	1,51515152	0	0	4,00057	2,00029
2,35	1,17371	1,18624	0	1,36054422	0	1,48148	5,20197	3,46798
2,36	0,9901	0	0	1,57977883	0	1,88324	4,45312	2,2656
2,37	1,91571	0	0	0,81632653	0	2,43309	5,16513	2,58256
2,38	0	0	0	0	0	2,07039	2,07039	0,34507
2,39	0	0	0	0,97847358	0	1,86567	2,84415	0,94805
2,4	0	1,21212	0	3,62318841	2,92398	2,34742	10,1067	6,7378
2,41	2,5641	1,85185	0	4,20168067	0	2,03252	10,6502	7,1001
2,42	2,17391	0	0	2,41545894	1,04822	2,5	8,13759	5,42506
2,43	2,21239	0	0	3,40136054	0	2,12766	7,74141	3,8707
2,44	2,31481	1,49254	0	3,64963504	0	0	7,45699	3,72849
2,45	2,17391	2,66667	0	0,96525097	1,37363	0	7,17946	4,7863
2,46	1,8797	2,48756	5,5248619	2,4691358	1,82149	1,83824	16,021	16,021
2,47	2,01613	2,97619	0	2,41545894	2,50627	3,23625	13,1503	10,9586
2,48	1,9084	3,08642	3,0674847	3,4965035	2,04499	0	13,6038	11,3365
2,49	2,25225	2,11864	0	3,52112676	0	0	7,89202	3,94601
2,5	2,35849	2,11864	0	3,78787879	0	3,58423	11,8492	7,8995

Πίνακας 4.12 - Υπολογισμός Δείκτη Αξιολόγησης (A) ανά Συχνότητα στο εύρος 2 έως 2,5 GHz

Αξιοσημείωτο είναι ότι η μαθηματική διατύπωση της αξιολόγησης των συχνοτήτων, μέσω κατάλληλου δείκτη (A), επιβεβαιώνει την εκτίμηση ότι καταλληλότερες συχνότητες είναι εκείνες που ενισχύουν την εκδήλωση παρεμβολής σε πολλαπλές διατάξεις, χωρίς παράλληλα να υποτιμάτε η επίδραση του πεδίου και ο χρόνος εκδήλωσης της παρεμβολής.

Συμπερασματικά από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι βέλτιστες συχνότητες για την πρόκληση παρεμβολής στο drone Quannum Nova Pro είναι οι **1,86 GHz** στο πρώτο μισό (1,5 έως 2 GHz) της ζώνης συχνοτήτων ενδιαφέροντος και η **2,46 GHz** στη δεύτερη υποζώνη (2 έως 2,5 GHz).

4.6 Έλεγχος Παραμέτρων Διαμόρφωσης Παλμού

Στη τελευταία φάση του πειράματος και αφού έχει ολοκληρωθεί η επιλογή των βέλτιστων συχνοτήτων ενδιαφέροντος με βάση τα κριτήρια που τέθηκαν, ακολουθεί η πραγματοποίηση μετρήσεων με παραμετροποίηση της διαμόρφωσης της εκπεμπόμενης κυματομορφής. Η σχετική παραμετροποίηση αφορά σε τιμές της συχνότητας παραμετροποίησης παλμού (PRF) και στο πλάτος του παλμού (pulse width), τροποποιώντας ουσιαστικά το duty cycle εντός των προδιαγραφών του ενισχυτή. Με αυτό τον τρόπο επιχειρείτε να διερευνηθεί η πιθανότητα εύρεσης κάποιας κρίσιμης παραμέτρου του παλμού, ο έλεγχος της οποίας θα παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου-βελτίωσης της διαδικασίας πρόκλησης παρεμβολής.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων απαιτήθηκε η παραμετροποίηση του παλμού, σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 4.3 και ο έλεγχος των βέλτιστων συχνοτήτων σε όλες τις διατάξεις που ελέγχθηκαν στα προηγούμενα στάδια. Αναλυτικά, τα αποτελέσματα των μετρήσεων ανά συχνότητα και διάταξη έχουν όπως παρακάτω:

ΔΙΑΤΑΞΗ HEAD 1					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
1,86	50	1	5	2	308
	50	0,200	1	3	76
	50	0,020	0,1	-	15,3
	1	50	5	1	311
	1	10	1	1	101
	1	1	0,1	-	19
	1	0,100	0,01	-	6
	0,5	50	2,5	2	294
	0,5	20	0,5	-	161
	0,5	2	0,05	-	21
	0,5	1	0,05	-	18,5
	0,5	0,500	0,025	-	9,8

Πίνακας 4.13 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη HEAD 1 και σε συχνότητα 1,86 GHz

➤ Στη διάταξη HEAD 1 και για συχνότητα 1,86 GHz, πέραν της αρχικής διαμόρφωσης όπου έχουμε άμεση εκδήλωση παρεμβολής, διαφαίνεται ότι η παραμετροποίηση του παλμού με διατήρηση του duty cycle σε υψηλή τιμή (1 έως 5%) αποδίδει στη δημιουργία παρεμβολής, ανεξαρτήτως της επιμέρους μεταβολής των τιμών των PRF και διάρκειας παλμού.

ΔΙΑΤΑΞΗ HEAD 2					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
1,86	50	1	5	1	287
	50	0,200	1	1	108
	50	0,020	0,1	-	18
	1	50	5	1	360
	1	10	1	2	152
	1	1	0,1	-	21
	1	0,100	0,01	-	6
	0,5	50	2,5	2	286
	0,5	20	0,5	-	145
	0,5	2	0,05	-	17,6
	0,5	1	0,05	-	12
	0,5	0,500	0,025	-	8,6

Πίνακας 4.14 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη HEAD 2 και σε συχνότητα 1,86 GHz

➤ Στη διάταξη HEAD 2 και για συχνότητα 1,86 GHz, διαφαίνεται ότι η υψηλή τιμή του duty cycle είναι κρίσιμη για την πρόκληση παρεμβολής αλλά σε συνδυασμό με υψηλή τιμή του PRF.

ΔΙΑΤΑΞΗ BOTTOM 1					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
1,86	50	1	5	1	202
	50	0,200	1	-	63
	50	0,020	0,1	-	14
	1	50	5	-	252
	1	10	1	-	81
	1	1	0,1	-	15
	1	0,100	0,01	-	4,5
	0,5	50	2,5	-	174
	0,5	20	0,5	-	83
	0,5	2	0,05	-	15
	0,5	1	0,05	-	10
0,5	0,500	0,025	-	7,2	

Πίνακας 4.15 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη BOTTOM 1 και σε συχνότητα 1,86 GHz

➤ Στη διάταξη BOTTOM 1 και για συχνότητα 1,86 GHz, διαφαίνεται ότι απαιτείται ο συνδυασμός της υψηλής τιμής του duty cycle και της μεγάλης διάρκειας παλμού για την πρόκληση παρεμβολής. Επισημαίνεται ότι μόνο με την αρχική παραμετροποίηση προκλήθηκε παρεμβολή στη λειτουργία του drone.

ΔΙΑΤΑΞΗ BOTTOM 2					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
1,86	50	1	5	2	207
	50	0,200	1	-	68
	50	0,020	0,1	-	14
	1	50	5	-	247
	1	10	1	-	87
	1	1	0,1	-	15
	1	0,100	0,01	-	4,6
	0,5	50	2,5	-	171
	0,5	20	0,5	-	86
	0,5	2	0,05	-	15
	0,5	1	0,05	-	10
0,5	0,500	0,025	-	7,2	

Πίνακας 4.16 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη BOTTOM 2 και σε συχνότητα 1,86 GHz

➤ Στη διάταξη BOTTOM 2 και για συχνότητα 1,86 GHz, διαφαίνεται ότι απαιτείται ο συνδυασμός της υψηλής τιμής του duty cycle και της μεγάλης διάρκειας

παλμού για την πρόκληση παρεμβολής. Επισημαίνεται ότι μόνο με την αρχική παραμετροποίηση προκλήθηκε παρεμβολή στη λειτουργία του drone.

ΔΙΑΤΑΞΗ SIDE 1					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
1,86	50	1	5	2	183
	50	0,200	1	-	63
	50	0,020	0,1	-	14
	1	50	5	-	239
	1	10	1	-	80
	1	1	0,1	-	15
	1	0,100	0,01	-	4,4
	0,5	50	2,5	-	166
	0,5	20	0,5	-	81
	0,5	2	0,05	-	15
	0,5	1	0,05	-	10
	0,5	0,500	0,025	-	7,2

Πίνακας 4.17 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη SIDE 1 και σε συχνότητα 1,86 GHz

➤ Στη διάταξη SIDE 1 και για συχνότητα 1,86 GHz, διαφαίνεται ότι απαιτείται ο συνδυασμός της υψηλής τιμής του duty cycle και της μεγάλης διάρκειας παλμού για την πρόκληση παρεμβολής. Επισημαίνεται ότι μόνο με την αρχική παραμετροποίηση προκλήθηκε παρεμβολή στη λειτουργία του drone.

ΔΙΑΤΑΞΗ SIDE 2					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
1,86	50	1	5	2	191
	50	0,200	1	-	57
	50	0,020	0,1	-	14
	1	50	5	-	240
	1	10	1	-	78
	1	1	0,1	-	15
	1	0,100	0,01	-	4,7
	0,5	50	2,5	-	166
	0,5	20	0,5	-	80
	0,5	2	0,05	-	15
	0,5	1	0,05	-	10
	0,5	0,500	0,025	-	7,2

Πίνακας 4.18 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη SIDE 2 και σε συχνότητα 1,86 GHz

➤ Στη διάταξη SIDE 2 και για συχνότητα 1,86 GHz, διαφαίνεται ότι απαιτείται ο συνδυασμός της υψηλής τιμής του duty cycle και της μεγάλης διάρκειας παλμού για

την πρόκληση παρεμβολής. Επισημαίνεται ότι μόνο με την αρχική παραμετροποίηση προκλήθηκε παρεμβολή στη λειτουργία του drone.

ΔΙΑΤΑΞΗ HEAD 1					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
2,46	50	1	5	2	194
	50	0,200	1	-	42
	50	0,020	0,1	-	11
	1	50	5	1	180
	1	10	1	6	42
	1	1	0,1	2	12
	1	0,100	0,01	4	3,5
	0,5	50	2,5	1	163
	0,5	20	0,5	1	68
	0,5	2	0,05	1	12,6
	0,5	1	0,05	4	8
	0,5	0,500	0,025	4	6,4

Πίνακας 4.19 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη HEAD 1 και σε συχνότητα 2,46 GHz

➤ Στη διάταξη HEAD 1 και για συχνότητα 2,46 GHz, εκδηλώθηκε παρεμβολή ανεξαρτήτως παραμετροποίησης του σήματος παλμού στην πλειοψηφία των δοκιμών. Επομένως, στη διάταξη αυτή παρατηρείται μειωμένη ατρωσία σε κάθε είδους ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

ΔΙΑΤΑΞΗ HEAD 2					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
2,46	50	1	5	2	201
	50	0,200	1	-	65
	50	0,020	0,1	-	13
	1	50	5	-	232
	1	10	1	-	75
	1	1	0,1	-	13
	1	0,100	0,01	-	6,6
	0,5	50	2,5	-	191
	0,5	20	0,5	-	92
	0,5	2	0,05	-	14
	0,5	1	0,05	-	10
	0,5	0,500	0,025	-	6,8

Πίνακας 4.20 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη HEAD 2 και σε συχνότητα 2,46 GHz

➤ Στη διάταξη HEAD 2 και για συχνότητα 2,46 GHz, εκδηλώθηκε παρεμβολή μόνο στην αρχική διαμόρφωση και επομένως η διάρκεια του παλμού φαίνεται να αποτελεί την κρίσιμη παράμετρο για την εκδήλωση της παρεμβολής.

ΔΙΑΤΑΞΗ BOTTOM 1					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
2,46	50	1	5	6	223
	50	0,200	1	-	79
	50	0,020	0,1	-	14
	1	50	5	-	256
	1	10	1	-	91
	1	1	0,1	-	14
	1	0,100	0,01	-	4,2
	0,5	50	2,5	2	192
	0,5	20	0,5	-	96
	0,5	2	0,05	-	14
	0,5	1	0,05	-	9,8
0,5	0,500	0,025	-	6,9	

Πίνακας 4.21 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη BOTTOM 1 και σε συχνότητα 2,46 GHz

➤ Στη διάταξη BOTTOM 1 και για συχνότητα 2,46 GHz, εκδηλώθηκε παρεμβολή σε παραμετροποιήσεις με υψηλό duty cycle, χωρίς όμως να είναι δυνατή η σύγκριση των επιμέρους παραμέτρων αφού οι δυο επιτυχείς εγγραφές του πίνακα διαφέρουν σημαντικά ως προς τις επιμέρους παραμέτρους.

ΔΙΑΤΑΞΗ BOTTOM 2					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
2,46	50	1	5	2	187
	50	0,200	1	-	56
	50	0,020	0,1	-	13
	1	50	5	-	217
	1	10	1	-	63
	1	1	0,1	-	13
	1	0,100	0,01	-	4
	0,5	50	2,5	-	173
	0,5	20	0,5	-	75
	0,5	2	0,05	-	13,7
	0,5	1	0,05	-	9,5
0,5	0,500	0,025	-	6,7	

Πίνακας 4.22 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη BOTTOM 2 και σε συχνότητα 2,46 GHz

➤ Στη διάταξη BOTTOM 2 και για συχνότητα 2,46 GHz, εκδηλώθηκε παρεμβολή μόνο στην αρχική διαμόρφωση και επομένως η διάρκεια του παλμού φαίνεται να αποτελεί την κρίσιμη παράμετρο για την εκδήλωση της παρεμβολής.

ΔΙΑΤΑΞΗ SIDE 1					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
2,46	50	1	5	2	137
	50	0,200	1	-	43
	50	0,020	0,1	-	11
	1	50	5	-	158
	1	10	1	-	47
	1	1	0,1	-	10,6
	1	0,100	0,01	-	3,3
	0,5	50	2,5	-	124
	0,5	20	0,5	-	56
	0,5	2	0,05	-	11,4
	0,5	1	0,05	-	8
0,5	0,500	0,025	-	5,7	

Πίνακας 4.23 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη SIDE 1 και σε συχνότητα 2,46 GHz

➤ Στη διάταξη SIDE 1 και για συχνότητα 2,46 GHz, εκδηλώθηκε παρεμβολή μόνο στην αρχική διαμόρφωση και επομένως η διάρκεια του παλμού φαίνεται να αποτελεί την κρίσιμη παράμετρο για την εκδήλωση της παρεμβολής.

ΔΙΑΤΑΞΗ SIDE 2					
Συχνότητα (GHz)	Pulse Width (μs)	PRF (KHz)	Duty Cycle (%)	Χρόνος (sec)	Πεδίο (V/m)
2,46	50	1	5	3	225
	50	0,200	1	-	73
	50	0,020	0,1	-	14
	1	50	5	-	214
	1	10	1	-	51
	1	1	0,1	-	11
	1	0,100	0,01	-	3,3
	0,5	50	2,5	-	131
	0,5	20	0,5	-	60
	0,5	2	0,05	-	11
	0,5	1	0,05	-	8
0,5	0,500	0,025	-	5,6	

Πίνακας 4.24 - Έλεγχος Πρόκλησης Παρεμβολής με αλλαγή παραμετροποίησης της κυματομορφής σε διάταξη SIDE 2 και σε συχνότητα 2,46 GHz

➤ Στη διάταξη SIDE 2 και για συχνότητα 2,46 GHz, εκδηλώθηκε παρεμβολή μόνο στην αρχική διαμόρφωση και επομένως η διάρκεια του παλμού φαίνεται να αποτελεί την κρίσιμη παράμετρο για την εκδήλωση της παρεμβολής.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Περαιτέρω Προοπτικές

5.1 Τελικά Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία αποτελούν προϊόντα της πειραματικής διαδικασίας που διεξήχθη σε ελεγχόμενο περιβάλλον εντός ανηχοϊκού θαλάμου με την εκπομπή κυματομορφών παλμικής διαμόρφωσης και υψηλής ισχύος. Η ισχύς εκπομπής καθορίστηκε από το διαθέσιμο εξοπλισμό του εργαστηρίου και οι δοκιμές εκτελέστηκαν με ένα MEA (Quantum Nova Pro), λόγω βλαβών που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης εκτελεσθέντων πειραμάτων σε παράλληλη χρονική περίοδο. Παρόλα αυτά, ο σκοπός της παρούσας εργασίας επιτεύχθηκε καθώς προέκυψαν συχνότητες, όπου κατεγράφη ισχυρή παρεμβολή της λειτουργίας του drone σε πολλαπλές διατάξεις και σε ελάχιστο χρόνο με χαμηλές τιμές πεδίου, καθορίστηκε μαθηματική διατύπωση για την αξιολόγηση των συχνοτήτων ενώ δοκιμάστηκε η τροποποίηση των επιμέρους παραμέτρων της διαμόρφωσης του παλμού στις κρίσιμες συχνότητες με σκοπό τον πειραματικό εντοπισμό της βαρύτητας της κάθε παραμέτρου στην πρόκληση της παρεμβολής.

Με γνώμονα τα εξαχθέντα πειραματικά δεδομένα εκτιμάται ότι προκύπτουν συμπεράσματα ως ακολούθως:

α. Η διάταξη του drone κατά την εκπομπή της μικροκυματικής ακτινοβολίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την πρόκληση παρεμβολής. Το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός της εκδήλωσης παρεμβολών σε μεγάλο αριθμό συχνοτήτων για συγκεκριμένες διατάξεις του drone ενώ σε συγκεκριμένη διάταξη (SIDE 1) ο αντίστοιχος αριθμός συχνοτήτων είναι ιδιαίτερα περιορισμένος. Εξάλλου η εκδήλωση παρεμβολής σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων κατά τη σάρωση του αρχικού εύρους συχνοτήτων (1,5 έως 1,7 GHz) και σε συγκεκριμένες διατάξεις (BOTTOM 1 και 2) αποδεικνύει την αυξημένη ευαισθησία του drone σε αυτές (διατάξεις), γεγονός που κατέστησε αναγκαία τη συνέχιση των δοκιμών στο πρώτο μισό του εύρους συχνοτήτων ενδιαφέροντος (1,5 έως 2 GHz) με χαμηλότερη ισχύ εκπομπής.

β. Η ζώνη συχνοτήτων 2 έως 2,5 GHz εμφανίζεται ως πιο αποδοτική στην πρόκληση παρεμβολής στις διατάξεις HEAD 1 ΚΑΙ 2, καθώς επιτυγχάνει την πρόκληση παρεμβολής σε ένα μεγάλο αριθμό συχνοτήτων συγκριτικά με την αντίστοιχου εύρους ζώνη 1,5 έως 2 GHz. Πράγματι, στον Πίνακα 4.10 είναι εμφανές ότι για τα ίδια επίπεδα ισχύος του σήματος εκπομπής κατεγράφη ένας μεγάλος αριθμός συχνοτήτων στη ζώνη 2 έως 2,5 GHz και μάλιστα στην υποζώνη 2,4 έως 2,5 GHz με σχεδόν κοινά αποτελέσματα για τις δύο συγκεκριμένες διατάξεις.

γ. Η διάταξη BOTTOM 1 παρουσιάζει υψηλότερο επίπεδο ατρωσίας σε σχέση με τη διάταξη BOTTOM 2. Η παρατήρηση αυτή σχετίζεται με το γεγονός ότι η περιστροφή του drone κατά 90° προκειμένου να επιτευχθεί η αλλαγή διάταξης επιφέρει την αλλαγή πολώσεως του ηλεκτρικού πεδίου της ακτινοβολίας ως προς τις εσωτερικές

ηλεκτρονικές διατάξεις του drone. Επομένως, εκτιμάται ότι η πόλωση του πεδίου επιτελεί καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση της παρεμβολής.

δ. Η διάταξη HEAD 1 εμφανίζει αυξημένη ευαισθησία στην εκδήλωση παρεμβολής. Το ανωτέρω συμπέρασμα έχει ζωτικής σημασία διότι η εκδήλωση κακόβουλης ενέργειας διευκολύνεται και πιθανόν να προϋποθέτει τη λήψη αυτής της γωνίας ως προς τον στόχο. Ανεξαρτήτως φορτίου του εναέριου μέσου, η διάταξη αυτή προσφέρει τη δυνατότητα η εκδήλωση κακόβουλης ενέργειας (παρατήρηση/στόχευση) να συμπίπτει με την κατεύθυνση κίνησης του ΜΕΑ. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών σε αυτή τη διάταξη, το drone εκδήλωσε πολλαπλές και διαφορετικής φύσεως παρεμβολές σε 31 συνολικά συχνότητες, περισσότερες από κάθε άλλη διάταξη.

ε. Η κατακόρυφη πόλωση του πεδίου είναι αποτελεσματικότερη στην πρόκληση παρεμβολής σε σχέση με την οριζόντια. Η ένταξη των επιμέρους διατάξεων σε κατηγορίες ως προς την πόλωσή τους καταδεικνύουν ότι το επίπεδο ατρωσίας του drone στην οριζόντια πόλωση είναι υψηλότερο, καθόσον η πρόκληση παρεμβολών στις διατάξεις SIDE 1 και SIDE 2 εμφανίζουν χαμηλή συχνότητα εμφάνισης (Πίνακας 4.10).

στ. Η παρεμβολή του drone επιφέρει δραστική διακοπή της λειτουργίας του. Στην πλειοψηφία των εκδηλωθέντων παρεμβολών κατεγράφη οριστική διακοπή λειτουργίας του drone, η επαναλειτουργία του οποίου απαιτούσε την αντίστοιχη επανεκκίνηση του ίδιου όσο και της συσκευής χειρισμού του. Ουσιαστικά, η επανεκκίνηση του Quantum Nova Pro σε πραγματικές συνθήκες είναι αδύνατη, καθώς απαιτεί την αφαίρεση και επανασύνδεση της μπαταρίας του, οπότε η πτώση θεωρείται μη αποτρέψιμη.

ζ. Οι συχνότητες 1,86 και 2,46 GHz υπερισχύουν στην πρόκληση παρεμβολής στο drone, καθώς επιτυγχάνουν διακοπή της λειτουργίας του σε ελάχιστο χρόνο και σε πολλαπλές διατάξεις. Οι παραπάνω συχνότητες προκαλούν παρεμβολή σε όλες τις διατάξεις που ελέγχθηκαν, πλην των περιπτώσεων των διατάξεων BOTTOM 1 και 2 στη συχνότητα 1,86 GHz για την οποία το επίπεδο ισχύος της εκπομπής υποδιπλασιάστηκε λόγω πρόκλησης διαδοχικών παρεμβολών κατά την έναρξη του πειράματος. Επιπρόσθετα, για τις συχνότητες αυτές κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η επιτυχής πρόκληση παρεμβολής σε όλες τις διατάξεις παρέχει την ευελιξία, σε ένα σενάριο πραγματικών συνθηκών, να αντιμετωπιστεί με την απαραίτητη ευχέρεια και ευκολία σκόπευσης ενός επίγειου συστήματος, ανεξαρτήτως οριζόντιας (azimuth) και κατακόρυφης (tilt) γωνίας. Ταυτόχρονα, η περιορισμένη πιθανότητα επίτευξης της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας που επετεύχθη σε εργαστηριακές συνθήκες πιθανόν να ισοσταθμίζεται με την παραγωγή αθροιστικού αποτελέσματος σε μία ενδιάμεση διάταξη, καθόσον προκαλούνται αποτελέσματα στο σύνολο των ελεγχθέντων διατάξεων.

η. Η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, απομονωμένα και ανεξάρτητα, δε φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση παρεμβολής. Οι μεγάλες αποκλίσεις της τιμής του πεδίου όπου εκδηλώθηκε παρεμβολή, αποδεικνύουν ότι αυτή δε συνιστά τη δραστική παράμετρο για την επίτευξή της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.4, όπου οι τιμές του πεδίου που επιτυγχάνεται παρεμβολή κυμαίνονται από 108 έως 284 V/m.

θ. **Η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, απομονωμένα και ανεξάρτητα, δε φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο εκδήλωσης της παρεμβολής.** Η ταχύτητα απόκρισης του drone με την εκδήλωση της διακοπής λειτουργίας του δε σχετίζεται με το μέγεθος του πεδίου που προσπίπτει σε αυτό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.6 και 4.7, όπου στις περισσότερες καταγεγραμμένες περιπτώσεις συχνοτήτων όπου εκδηλώνεται παρεμβολή, χαμηλότερα πεδία προκαλούν ταχύτερη διακοπή λειτουργίας.

ι. **Η αύξηση της συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της RMS τιμής του πεδίου.** Με εξαίρεση τη ζώνη συχνοτήτων από 2,3 έως 2,5 GHz, στο σύνολο των συνολικά έξι μετρήσεων που έγιναν για την αξιολόγηση επίδρασης στις έξι διαφορετικές διατάξεις, οι τιμές του πεδίου φθίνουν με την αύξηση της συχνότητας. (Εικόνες 4.15, 4.17, 4.19, 4.21 και 4.25).

ια. **Ο τύπος παρεμβολής, στις περιπτώσεις όπου δεν προκύπτει οριστική διακοπή λειτουργίας (Πίνακες 4.4 και 4.5), εκτιμάται ότι οφείλεται σε φαινόμενο μη κρίσιμων παρεμβολών, καθόσον η παύση της εκπομπής προκαλεί δευτερεύοντες συνέπειες όπως διακοπή ή επαναφορά λειτουργίας.** Σε ένα μικρό αριθμό συχνοτήτων σε διατάξεις κατακόρυφης πόλωσης του πεδίου (HEAD 1 και 2) παρατηρήθηκε αυξομείωση της λειτουργίας των κινητήρων δημιουργώντας απευθείας σύζευξη με το drone. Μετά την παρέλευση του χρονικού κατωφλίου ακτινοβολίας (10 δευτερόλεπτα), η περιστροφή των κινητήρων επανερχόταν σε κανονικά επίπεδα είτε προέκυψε οριστική διακοπή λειτουργίας. Επομένως, σε αυτές τις συχνότητες δημιουργήθηκαν συνθήκες απόλυτου ελέγχου της λειτουργίας του drone.

ιβ. **Το υψηλό duty cycle είναι αναγκαίο για την εκδήλωση παρεμβολής.** Οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για τη διερεύνηση της κρισιμότητας των επιμέρους παραμέτρων του παλμού καταδεικνύουν την ανάγκη ύπαρξης υψηλού ποσοστού κύκλου εργασίας, καθόσον ανεξαρτήτως συχνότητας, στις διατάξεις BOTTOM 1 και 2, καθώς και στις SIDE 1 και 2 εκδηλώθηκε παρεμβολή μόνο στη μέγιστη επιτρεπτή, από τις τεχνικές προδιαγραφές, τιμή του duty cycle.

ιγ. **Το υψηλό πλάτος παλμού (pulse width) είναι κρίσιμος παράγοντας για την εκδήλωση παρεμβολής.** Άμεσα συνυφασμένο με το προηγούμενο συμπέρασμα είναι η ύπαρξη μεγάλης διάρκειας παλμού για την επίτευξη παρεμβολής. Αυτό παρατηρείται ευκρινώς για τις ίδιες διατάξεις [όπως σχόλιο (ι)], όπου ενώ στην αρχική παραμετροποίηση του παλμού (PRF: 1 KHz, PW: 50 μs, duty cycle: 5%) προέκυψε παρεμβολή για όλες τις διατάξεις και στις δύο συχνότητες, η διατήρηση του duty cycle στο ίδιο ποσοστό με εναλλαγή των τιμών των επιμέρους παραμέτρων (PRF: 50 KHz, PW: 1 μs, duty cycle: 5%), δεν απέδωσε ουδεμία παρεμβολή.

ιδ. **Οι διατάξεις HEAD 1 και 2 του drone εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία και μειωμένη ατρωσία στην εκδήλωση παρεμβολής, όταν εκτεθούν στη συχνότητα 1,86 GHz ανεξαρτήτως παραμετροποίησης του παλμού.** Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν με τροποποιημένες τις παραμέτρους του παλμού διαπιστώθηκε ότι σε αυτές τις δύο συγκεκριμένες διατάξεις, απαραίτητη προϋπόθεση για την πρόκληση της παρεμβολής είναι η επίτευξη ενός κατώτατου ορίου στην τιμή του duty cycle περίπου στο 1%. Οι επιμέρους παράμετροι που καθορίζουν την τιμή αυτή, δηλαδή το PRF και το Pulse Width, δε διαφαίνεται να

έχουν διαφορετικό βάρος στην επίτευξη παρεμβολής αρκεί το duty cycle να παραμένει άνω του προαναφερόμενου κατωφλίου. Αξίζει να αναφερθεί ότι η συνήθης προσέγγιση ενός στόχου από ένα κακόβουλο drone για την εκδήλωση ενέργειας, εκθέτει το drone σε ένα σύστημα εκπομπής H/M ακτινοβολίας με αυτή τη διάταξη, όπως έχει επισημανθεί στο σχόλιο (δ).

ιε. Η διάταξη HEAD 1 του drone εμφανίζεται ως εξαιρετικά ευάλωτη στην εκδήλωση παρεμβολής, όταν εκτεθεί στη συχνότητα 2,46 GHz ανεξαρτήτως παραμετροποίησης του παλμού. Η έκθεση του drone σε ακτινοβολία αυτής της συχνότητας ανεξαρτήτως των επιμέρους παραμέτρων του παλμού και με ελάχιστο duty cycle, ακόμα και σε 0,01 %, έδωσε διαδοχικές διακοπές λειτουργίας.

ιστ. Η παραπάνω διαπίστωση σε συνδυασμό τόσο με την ευρεία ζώνη δημιουργίας παρεμβολών γύρω από τη συγκεκριμένη συχνότητα όσο και η λειτουργία του καναλιού επικοινωνίας του Quatum Nova Pro σε 7 συχνότητες γύρω από τα 2,4 GHz διαμορφώνει την προσέγγιση ότι στην περίπτωση των 2,46 GHz, η διακοπή λειτουργίας του drone ενδέχεται να οφείλεται σε jamming. Λαμβάνοντας υπόψη όμως, ότι στην περίπτωση του jamming θα έπρεπε σε όλες τις διατάξεις του drone και τουλάχιστον στις περιπτώσεις όπου το πεδίο είναι ισχυρό να προκύπτει παρεμβολή (κάτι το οποίο δε συμβαίνει σε καμία διάταξη πλην της HEAD1), οπότε η άποψη αυτή φαίνεται να αποδομείται.

ιζ. Οι φυσικές διαστάσεις του drone Nova Pro ευνοούν τη δημιουργία έμμεσης σύζευξης (back-door coupling). Το μήκος των καλωδιώσεων για τη μετάδοση των εντολών από τη μονάδα κεντρικού επεξεργαστή στους κινητήρες πτήσης είναι σχετικά μεγάλο και σίγουρα ικανό να ευνοήσει τη δημιουργία σύζευξης στο εσωτερικό του drone. Η θωράκιση των καλωδίων και η μη συμπαγής θωράκιση του κυρίως σώματος του drone ενισχύουν αυτή την διαπίστωση. Εξάλλου ο εν λόγω τύπος drone έχει μεγάλο αριθμό ανοιγμάτων στην επιφάνειά του και αποδείχθηκε αρκετά ευάλωτο στις διατάξεις όπου αυτά προβάλλονται άμεσα στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία.

ιη. Οι συχνότητες 1.77 , 1.86 και 2.46 διαπιστώθηκαν ως πιο ευνοϊκές για τη δημιουργία παρεμβολής σε όλες τις διατάξεις του drone. Λαμβάνοντας υπόψη την καταγραφή της σελίδας 5 της [22] δημοσίευσης, όπου διαπιστώνεται ότι οι ίδιες συχνότητες, με να ελάχιστο offset της τάξης των 10 MHz (1,78 και 2,45 GHz), αποδίδουν τις μέγιστες τάσεις σύζευξης στην περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος, δημιουργώντας coupling σε μικροκύκλωμα ελέγχου των κινητήρων διαπιστώνεται ότι αυτή είναι η πιθανή αιτία καθολικής διακοπής της λειτουργίας του. Η άποψη αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι οι φυσικές διαστάσεις των δύο drone είναι παρόμοιες ενώ η ελάχιστη απόκλιση στις συχνότητες πιθανόν να οφείλεται σε μικροδιαφορές στις φυσικές διαστάσεις των πηγών της σύζευξης.

5.2 Περαιτέρω Προοπτικές και Μελλοντικές Εφαρμογές

Πέραν των αντικειμενικών σκοπών που είχαν τεθεί στη συγκεκριμένη εργασία, ο ευρύτερος και ίσως μεγαλύτερης αξίας στόχος της είναι η συνεισφορά της στο επίκαιρο πεδίο της αντιμετώπισης κακόβουλων ενεργειών με τη χρήση MEA και στην αποτελεσματική προστασία τους όταν ενεργούν καλόβουλα. Με γνώμονα τα ανωτέρω,

η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να συμβάλλει στην εύρεση των κρίσιμων παραμέτρων μίας αποδεκτής κυματομορφής για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των drone. Η πειραματική έρευνα της φυσικής αιτίας της πρόκλησης παρεμβολών στις επιλεγμένες από την εργασία συχνότητες θα δημιουργούσε τις συνθήκες για πλήρη αποκρυπτογράφηση των συνθηκών κάτω από τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί με απόλυτη επιτυχία η προσβολή του drone, ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.

Επιπρόσθετα, η διαπίστωση ότι στις τελικά επιλεχθείσες συχνότητες προκαλείται αποτελεσματική παρεμβολή του μικροκυκλώματος ελέγχου του drone, παρέχει προοπτική για περαιτέρω έρευνα των αποτελεσμάτων που θα επιφέρει η έκθεση του drone σε ισχυρότερο πεδίο σε αυτές τις συχνότητες. Σε αυτό πρέπει να συνυπολογιστεί και να εξεταστούν οι μέγιστες τάσεις σύζευξης. Η εισαγωγή κατάλληλου μήκους και διαμόρφωσης κυματοδηγών ισχυροποιεί δραματικά τις τιμές του πεδίου στο οποίο εκτίθενται το drone και αποτελεί σημαντικό βήμα για την εξέταση του σχετικού τύπου παρεμβολής. Εξάλλου η αλλαγή τάξης μεγεθών παραμετροποίησης του παλμού (duty cycle, pulse width, κ.ά.) με τη χρήση προηγμένων και ισχυρών συσκευών-διατάξεων παραγωγής και ενίσχυσης του παρέχει σημαντικές προοπτικές για τη διαμόρφωση κυματομορφών με ισχυρή δράση αντιμετώπισης των ΜΕΑ.

Ο έλεγχος της πρόκλησης παρεμβολής μέσω κατάλληλων κυματομορφών, αξιοποιώντας τις τελικά επιλεχθείσες συχνότητες όπως προέκυψαν σε αυτή την εργασία, σε drone παρόμοιων φυσικών και τεχνικών χαρακτηριστικών με σκοπό την επιβεβαίωση της απόδοσης αυτών των συχνοτήτων θα μπορούσε να δημιουργήσει συνθήκες παγιοποίησης τελικών συχνοτήτων για πρόκληση παρεμβολής ανεξαρτήτως τύπου drone. Επιπρόσθετα, η χρήση ΜΕΑ με δυνατότητα διαχείρισης και ελέγχου των δεδομένων της πτήσης μέσω προηγμένων και εύκολα προσπελάσιμων εφαρμογών θα παρείχε τη δυνατότητα διερεύνησης των αιτιών πρόκλησης των παρεμβολών και εξεύρεσης των τρωτών σημείων του συναρτήσει της συχνότητας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Τέλος, εξίσου χρήσιμη θα μπορούσε να αποδειχθεί η διερεύνηση της πρόκλησης παρεμβολής κατά την έκθεση του drone σε σήμα αναπηδούσης συχνότητας, με hopset στις συχνότητες όπου προέκυψε παρεμβολή στις διάφορες διατάξεις και σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Paul Cureton, Drone Futures UAS in Landscape and Urban Design, 2021, Routledge
- [2] Coningsby J. Burdon, Hardening Unmanned Aerial Systems against High Power Microwave Threats in support of Forward Operations, 2017, AIR UNIVERSITY
- [3] Samuel Ibeobi, Xuchao Pan, Study of electromagnetic pulse (EMP) effect on surveillance unmanned aerial vehicles (UAVs), 2021, Department of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology
- [4] Mohamed Zied Chaari “High power microwave for knocking out programmable suicide drones”, 2/2021, Qatar Scientific Club
- [5] Grzegorz Lubkowski, Response of the UAV Sensor System to HPEM Attacks, Fraunhofer INT
- [6] F. Sonnemann, J. Bohl, Susceptibility and Vulnerability of Semiconductor Components and Circuits against HPM, Diehl Foundation & Co., Röthenbach
- [7] Mats G. Bäckström, Karl Gunnar Lövstrand, Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves: Summary of Test Experience, 2004, IEEE
- [8] Livio Torrero, RF Immunity Testing of an Unmanned Aerial Vehicle Platform Under Strong EM Field Conditions, 2013, 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)
- [9] K.Yu. Sakharov, A.V. Sukhov, V.L. Ugolev, Yu.M. Gurevich, Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle, 2018, Proc. of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility
- [10] José Lopes Esteves, Emmanuel Cottais, Chaouki Kasmı, Unlocking the Access to the Effects induced by IEMI on a Civilian UAV, 2018, International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), Amsterdam, The Netherlands, August 27-30, 2018
- [11] Rhode & Schwarz, “R&S®SMB100A microwave signal generator.” https://www.rohdeschwarz.com/us/products/test-and-measurement/analog-signal-generators/rs-smb100microwave-signal-generator_63493-9379.html
- [12] Agilent 33220A 20 MHz Waveform Generator, User’s Guide, Agilent Technologies
- [13] Bonn Elektronik, TWAP 1...2.5 GHz Pulsed TWT Amplifiers datasheet, <https://frontend.bonnelektronik.com/pdfsheets.php?modellreihe=283&smid=2553&lang=eng>
- [14] Raditek Inc. Coaxial Circulator, 1.0-2.5 GHz, datasheet

- [15] AR Technologies, ATH800M5GA, M1, M3, M4, M5 Antenna 0.8GHz–5.0GHz, Technical datasheet
- [16] NBM-550 Narda Broadband Field Meter, 2009, Operating Manual
- [17] Manual Quanam Nova FPV GPS Waypoint QuadCopter (Drone) , Hobby King, <https://fccid.io/ANATEL/04328-14-09128/Manual/C48ABE23-734B-4485-B679-99A77C69E6F3>
- [18] MEASURING NON-IONISING ELECTROMAGNETIC RADIATION (9 kHz – 300 GHz), ECC RECOMMENDATION, ECC/REC/(02)04
- [19] Κεραίες-Ραδιοζεύξεις-Ραντάρ, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΑΕΙ Πειραιά, Σαββαΐδης Στυλιανός
- [20] Introduction to Antenna Measurement, Antenna Measurement Theory, ORBIT/FR Inc.
- [21] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (100KHz to 300 GHz), 2020, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
- [22] Sangin Kim, EM Signature of a Quadcopter Drone and Its Relationship With Coupling Mechanisms, 2019, IEEE Access