

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



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

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων

Master of Science in
Data Communications and Networking

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Σκόπιμες Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές
σε Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα
με τη Χρήση Υψηλής Ισχύος Παλμικών Μικροκυματικών Κυματομορφών
Συχνότητας 1,0 GHz - 1,5 GHz*



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Μπιζιούρας Δημήτριος, ΑΜ: DCOM-13
Επιβλέπων: Σαββαΐδης Στυλιανός, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022

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



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

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Επικοινωνίες και 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 1.0 GHz – 1.5 GHz*



Student: Biziouras Dimitrios, Registration Number: DCOM-13
MSc Thesis Supervisor: Savaidis Stylianos, Professor

ATHENS-EGALEO, MARCH 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 Μπιζιούρας Δημήτριος του Αθανασίου, με αριθμό μητρώου DCOM-13, 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



Μπιζιούρας Δημήτριος

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΜΠΙΖΙΟΥΡΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Μάρτιος, 2022

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του 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

Η χρήση των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων – ΜΕΕΟ (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs) ή Drones για στρατιωτικούς σκοπούς, κατασκοπεία, τρομοκρατία ή άλλες κακόβουλες ενέργειες, έχει οδηγήσει σε ραγδαία ανάπτυξη τον τομέα της έρευνας για τον εντοπισμό και την εξουδετέρωσή τους, με τη χρήση Σκόπιμων Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών – ΣΗΠ (Intentional Electromagnetic Interference – IEMI), καθώς αυτές είναι δυνατόν να καταρρίψουν το drone, προκαλώντας ανεπανόρθωτες βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματά του ή επηρεάζοντας τη λειτουργία των αισθητήρων του.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πειραματικά, εντός ανηχωικού θαλάμου, η τρωτότητα τριών διαφορετικών μοντέλων drones σε σκόπιμες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, με τη χρήση υψηλής ισχύος παλμικών μικροκυματικών κυματομορφών συχνότητας μεταξύ 1,0 GHz και 1,5 GHz. Γίνεται προσπάθεια να εντοπισθούν συγκεκριμένες κρίσιμες συχνότητες «ενδιαφέροντος», δηλαδή συχνότητες για τις οποίες προκαλείται διαταραχή της λειτουργίας του drone, στο μικρότερο δυνατό χρόνο και με τη χαμηλότερη δυνατή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και πολώσεις της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου καθώς και για διαφορετικά χαρακτηριστικά κυματομορφών, όπως πλάτος, διάρκεια και συχνότητα επανάληψης παλμών (pulse repetition frequency - PRF).

Των πειραμάτων προηγήθηκε διεξοδική ανάλυση των ορίων και της ομοιομορφίας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, καθώς και λεπτομερής διακρίβωση των μετρητικών οργάνων.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανηχωικός Θάλαμος, Ηλεκτρομαγνητικά Υψηλής Ισχύος, Ηλεκτρομαγνητική Τρομοκρατία, Ηλεκτρομαγνητικός Παλμός, Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα, Μικροκυματικοί Παλμοί Υψηλής Ισχύος, Σκόπιμες Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές

ABSTRACT

The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) or Drones for military purposes, surveillance, terrorism or other malicious acts has primarily led the research of drone detection and neutralization, using Intentional Electromagnetic Interference (IEMI), aiming to the fatal damage of drones by harming sensors and other electronic subsystems. This thesis focuses on the susceptibility of three different types of commercial drones in an anechoic chamber environment, to intentional electromagnetic interferences, using pulsed high-power microwaves with frequency that ranges between 1,0 GHz and 1,5 GHz. The aim is to detect those critical frequencies which can cause drone malfunction, using minimum electric field amplitude, in the shortest time, combined with different angles of incidence and polarization of the electric field and various values of the pulse repetition frequency (PRF). An extensive analysis of the electromagnetic field zones and a thorough calibration of the monitoring instruments has been conducted prior to the experiments phase.

KEYWORDS

Anechoic Chamber, Drones, Electromagnetic Pulse, Electromagnetic Terrorism, EMP, High Power Electromagnetics, High Power Microwaves, HPEM, HPM, IEMI, Intentional Electromagnetic Interference, UAV, Unmanned Aerial Vehicles

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ ολόθερμα τον επιβλέποντα της εργασίας, καθηγητή Στυλιανό Σαββαΐδη για την καθοδήγηση και την έμπνευση και τη σύζυγό μου Σοφία για την στήριξη και την υπομονή.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο Εργασίας.....	1
1.2 Στόχοι – Ερευνητικά Ερωτήματα	2
1.3. Μεθοδολογία.....	2
1.4. Δομή Εργασίας.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	4
2.1 Εισαγωγή	4
2.2 Ευαισθησία Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού σε Απειλές με Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό Υψηλής Ισχύος.....	4
2.2.1 Στοιχεία Απειλών	5
2.2.2 Ορισμοί	6
2.2.3 Οργάνωση των Μετρήσεων	7
2.2.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	9
2.2.4.1 Λογικές Συσκευές	9
2.2.4.2 Μικροελεγκτές	12
2.2.4.3 Πλακέτες Μικροεπεξεργαστών.....	15
2.2.4.4 Συστήματα Υπολογιστών.....	17
2.2.4.5 Δίκτυα Υπολογιστών	18
2.2.4.6 Μικροσκοπική Ανάλυση των Βλαβών.....	21
2.2.5 Συμπεράσματα	21
2.3 Δοκιμές Τρωτότητας Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων σε Σκόπιμες Ηλεκτρονικές Παρεμβολές με Συνεχείς Μικροκυματικές Κυματομορφές.....	22
2.3.1 Μεθοδολογία Δοκιμών	23
2.3.2 Πειραματικά Αποτελέσματα και Ανάλυση	24
2.3.2.1 Ακτινοβολήση με Συνεχή Κυματομορφή	25
2.3.2.2 Ανάλυση της Διαδρομής Ηλεκτρομαγνητικής Σύζευξης.....	26
2.3.2.3 Μηχανισμός Επίδρασης της Σκόπιμης Ηλεκτρομαγνητικής Παρεμβολής.....	30
2.3.3 Συμπεράσματα	33
2.4 Απόκριση του Συστήματος Αισθητήρων του Μη Επανδρωμένου Εναέριου Οχήματος σε Επιθέσεις με Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό Υψηλής Ισχύος.....	33
2.4.1 Τοπολογία Πειραμάτων	34
2.4.2 Αποτελέσματα.....	35
2.4.3 Συμπεράσματα	41
2.5 Μελέτη της Επίδρασης Ηλεκτρομαγνητικού Παλμού Υπερ-Ευρείας Ζώνης σε Εμπορικά Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα	41

2.5.1 Ο Υπό Δοκιμή Εξοπλισμός.....	42
2.5.2 Υποδομή Πειραμάτων.....	44
2.5.3 Τοπολογία και Διαδικασία Πειραμάτων	46
2.5.4 Αποτελέσματα.....	46
2.5.5 Συμπεράσματα	47
2.6 Ανακεφαλαίωση.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Πειραματική Τοπολογία.....	50
3.1 Τοπολογία και Εξοπλισμός Πειραμάτων	50
3.1.1 Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα.....	51
3.1.1.1 DJI Phantom 3 Standard	52
3.1.1.2 DJI Mavic Air	54
3.1.1.3 Qunum Nova	55
3.1.2 Μικροκυματικός Εξοπλισμός	56
3.1.2.1 Ενισχυτής παλμών	56
3.1.2.2 Γεννήτρια RF κυματομορφών.....	56
3.1.2.3 Γεννήτρια Διαμόρφωσης.....	57
3.1.2.4 Φίλτρο - Κυκλοφορητής	58
3.1.2.5 Κεραία.....	58
3.1.2.6 Πεδιόμετρο.....	59
3.1.3 Ανηχιαστικός Θάλαμος.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Πειράματα Ηλεκτρομαγνητικής Ατρωσίας	62
4.1 Θεωρητική Ανάλυση και Διακρίβωση.....	62
4.1.1 Κοντινό και Μακρινό Πεδίου Κεραίας.....	63
4.1.2 Διακρίβωση Μετρητικού Οργάνου.....	67
4.1.2.1 Υπολογισμός της Εξασθένησης της Γραμμής Συνδεσμολογίας του Αισθητήρα Montena SFE3-5G	67
4.1.2.2 Θεωρητικός Υπολογισμός της Έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου	70
4.1.2.3 Υπολογισμός της Πραγματικής Ενεργού Επιφάνειας του Αισθητήρα Montena SFE3-5G	72
4.1.2.4 Ενδεικτικές Μετρήσεις της Έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με Παλμικές Κυματομορφές.....	76
4.1.2.5 Έλεγχος της Ομοιομορφίας του Πεδίου.....	78
4.2 Μεθοδολογία και Διαδικασία Πειραμάτων	80
4.3 Αποτελέσματα Πειραμάτων.....	86
4.3.1 DJI Phantom 3 Standard	86
4.3.2 DJI Mavic Air	92
4.3.3 Qunum Nova	99
4.4 Ανάλυση των δεδομένων πτήσης.....	104
4.5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	108

4.5.1 DJI Phantom 3 Standard	108
4.5.2 DJI Mavic Air	114
4.5.3 Quanam Nova	116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Συμπεράσματα και Προτάσεις	117
5.1 Συμπεράσματα	117
5.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.....	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	126
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - Όρια Πεδίων	130
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.α - Εξασθένηση των καλωδίων σύνδεσης της εξόδου του ενισχυτή με την κεραία.....	132
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.β - Εξασθένηση ισχύος του πρώτου τμήματος (balun, εξασθενητής, οπτικός πομπός, γραμμή οπτικών ινών και οπτικός δέκτης)	135
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.γ - Τιμές πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.α - Αποτελέσματα Πειραμάτων για το drone DJI Phantom 3 Standard	139
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.β - Αποτελέσματα Πειραμάτων για το drone DJI Mavic Air.....	140
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.γ - Αποτελέσματα Πειραμάτων για το drone Quanam Nova.....	141

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Τα Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα – ΜΕΕΟ (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs) ή Drones, χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως σε πολλές εφαρμογές, από φωτογραφία και βίντεο, έως μεταφορές και επιχειρήσεις διάσωσης. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για στρατιωτικούς σκοπούς, κατασκοπία, τρομοκρατία ή άλλες κακόβουλες ενέργειες, που περιγράφονται γενικά με τον όρο Ηλεκτρομαγνητική Τρομοκρατία (Electromagnetic Terrorism) [1] και να θέσουν σε κίνδυνο προσωπικό και εγκαταστάσεις. Για το σκοπό αυτό, αναπτύσσεται ραγδαία ο τομέας της έρευνας για τον εντοπισμό και την εξουδετέρωση των drones [2]. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στην λειτουργία του drone και την ανάληψη του ελέγχου του, είτε με φυσική, είτε με λογική επίθεση [3]. Η φυσική επίθεση προϋποθέτει την φυσική επαφή με το drone, είτε με τη χρήση παραδοσιακών βολυστικών όπλων [4], είτε με τη χρήση ΜΕΕΟ αναχαίτισης εφοδιασμένων με δίκτυα [5], ενώ η λογική επίθεση στοχεύει στο κανάλι επικοινωνίας του drone με την επίγεια μονάδα ελέγχου [6].

Ένα είδος επίθεσης που συνδυάζει φυσικά και λογικά χαρακτηριστικά είναι οι Σκόπιμες Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές – ΣΗΠ (Intentional Electromagnetic Interference – IEMI) [7], καθώς αυτές είναι δυνατόν να προκαλέσουν μη αναστρέψιμες βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα του drone (πλακέτες, ημιαγωγοί), καταρρίπτοντάς το άμεσα, ή να επηρεάσουν τη λειτουργία του συστήματος αισθητήρων και το κανάλι επικοινωνίας του με την επίγεια μονάδα ελέγχου (τηλεχειριστήριο) και τελικά το drone να οδηγηθεί ανεξέλεγκτο σε πτώση.

Η ιδέα της ακινητοποίησης ενός οχήματος, κυρίως επίγειου ή θαλάσσιου, με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, διερευνήθηκε διεξοδικά στα πλαίσια του προγράμματος SAVELEC (Safe Control of Non Cooperative Vehicles Through Electromagnetic Means) [8].

1.2 Στόχοι – Ερευνητικά Ερωτήματα

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πειραματικά η τρωτότητα τριών διαφορετικών μοντέλων drones σε σκόπιμες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, με τη χρήση υψηλής ισχύος παλμικών μικροκυματικών κυματομορφών συχνότητας μεταξύ 1,0 GHz και 1,5 GHz. Γίνεται προσπάθεια να εντοπισθούν συγκεκριμένες κρίσιμες συχνότητες «ενδιαφέροντος», δηλαδή συχνότητες, για τις οποίες προκαλείται διαταραχή της λειτουργίας του drone, στο μικρότερο δυνατό χρόνο και με τη χαμηλότερη δυνατή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό γίνεται για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και πολώσεις της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές θέσεις της κεραίας που παράγει την σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, καθώς και για διαφορετικά χαρακτηριστικά κυματομορφών της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, όπως πλάτος, διάρκεια και συχνότητα επανάληψης παλμών (pulse repetition frequency - PRF).

Η πρωτοτυπία και η ερευνητική συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται στο γεγονός ότι σε αντίθεση με την παρατιθέμενη αλλά και γενικότερα με την γνωστή υπάρχουσα σχετική βιβλιογραφία, εδώ γίνεται διεξοδική πειραματική μελέτη και ανάλυση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης και της πόλωσης της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου, και επομένως των διαφορετικών θέσεων της κεραίας που παράγει την σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, έτσι ώστε να επιτευχθεί με τη μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα η διαταραχή της λειτουργίας του drone.

1.3. Μεθοδολογία

Οι δύο βασικοί άξονες υλοποίησης της παρούσας εργασίας περιλαμβάνουν στο πρώτο μέρος τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των πιο αντιπροσωπευτικών επιστημονικών μελετών και ερευνητικών εργασιών, συναφών με το συγκεκριμένο αντικείμενο, οι οποίες, εκτός από την αξία της βιβλιογραφικής αναφοράς, χρησιμεύουν και ως πηγή στοιχείων σύγκρισης και άντλησης καλών πρακτικών μεθοδολογίας και εκτέλεσης των πειραμάτων

και στο δεύτερο και σημαντικότερο μέρος την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας, την καταγραφή των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

1.4. Δομή Εργασίας

Η εργασία έχει την ακόλουθη διάρθρωση: το ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 περιλαμβάνει την βιβλιογραφική ανασκόπηση των πιο αντιπροσωπευτικών επιστημονικών μελετών με αντικείμενο τη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών ειδών σκόπιμων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στην ευπάθεια των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (ΜΕΕΟ). Το ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 περιλαμβάνει την αναλυτική περιγραφή της τοπολογίας και του εξοπλισμού των πειραμάτων, δηλαδή των drones, του απαραίτητου μικροκυματικού εξοπλισμού για την παραγωγή των παλμών της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και των οργάνων για την καταγραφή και μέτρηση των αντίστοιχων ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών, και φυσικά του ανηχικού θαλάμου, εντός του οποίου πραγματοποιήθηκαν όλα τα πειράματα. Το ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 περιλαμβάνει την διαδικασία των πειραμάτων ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας των drones, την αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των ενδελεχή σχολιασμό τους, καθώς και τη θεωρητική ανάλυση της διαδικασίας των μετρήσεων και τη διακρίβωση (calibration) των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν. Το ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 περιλαμβάνει τη διατύπωση των συμπερασμάτων και την παράθεση προτάσεων για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Πλήθος μελετών έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των σκόπιμων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στην ευπάθεια των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (MEEO). Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι πιο αντιπροσωπευτικές από αυτές, ξεκινώντας από την γενικότερη περίπτωση της εξέτασης ενός μεγάλου αριθμού διαφορετικών ηλεκτρονικών συσκευών, όπως συστήματα και δίκτυα υπολογιστών, πλακέτες μικροεπεξεργαστών, μικροελεγκτές και άλλα βασικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, υπό διαφορετικές απειλές, όπως ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός (Electromagnetic Pulse - EMP) και οι παλμοί υπερ-ευρείας ζώνης (Ultra-Wide Band - UWB) καθώς και οι μικροκυματικοί παλμοί υψηλής ισχύος (High Power Microwaves - HPM). Στη συνέχεια, παρατίθενται μελέτες που εξετάζουν την τρωτότητα των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων, και κυρίως το σύστημα των αισθητήρων τους, σε σκόπιμες ηλεκτρονικές παρεμβολές που προέρχονται τόσο από συνεχείς (continuous wave - CW), όσο και από παλμικές μικροκυματικές κυματομορφές υψηλής ισχύος (High Power Electromagnetics - HPEM), ενώ τέλος παρατίθεται μελέτη της επίδρασης ηλεκτρομαγνητικού παλμού υπερ-ευρείας ζώνης (Ultra-Wide Band - UWB) σε εμπορικά μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα.

2.2 Ευαισθησία Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού σε Απειλές με Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό Υψηλής Ισχύος

Στην έρευνα αυτή, δίνεται από τους D. Nitsch, M. Camp και F. Sabath [9] μια ανασκόπηση της ευαισθησίας ενός μεγάλου αριθμού διαφορετικών ηλεκτρονικών συσκευών, όπως συστήματα υπολογιστών, δίκτυα υπολογιστών, πλακέτες μικροεπεξεργαστών, μικροελεγκτές και άλλα βασικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, σε διαφορετικές απειλές, όπως ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός (Electromagnetic Pulse - EMP) και οι παλμοί υπερ-ευρείας ζώνης (Ultra-Wide Band - UWB) και υψηλής ισχύος (High Power Microwaves -

HPM). Επίσης, γίνεται σύγκριση της ευαισθησίας διαφόρων συσκευών σε μικροκυματικούς παλμούς υπερ-ευρείας ζώνης και υψηλής ισχύος αντίστοιχα, και τέλος γίνεται μια ενδελεχής εξέταση των καταστρεπτικών συνεπειών των ανωτέρω σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Οι επικοινωνίες, η επεξεργασία δεδομένων, οι αισθητήρες και συναφείς ηλεκτρονικές συσκευές, αποτελούν ζωτικά συστατικά του σύγχρονου τεχνικού εξοπλισμού. Βλάβες ή αστοχίες σε τέτοιες συσκευές μπορούν να οδηγήσουν σε τεχνικές ή οικονομικές καταστροφές ή ακόμη και σε τραυματισμούς ή απώλειες ανθρώπινης ζωής. Η σημαντική πρόοδος των ηλεκτρομαγνητικών πηγών υψηλής ισχύος (High Power Electromagnetics – HPEM) και των κεραιών, καθώς και η εύκολη πρόσβαση στα συστήματα αυτά, επιβάλλουν την ανάγκη του προσδιορισμού της ευαισθησίας του ηλεκτρονικού εξοπλισμού στις προαναφερθείσες απειλές. Η εξέταση ποικίλων κυκλωμάτων και χαρακτηριστικών παλμών, καθώς και των αποτελεσμάτων της εφαρμογής τους, είναι στοιχεία σημαντικά για την ανάπτυξη μοντέλων συμπεριφοράς και προστασίας των ηλεκτρονικών κατασκευών.

2.2.1 Στοιχεία Απειλών

Στην παρούσα έρευνα, τρία διαφορετικά είδη απειλών προερχόμενα από ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς υψηλής ισχύος εφαρμόστηκαν στον υπό δοκιμή εξοπλισμό (equipment under test – EUT): εκθετικοί παλμοί διπλής κλίσης, διπολικοί παλμοί και μικροκυματικοί παλμοί.

Εκθετική μορφή διπλής κλίσης έχουν γενικά οι πυρηνικοί ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί (Nuclear Electromagnetic Pulses – NEMP) και οι μονοπολικοί παλμοί υπερ-ευρείας ζώνης, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά, ως προς το χρόνο ανόδου (t_r), τη μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E_{max}) και τον ημίσειο χρόνο πλήρους πλάτους (t_{fwhm}).

Pulse Shape	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
NEMP	t_r few ns	t_{fwhm} 20 – 400 ns	E_{max} 50 kV/m
Unipolar UWB	t_r 90 – 250 ps	t_{fwhm} few ns	E_{max} 1 – 100 kV/m ¹
Bipolar UWB	t_r 50 – 250 ps	t_{pp} 100 – 500 ps	E_{max} 1 – 100 kV/m ¹
HPM	f_c 500 MHz – 5 GHz	t_d 50 – 500 ns	E_{max}^* 1 – 100 kV/m ¹

¹Field Strength is depending on the distance between the source and the target.

* Peak value of the electrical field

Πίνακας 1: Τυπικές παράμετροι NEMP, UWB και HPM [9]

Οι διπολικοί/μονοπολικοί ακτινοβολούμενοι παλμοί χαρακτηρίζονται από τους χρόνους ανόδου και καθόδου (t_r και t_f), το χρόνο μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής του ηλεκτρικού πεδίου (t_{pp}) και τη μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E_{max}). Οι μικροκυματικοί παλμοί υψηλής ισχύος (High Power Microwaves – HPM) χαρακτηρίζονται από τη μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E_{max}), τη διάρκεια (t_d) και την κεντρική συχνότητα (f_c).

2.2.2 Ορισμοί

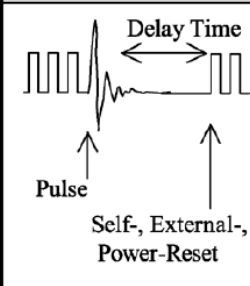
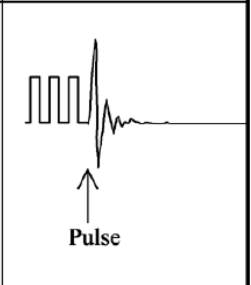
Για την περιγραφή των αστοχιών καθορίστηκαν τα ακόλουθα μεγέθη:

-Ο ρυθμός διακοπών (Breakdown Failure Rate – BFR), που ορίζεται ως το πηλίκο του αριθμού διακοπών στη λειτουργία ενός συστήματος δια τον αριθμό των εφαρμοζόμενων παλμών. Τονίζεται ότι η διακοπή στη λειτουργία ενός συστήματος είναι μια αναστρέψιμη διαδικασία και δεν οδηγεί σε φυσική βλάβη. Με επαναφορά τροφοδοσίας, εσωτερική ή εξωτερική, το σύστημα επανέρχεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας.

-Το κατώφλι διακοπής (Breakdown Threshold – BT), που αντιστοιχεί στην τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, κατά την οποία ο ρυθμός διακοπών (BFR) φτάνει το 5% της μέγιστης τιμής.

-Το εύρος διακοπής (Breakdown Bandwidth – BB), που αντιστοιχεί στο εύρος των τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, εντός του οποίου ο ρυθμός διακοπών (BFR) μεταβάλλεται από το 5% στο 95% της μέγιστης τιμής.

-Ο ρυθμός βλαβών (Destruction Failure Rate – DFR), που ορίζεται ως το πηλίκο του αριθμού βλαβών στη λειτουργία ενός συστήματος δια τον αριθμό των εφαρμοζόμενων παλμών. Ως βλάβη ορίζεται η φυσική καταστροφή ενός συστήματος, η οποία είναι μη αναστρέψιμη και αποκαθίσταται μόνο με επιδιόρθωση του εξοπλισμού.

<u>B</u> reakdown	<u>D</u> estruction
 <p>Delay Time</p> <p>Pulse</p> <p>Self-, External-, Power-Reset</p>	 <p>Pulse</p>
<u>B</u> reakdown <u>F</u> ailure <u>R</u> ate	<u>D</u> estruction <u>F</u> ailure <u>R</u> ate
$BFR = \frac{\text{No. of Breakdowns}}{\text{No. of Pulses}}$	$DFR = \frac{\text{No. of Destructions}}{\text{No. of Pulses}}$

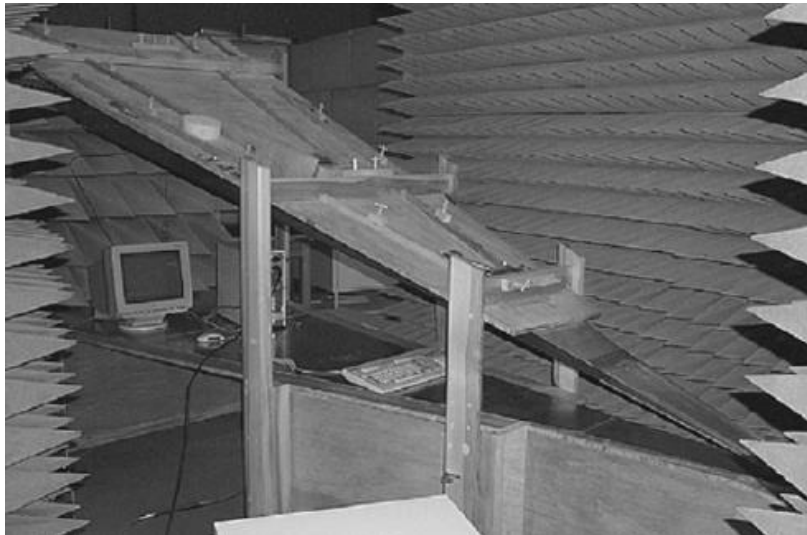
Πίνακας 2: Ορισμοί του ρυθμού διακοπών (BFR) και του ρυθμού βλαβών (DFR) [9]

2.2.3 Οργάνωση των Μετρήσεων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με την εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον υπό δοκιμή εξοπλισμό. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί TEM κυματοδηγοί, ένας κυματοδηγός εξωτερικού χώρου, ο οποίος προσομοιώνει πυρηνικούς ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς (NEMP), με μέγιστο ύψος 23 m και ένας κυματοδηγός εργαστηρίου, ανοιχτού τύπου, τοποθετημένος εντός θαλάμου με απορροφητικά τοιχώματα.

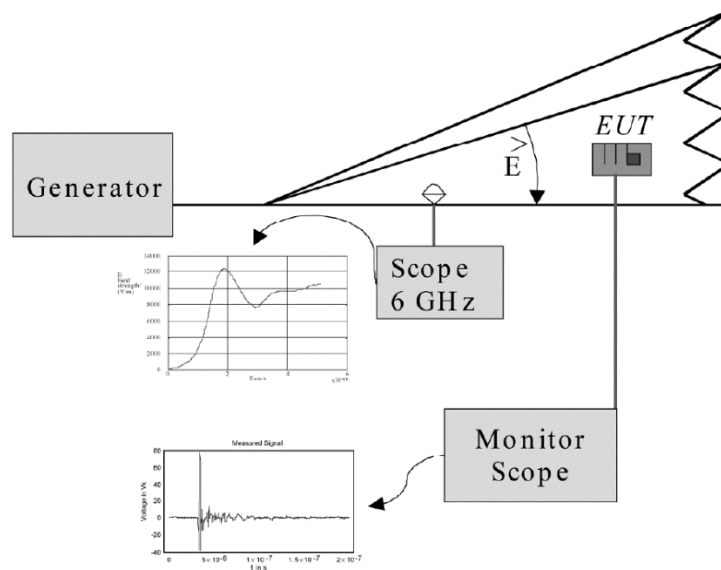


Εικόνα 1: TEM κυματοδηγός εξωτερικού χώρου (WIS, Munster, Germany) [9]



Εικόνα 2: TEM κυματοδηγός εργαστηρίου (WIS, Munster, Germany) [9]

Οι μετρήσεις των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση συσκευής ανάλυσης βλαβών (Time-Domain Reflector – TDR) και με ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες. Οι διάφορες υπό δοκιμή συσκευές τοποθετήθηκαν όπως απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα και τόσο τα σήματά τους, όσο και οι εφαρμοζόμενοι παλμοί μετρήθηκαν με τη χρήση παλμογράφου (εύρος ζώνης 6 GHz, ρυθμός δειγματοληψίας 20 Gsamples/sec).



Εικόνα 3: Διάταξη μετρήσεων [9]

2.2.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων

Εξετάσθηκαν ως προς την ευαισθησία τους διαφορετικές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως λογικές συσκευές, μικροελεγκτές, συστήματα υπολογιστών και δίκτυα υπολογιστών.

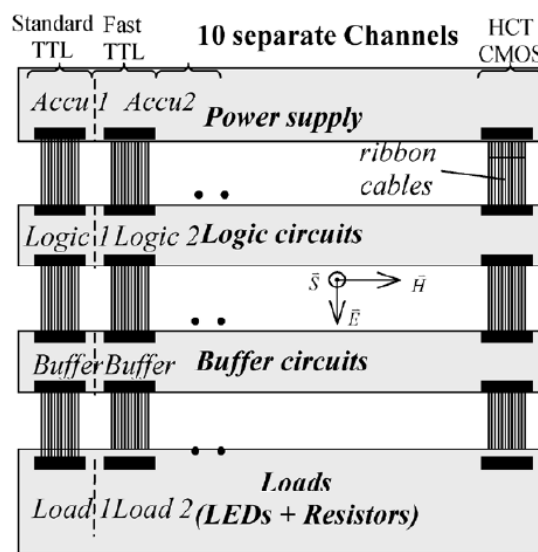
2.2.4.1 Λογικές Συσκευές

Δοκιμάστηκαν δέκα διαφορετικές τεχνολογίες ημιαγωγών (έξι TTL – Transistor-Transistor Logic και τέσσερις CMOS – Complementary Metal-Oxide Semiconductor) ως προς την ευαισθησία τους σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς (EMP) και υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς.

TTL-Technology					
Standard	Schottky (S)	Low Power Schottky (LS)	Advanced Schottky (AS)	Advanced Low Power Schottky (ALS)	Fairchild Advanced Schottky (FAST)
CMOS-Technology					
High Speed (HC)	High Speed TTL-compatible (HCT)	Advanced (AC)	Advanced TTL-compatible (ACT)		

Πίνακας 3: Τεχνολογίες υπό δοκιμή [9]

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των παλμών καταγράφηκαν με τη χρήση θυρών NAND, μετατροπέων και καταχωρητών. Προκειμένου να εφαρμοσθούν παλμοί διαφορετικού είδους στον υπό δοκιμή εξοπλισμό, χρησιμοποιήθηκε αρθρωτή προσέγγιση (modular setup). Κατασκευάστηκαν δέκα χωριστά κανάλια με συνδυασμό διαφορετικών τυπωμένων κυκλωμάτων, τα οποία συνδέθηκαν με καλωδιωταινίες στις ακίδες εισόδου και εξόδου του υπό δοκιμή εξοπλισμού, για να επιτευχθούν διαφορετικά μήκη σύζευξης.

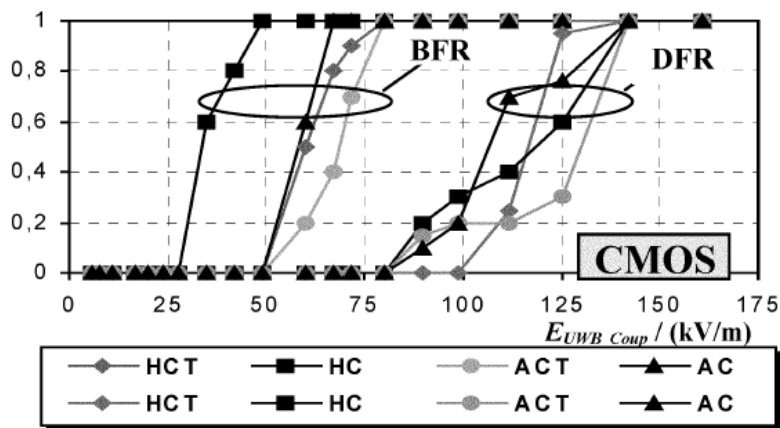


Εικόνα 4: Αρθρωτή προσέγγιση (modular setup) [9]

Η τροφοδοσία εξασφαλίστηκε με τη χρήση δέκα διαφορετικών συσσωρευτών. Διακόπτες τύπου DIP (dual inline package) χρησιμοποιήθηκαν στη μονάδα τροφοδοσίας για την δημιουργία τυχαίων ακολουθιών bits στις ακίδες εισόδου, ενώ LEDs και αντιστάσεις χρησιμοποιήθηκαν ως φορτία για την παρατήρηση των καταστάσεων λειτουργίας των υπό δοκιμή συσκευών. Κατά τις δοκιμές, οι συσκευές τύπου CMOS εμφάνισαν αναστρέψιμες διακοπές στη λειτουργία, οι οποίες επιδιορθώθηκαν με την επαναφορά της τροφοδοσίας, αλλά σε πολύ υψηλότερες τιμές ηλεκτρικού πεδίου παρατηρήθηκαν μη αναστρέψιμες βλάβες. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να ερμηνευθεί από την παρουσία ενός

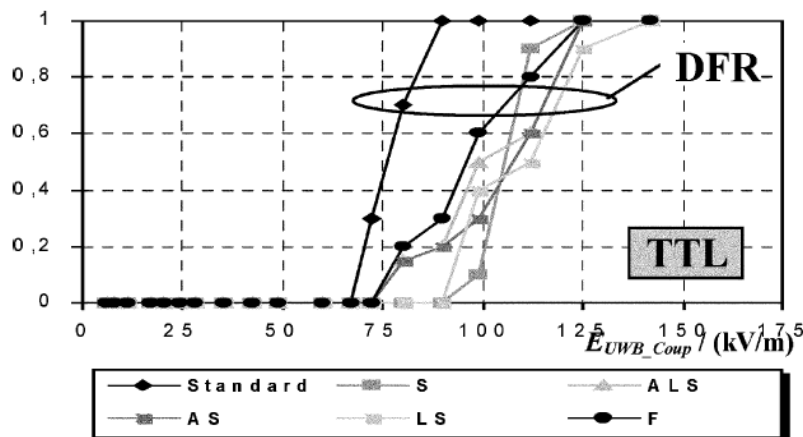
παρασιτικού θυρίστορ (latch up effect), ως αποτέλεσμα της μικρής απόστασης μεταξύ των συμπληρωματικών τρανζίστορ τύπου n και p στις CMOS συσκευές [10].

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται ο ρυθμός διακοπών (BFR) και ο ρυθμός βλαβών (DFR) σε συσκευές τύπου NAND, κατασκευασμένες με τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες CMOS.



Εικόνα 5: Ρυθμός διακοπών (BFR) και ρυθμός βλαβών (DFR) σε συσκευές τύπου CMOS-NAND [9]

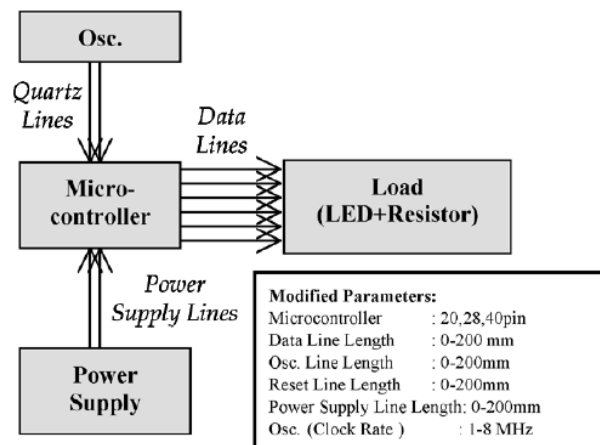
Η σύγκριση των συσκευών CMOS-NAND με τις TTL-NAND δείχνει ότι ενώ τα όρια των βλαβών είναι παραπλήσια, μόνο οι TTL-NAND συσκευές υπέστησαν μη αναστρέψιμες βλάβες. Σε χαμηλές τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, οι TTL-NAND συσκευές δεν υπέστησαν βλάβες, σε αντίθεση με τις CMOS-NAND συσκευές. Τα ίδια φαινόμενα παρατηρήθηκαν σε inverter συσκευές.



Εικόνα 6: Ρυθμός βλαβών (DFR) σε συσκευές τύπου TTL-NAND [9]

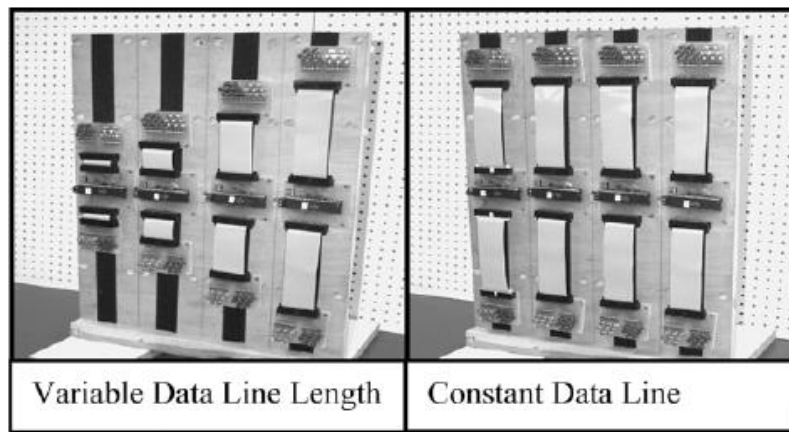
2.2.4.2 Μικροελεγκτές

Εξετάσθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι μικροελεγκτών με διαφορετικό αριθμό θυρών εισόδου-εξόδου (I/O-ports) και με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: Αρχιτεκτονική RISC (reduced instruction set computer - περιορισμένου συνόλου εντολών), CMOS υψηλής ταχύτητας, 32X8 καταχωρητές γενικής χρήσης, ενσωματωμένη μνήμη flash, ενσωματωμένη μνήμη EEPROM (electrically erasable programmable read-only memory), τροφοδοσία Vcc. Μελετήθηκε η επίδραση της ακτινοβολίας σε διαφορετικά μήκη των γραμμών δεδομένων, γραμμών ταλαντωτών, γραμμών τροφοδοσίας, γραμμών επαναφοράς, καθώς και στο χρονισμό. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζονται τα βασικά μέρη ενός κυκλώματος μικροελεγκτή και οι τιμές των παραμέτρων τους.



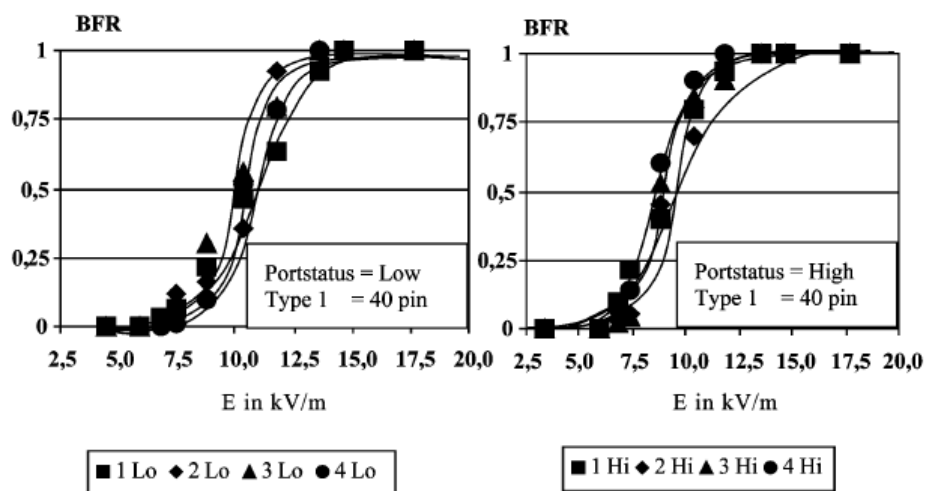
Εικόνα 7: Βασικά μέρη ενός κυκλώματος μικροελεγκτή και οι τιμές των παραμέτρων τους [9]

Για κάθε τύπο εξετάσθηκαν τέσσερις μικροελεγκτές, τοποθετημένοι κατακόρυφα σε ξύλινη επιφάνεια. Οι καταστάσεις των θυρών εισόδου-εξόδου προσομοιώθηκαν με LEDs διαφορετικών χρωμάτων. Οι μεταβολές του μήκους σύνδεσης των γραμμών δεδομένων και τροφοδοσίας υλοποιήθηκαν με καλωδιοταινίες.

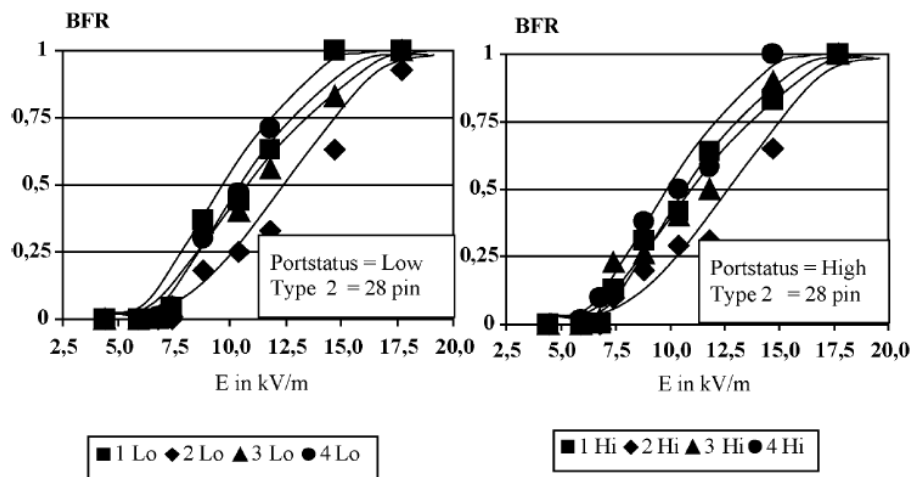


Εικόνα 8: Διάταξη δοκιμών μικροελεγκτών [9]

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, εκτελούνταν ένα λογισμικό στους μικροελεγκτές, το οποίο μπορούσε να λάβει δύο καταστάσεις. Στην κατάσταση 1, δύο θύρες ήταν εντός και δύο εκτός. Στη συνέχεια, μέσω ενός διακόπτη, το λογισμικό μετέβαινε στην κατάσταση 2, κατά την οποία ο μικροελεγκτής εκτίθετο στην ακτινοβολία, με σκοπό την εξαναγκασμένη μετάβασή του πίσω στην κατάσταση 1. Στην κατάσταση 2 οι θύρες ήταν αντεστραμμένες. Ο χρονισμός λειτουργίας ορίστηκε στο 1 MHz και το μήκος των γραμμών δεδομένων και τροφοδοσίας στο ελάχιστο. Στα επόμενα σχήματα απεικονίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε δύο διαφορετικούς τύπους μικροελεγκτών με βασική σύνθεση.



Εικόνα 9: Ρυθμός διακοπών (BFR) σε μικροελεγκτή τύπου 1 (40 pin) [9]



Εικόνα 10: Ρυθμός διακοπών (BFR) σε μικροελεγκτή τύπου 2 (28 pin) [9]

Από τις δοκιμές προέκυψε ότι το κατώφλι διακοπής (Breakdown Threshold – BT) και το εύρος διακοπής (Breakdown Bandwidth – BB) δεν διαφοροποιούνταν σημαντικά μεταξύ μικροελεγκτών του ίδιου τύπου, αλλά η διαφοροποίηση ήταν σημαντική για μικροελεγκτές διαφορετικού τύπου. Για την ανάλυση οι τιμές των BT και BB ορίστηκαν ως ο μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών για τους τέσσερις μικροελεγκτές κάθε είδους. Η τιμή του κατωφλίου διακοπής (BT) επηρεάστηκε σημαντικά από το μήκος της γραμμής επαναφοράς, λιγότερο από το μήκος της γραμμής τροφοδοσίας και χρονισμού, ελάχιστα από το μήκος της γραμμής δεδομένων και από τον τύπο του μικροελεγκτή και καθόλου από το χρονισμό (έως 8 MHz). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται τον επόμενο πίνακα.

	Data Line Length	Reset Line Length	Osc. Line Length	Power Supply Line Length	Clock Rate	Type of Controller
BT	Low	High	Medium	Medium	None	Low
BB	None	High	Low	Medium	None	High

Πίνακας 4: Επίδραση του παλμού στο κατώφλι διακοπής (BT) και στο εύρος διακοπής (BB) [9]

Το εύρος διακοπής (BB) επηρεάστηκε γενικά σημαντικά από τον τύπο του μικροελεγκτή και από το μήκος της γραμμής επαναφοράς, λιγότερο από το μήκος της γραμμής τροφοδοσίας, ελάχιστα από το μήκος της γραμμής του ταλαντωτή και καθόλου από το μήκος της γραμμής δεδομένων και το χρονοισμό.

2.2.4.3 Πλακέτες Μικροεπεξεργαστών

Εξετάστηκε η ευαισθησία στους εφαρμοζόμενους παλμούς, δύο διαφορετικών τύπων μικροεπεξεργαστών: SSC 5X86 AMD 133 MHz και Rocky-518 HV Pentium/MMX 233 MHz. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των εφαρμοζόμενων παλμών.

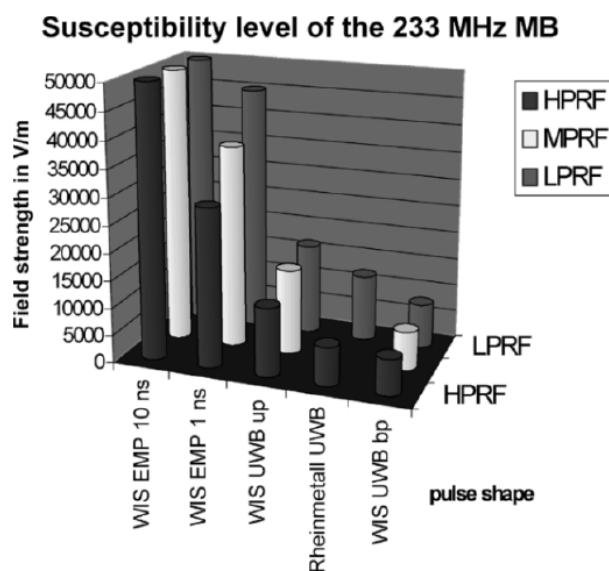
Pulse Shape	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
EMP 10	t_r 10 ns	t_{fwhm} 200 ns	E_{max} up to 50 kV/m
EMP 1	1 ns	80 ns	up to 50 kV/m
WIS UWB up	t_r 90 ps	t_{fwhm} 2.5 ns	E_{max} up to 30 kV/m
WIS UWB bp	t_r/t_f 100 ps	t_d 350 ps	E_{max} up to 20 kV/m
Rheinmetall UWB bp	200 ps	500 ps	up to 40 kV/m
HPM	<i>Freq.-Range</i> 150 MHz –	<i>PRF</i> 1 Hz –	E_{max} up to 4 kV/m
dwel time 1 s	3.4 GHz	1 kHz	
cw	80 MHz – 1000 MHz	dwel time 1 s	up to 1 kV/m

Πίνακας 5: Βασικά χαρακτηριστικά των εφαρμοζόμενων παλμών [9]

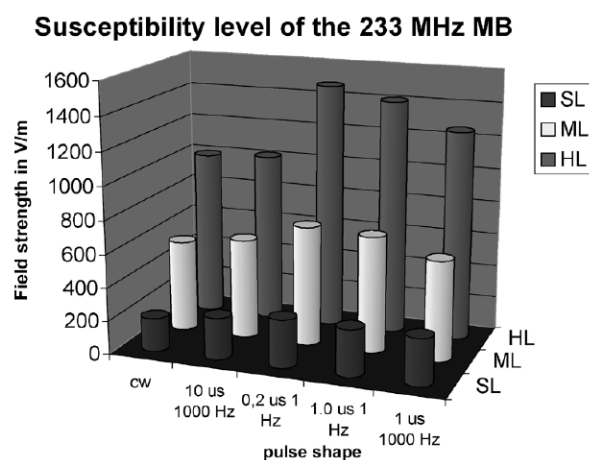
Για λόγους κατηγοριοποίησης των επιπέδων ευαισθησίας των μικροεπεξεργαστών, καθορίστηκαν τα μεγέθη HL, ML και SL για τις συχνότητες δοκιμής, ως αντίστοιχα η μέγιστη, η μέση και η ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται για να διαταράξει τη λειτουργία του υπό δοκιμή επεξεργαστή, για όλες τις συχνότητες δοκιμής. Όπως είναι φανερό, η συχνότητα που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου (SL) είναι εκείνη που καθορίζει τελικά την ευαισθησία του μικροεπεξεργαστή. Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος για τα παλμικά σήματα είναι το εύρος διακοπής (BB). Το κατώτατο όριο του BB αντιστοιχεί σε μια χαμηλή πιθανότητα διαταραχής από έναν απλό παλμό, επομένως μια υψηλή συχνότητα επανάληψης παλμών

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Δημήτρης Μπιζιούρας, AM DCOM-13 15

(HPRF) απαιτείται για να διαταράξει τη λειτουργία του μικροεπεξεργαστή. Το ανώτατο όριο του BB αντιστοιχεί σε μια υψηλή πιθανότητα διαταραχής από έναν απλό παλμό, επομένως μια χαμηλή συχνότητα επανάληψης παλμών (LPRF) είναι αρκετή για να διαταράξει τη λειτουργία του μικροεπεξεργαστή. Τα επίπεδα ευαισθησίας του 233-MHz μικροεπεξεργαστή απεικονίζονται στα επόμενα, για ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς (EMP) και υπερ-υψηλής ζώνης (UWB) παλμούς και μικροκυματικούς παλμούς υψηλής ισχύος (HPM) και συνεχείς κυματομορφές (CW) αντίστοιχα. Παρόμοια συμπεράσματα ισχύουν για τον 133-MHz μικροεπεξεργαστή.



Εικόνα 11: Επίπεδα ευαισθησίας του 233-MHz μικροεπεξεργαστή για EMP και UWB παλμούς [9]



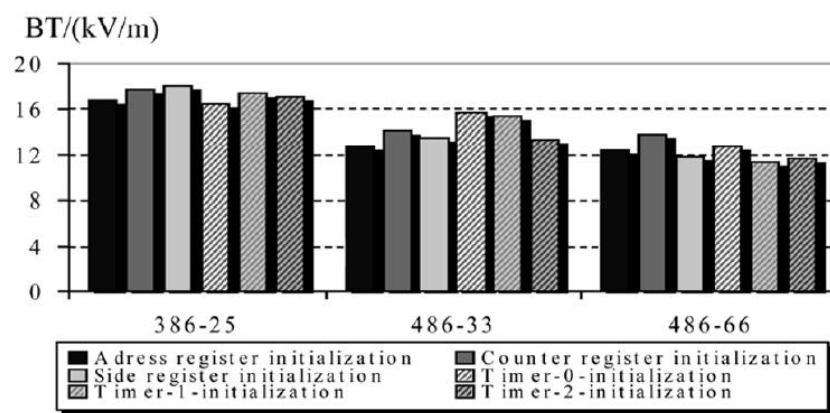
Εικόνα 12: Επίπεδα ευαισθησίας του 233-MHz μικροεπεξεργαστή για HPM και CW [9]

Με μια πρώτη ματιά φαίνεται ότι η διαφορά στα όρια ευαισθησίας των επεξεργαστών σε μεγάλης διάρκειας μικροκυματικούς παλμούς υψηλής ισχύος (HPM) και συνεχείς κυματομορφές (CW) είναι μικρή. Η διάρκεια των HPM δεν έχει σχεδόν καμία επίδραση στην ευαισθησία των μικροεπεξεργαστών, ενώ ελάχιστη επίδραση έχει η συχνότητα επανάληψης των παλμών (PRF). Η ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (SL) που απαιτείται για να διαταράξει τη λειτουργία του μικροεπεξεργαστή, και για τους δύο τύπους (133 MHz και 233 MHz) ήταν της τάξης των μερικών εκατοντάδων V/m, ενώ η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (HL) κυμάνθηκε μεταξύ 1 και 2 KV/m. Τα επίπεδα ευαισθησίας μειώθηκαν σημαντικά με την αύξηση της συχνότητας επανάληψης των παλμών (PRF) στην περίπτωση ηλεκτρομαγνητικών παλμών (EMP) και υπερ-υψηλής ζώνης (UWB) παλμών. Επίσης, τα επίπεδα ευαισθησίας εμφάνισαν ισχυρή εξάρτηση από το σχήμα των παλμών.

2.2.4.4 Συστήματα Υπολογιστών

Τα υπό δοκιμή συστήματα υπολογιστών λειτουργούσαν με την ελάχιστη κατασκευαστική σύνθεση, που περιλαμβάνει την μητρική πλακέτα, τον επεξεργαστή, τη μνήμη και την τροφοδοσία. Για την παρακολούθηση της λειτουργίας των συστημάτων, αναπτύχθηκε προσαρμογέας που επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της κατάστασης των γραμμών δεδομένων, των γραμμών διευθύνσεων και του κεντρικού συστήματος. Τα υπό δοκιμή συστήματα υπολογιστών τοποθετήθηκαν μέσα στους κυματοδηγούς, με τρόπο τέτοιο, ώστε να περιορίζεται στο ελάχιστο η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη με τον προσαρμογέα παρακολούθησης. Ως λειτουργικό σύστημα επελέγη μια απλή έκδοση του DOS, έτσι ώστε να μην δημιουργηθεί περαιτέρω επιβάρυνση στα συστήματα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Για τον ίδιο λόγο, τόσο το λειτουργικό σύστημα, όσο και το υπόλοιπο λογισμικό εκτελούνταν από δισκέτα, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης σκληρού δίσκου. Επίσης, για την παρακολούθηση της επίδρασης των διαφόρων καταστάσεων του λογισμικού στα συστήματα, αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό με υπορουτίνες και ενεργοποιήθηκαν στη μητρική πλακέτα διαφορετικά στοιχεία υλικού, όπως ελεγκτής

DMA (direct memory access) και PIT (programmable interval timer). Οι βασικές ρουτίνες των DMA και PIT χωρίστηκαν σε τρεις υπορουτίνες με διαφορετικές λειτουργίες. Οι παλμοί εφαρμόζονταν κατά τη διάρκεια κάθε υπορουτίνας και στη συνέχεια διενεργούνταν έλεγχος της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) για σωστή λειτουργία. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται το κατώφλι διακοπής (Breakdown Threshold – BT) για τρία συστήματα προσωπικών υπολογιστών για έξι διαφορετικές καταστάσεις λογισμικού, για παλμό υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) με χρόνο ανόδου $t_r = 100$ psec και διάρκεια $t_{fwhm} = 2,5$ nsec.



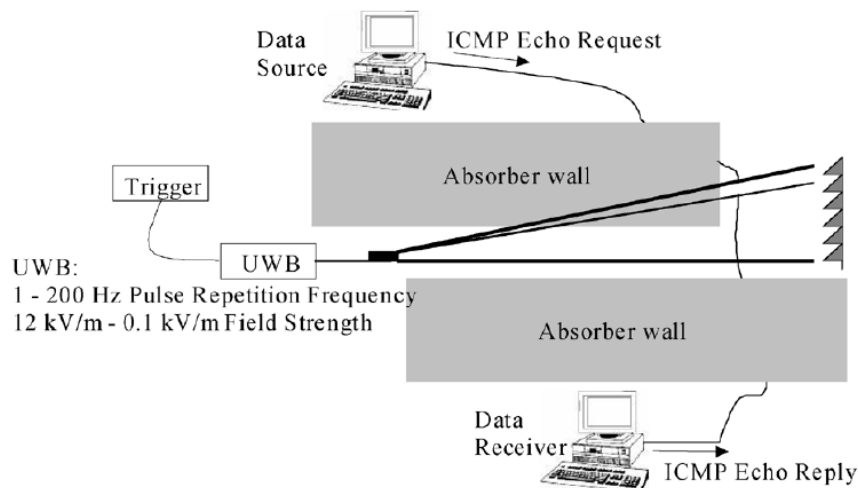
Εικόνα 13: Κατώφλι διακοπής (BT) τριών συστημάτων υπολογιστών για έξι διαφορετικές καταστάσεις λογισμικού [9]

Δεν παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στο κατώφλι διακοπής (BT), τόσο στις βασικές ρουτίνες, όσο και στις υπορουτίνες. Η τιμή του BT ελαττώνονταν, όσο αυξάνονταν η τεχνολογική γενιά του υπό δοκιμή συστήματος. Ανάλογα αποτελέσματα προέκυψαν και με παλμούς με διαφορετικές τιμές χρόνου ανόδου και διάρκειας.

2.2.4.5 Δίκτυα Υπολογιστών

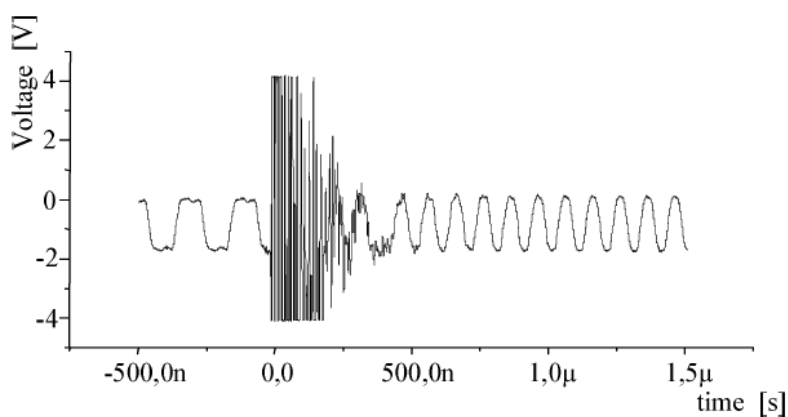
Δοκιμάστηκε η ευαισθησία δικτύου που αποτελούνταν από δύο υπολογιστές i486 γενιάς, με δικτυακή σύνδεση Ethernet, σε μονοπολικούς παλμούς υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) με χρόνο ανόδου $t_r = 100$ psec και πλάτος έντασης ηλεκτρικού πεδίου από 100 V/m έως 12000 V/m, με διαφορετικούς τύπους καλωδίων δικτύου, όπως 10Base2, 10BaseT,

100BaseTX, Ethernet Hub, RG 58, RG 223, S-UTP και S-STP, 10 Mb και 100 Mb. Οι υπολογιστές θωρακίσθηκαν με απορροφητικά τοιχώματα, προκειμένου να ελαττωθούν τα φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.



Εικόνα 14: Διάταξη δοκιμών σε δίκτυο υπολογιστών [9]

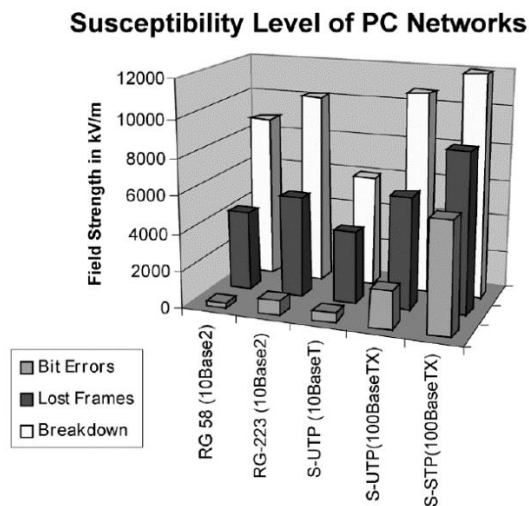
Η γραμμή μεταφοράς δεδομένων εκτέθηκε σε παλμούς υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) και καταγράφηκε ο αριθμός των σφαλμάτων στα bits, τα χαμένα πλαίσια (frames) και οι γενικότερες βλάβες στους υπολογιστές. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η στιγμή της σύγκρουσης μεταξύ των bits του σήματος δικτύου και ενός παλμού υπερ-ευρείας ζώνης (UWB).



Εικόνα 15: Σύγκρουση μεταξύ των bits του σήματος δικτύου και ενός παλμού UWB [9]

Το πλάτος του συζευγμένου παλμού που προέκυψε από τη σύζευξη ενός παλμού υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) 12 KV/m σε ένα καλώδιο τύπου RG 58 συζευγμένου παλμού ήταν 90 V.

Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του UWB παλμού που οδήγησε σε σφάλματα κατά τη μετάδοση των bits, σε απώλεια frames ή σε βλάβες στο δίκτυο, απεικονίζονται στην επόμενη εικόνα.



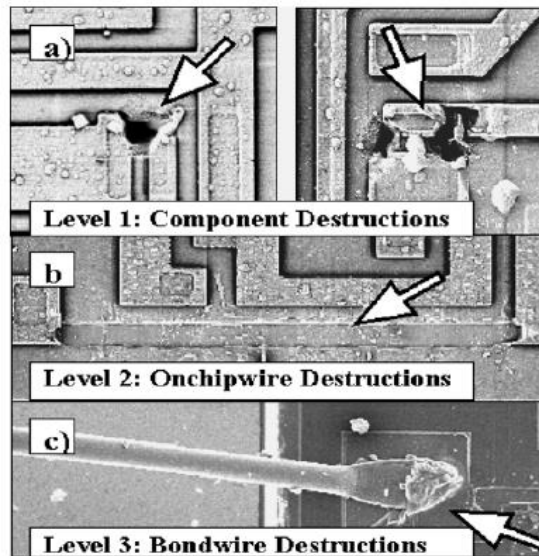
Εικόνα 16: Επίπεδα ευαισθησίας σε δίκτυα υπολογιστών [9]

Σφάλματα στη μετάδοση των bits προέκυψαν όταν το πλάτος του συζευγμένου παλμού ήταν συγκρίσιμο με το επίπεδο τάσης των bits. Απώλεια σε frames δεδομένων παρατηρήθηκε όταν σημαντικό μέρος του frame καταστράφηκε από τον συζευγμένο παλμό. Το φαινόμενο αυτό επιδεινώθηκε γραμμικά, καθώς αυξάνονταν η συχνότητα επανάληψης των παλμών (pulse repetition frequency – PRF). Τέλος, βλάβη στο δίκτυο μπορεί να προκληθεί όταν ο συζευγμένος παλμός είναι τόσο υψηλός, ώστε να προκαλέσει απενεργοποίηση ή επανεκκίνηση στο υλικό του δικτύου. Γενικά, η ευαισθησία του δικτύου εξαρτάται σημαντικά από την αποτελεσματικότητα της θωράκισης των καλωδίων του δικτύου και τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία.

Η ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του UWB παλμού, έτσι ώστε να προκληθούν σφάλματα στη μετάδοση των bits ήταν 200 V/m, για απώλεια frames 4 KV/m και για πρόκληση βλαβών στο υλικό του δικτύου 6 KV/m.

2.2.4.6 Μικροσκοπική Ανάλυση των Βλαβών

Η μικροσκοπική ανάλυση των βλαβών, οδηγεί σε τρία επίπεδα βλαβών.



Εικόνα 17: Βλάβες σε επίπεδο κυκλώματος [9]

Στο πρώτο επίπεδο (Level 1), μόνο ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος, όπως διόδοι και τρανζίστορες υπέστησαν βλάβη, κυρίως λόγω επιφανειακής διάσπασης (flashover). Με αύξηση του πλάτους του παλμού κατά 50 %, παρατηρήθηκαν περαιτέρω βλάβες στο κύκλωμα, όπως τήξη των γραμμών σύνδεσης, χωρίς φαινόμενα επιφανειακής διάσπασης (Level 2). Περαιτέρω αύξηση του πλάτους του παλμού οδήγησε σε βλάβες στις συνδέσεις και σε εξαρτήματα, όπως τρανζίστορες, διόδοι και αντιστάσεις (Level 3).

2.2.5 Συμπεράσματα

Στην επόμενη εικόνα συνοψίζονται τα όρια ευαισθησίας, δηλαδή η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την εμφάνιση διαταραχής στη λειτουργία διαφόρων ειδών τεχνολογικού εξοπλισμού.

EUT	UWB in kV/m	EMP in kV/m	HPM in kV/m
Logic Devices	25 (75)	120	
Microcontroller	7.5	42	
Microprocessor Boards	4	25	0.2
PC Systems	12		
PC Networks	0.2	0.5	

Πίνακας 6: Βλάβες σε επίπεδο κυκλώματος [9]

Γενικά το όριο ευαισθησίας μειώνεται, καθώς αυξάνεται η πολυπλοκότητα του υπό δοκιμή εξοπλισμού. Τα πειράματα έδειξαν ότι οι παλμοί υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) έχουν επαρκή ενέργεια να προκαλέσουν καταστροφή στη δομή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

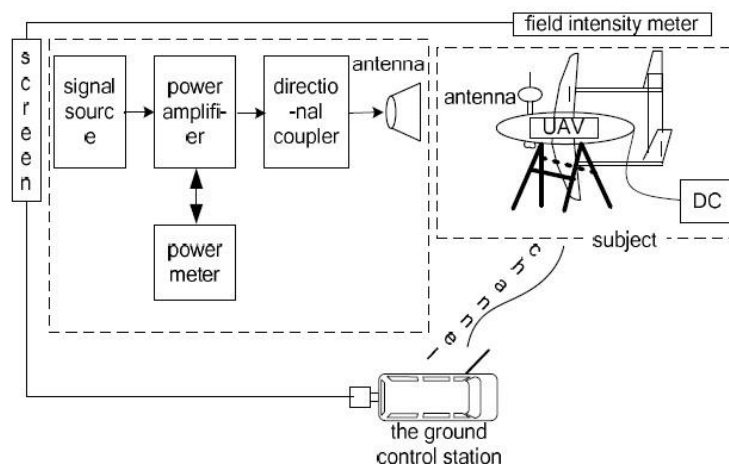
2.3 Δοκιμές Τρωτότητας Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων σε Σκόπιμες Ηλεκτρονικές Παρεμβολές με Συνεχείς Μικροκυματικές Κυματομορφές

Στην έρευνα αυτή, πραγματοποιήθηκαν από τους Y. Chen, D. Zhang, E. Cheng, και X. Wang [11] δοκιμές της τρωτότητας ενός MEEO σε ακτινοβολία με συνεχείς μικροκυματικές κυματομορφές (CW) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμη και με πολύ χαμηλές τιμές ηλεκτρικού πεδίου της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, της τάξης του 1 V/m, είναι δυνατή η διατάραξη της επικοινωνίας μεταξύ του εναέριου οχήματος και του επίγειου σταθμού ελέγχου, όταν η συχνότητα της συνεχούς μικροκυματικής κυματομορφής συμπίπτει ή είναι παραπλήσια με την συχνότητα του καναλιού ελέγχου δεδομένων. Επιπλέον, διαταραχή στο κανάλι επικοινωνίας παρατηρήθηκε σε τιμές συχνοτήτων της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, που αντιστοιχούσαν στο 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 της βασικής συχνότητας λειτουργίας, οφειλόμενες σε αρμονικές που παράγονται από μη γραμμικά στοιχεία, όπως ο ενισχυτής εκπομπής της συνεχούς κυματομορφής. Επίσης διερευνήθηκε η σύζευξη (coupling path) μεταξύ της ακτινοβολούμενης συνεχούς κυματομορφής και των συστημάτων του MEEO, που οδηγεί τελικά στη διαταραχή της του καναλιού επικοινωνίας.

2.3.1 Μεθοδολογία Δοκιμών

Σε κάθε MEEO υπάρχουν συνήθως δύο συστήματα ευαίσθητα στις σκόπιμες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές: Το ηλεκτρονικό σύστημα, που περιλαμβάνει τις μονάδες υπολογισμών και ελέγχου πτήσης και το σύστημα επικοινωνίας δεδομένων με την επίγεια μονάδα ελέγχου (τηλεχειριστήριο). Η τρωτότητα του ηλεκτρονικού συστήματος σε σκόπιμες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μπορεί να δοκιμαστεί κατά την πτήση του MEEO και είναι ανεξάρτητη από την απόστασή του από την επίγεια μονάδα ελέγχου, ενώ η τρωτότητα του καναλιού επικοινωνίας εξαρτάται από την απόσταση. Καθώς η απόσταση αυτή αυξάνει, το σήμα του καναλιού επικοινωνίας εξασθενεί, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τρωτότητά του.

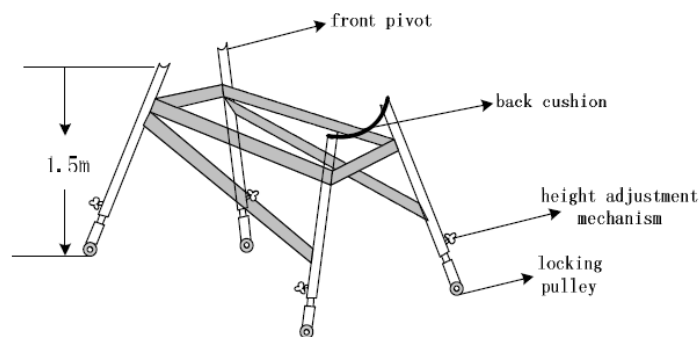
Καθώς οι δοκιμές αυτές ιδανικά πρέπει να πραγματοποιηθούν με το MEEO εν πτήση, ανακύπτουν δύο βασικά προβλήματα: Η συνεχής μεταβολή των συνθηκών πτήσης και της θέσης του ακτινοβολούμενου MEEO και ο κίνδυνος κατάρριψης και καταστροφής του. Για τους λόγους αυτούς, τα πειράματα εκτελέστηκαν με ακίνητο το MEEO, και η ισχύς του καναλιού επικοινωνίας προσομοιώθηκε με την χρήση εξασθενητών. Η ακτινοβολούμενη συνεχής μικροκυματική κυματομορφή είχε συχνότητα μεταξύ 10 MHz και 18 GHz, ενώ το εκπεμπόμενο ηλεκτρικό πεδίο έλαβε τιμές έως 200 V/m.



Εικόνα 18: Υποδομή Πειράματος [11]

Η υποδομή του πειράματος περιλάμβανε τρία τμήματα:

Το σύστημα εκπομπής της συνεχούς μικροκυματικής κυματομορφής με τη γεννήτρια του σήματος, τον ενισχυτή ισχύος και τον κατευθυντικό συζεύκτη με την κεραία, το MEEO και την επίγεια μονάδα ελέγχου, και το σύστημα μέτρησης και απεικόνισης της κατάστασης του MEEO κατά την ακτινοβολήσή του. Το MEEO ήταν τοποθετημένο ακίνητο σε ξύλινη βάση, με τη δυνατότητα να κινείται σε 3 διαστάσεις, ώστε να προσομοιώνει πλήρως τις συνθήκες πτήσης.



Εικόνα 19: Βάση Στήριξης του MEEO [11]

Όταν το MEEO δέχθηκε σκόπιμη ηλεκτρονική παρεμβολή, τέτοια ώστε να αρχίσει να διαταράσσεται η επικοινωνία του με την επίγεια μονάδα ελέγχου (τηλεχειριστήριο), η ένδειξη «Automatic Gain Control – AGC» στην οθόνη απεικόνισης εμφανίζονταν χαμηλή, καταγράφοντας αναλογικά το μέγεθος της παρεμβολής σε σχέση με ένα προκαθορισμένο όριο του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR).

2.3.2 Πειραματικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

Στα επόμενα περιγράφονται διεξοδικά τα πειράματα, τα αποτελέσματά τους, καθώς και η ανάλυση αυτών.

2.3.2.1 Ακτινοβολήση με Συνεχή Κυματομορφή

Προκειμένου να μελετηθεί η τρωτότητα του MEEO στην σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συνεχή κυματομορφή, τέθηκε η λειτουργία του καναλιού επικοινωνίας σε μια κρίσιμη κατάσταση, τέτοια ώστε να προσομοιώνει την πτήση του MEEO σε μέγιστη απόσταση από την επίγεια μονάδα ελέγχου. Επίσης, τέθηκε f_u η συχνότητα του σήματος που εκπέμπει η επίγεια μονάδα ελέγχου προς το MEEO και f_d η συχνότητα του σήματος που εκπέμπει το MEEO προς την επίγεια μονάδα ελέγχου. Τέλος, τέθηκε f η συχνότητα της συνεχούς κυματομορφής που ακτινοβολήθηκε στο MEEO. Οι τιμές της έντασης του ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου που οδήγησαν σε διαταραχή του καναλιού επικοινωνίας απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα,

f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
	$f_1 = f_u$	$2f_2 = f_u$	$3f_3 = f_u$	$4f_4 = f_u$	$5f_5 = f_u$	f_d
E (V/m)	0,94	2,79	15,12	16,21	28,17	2,48

Πίνακας 7: Τιμές του ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου [11]

όπου οι συχνότητες f_1 έως f_6 είναι οι συχνότητες της εκπεμπόμενης συνεχούς κυματομορφής που αποσκοπούσε σε διαταραχή του καναλιού επικοινωνίας. Οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου μετρήθηκαν στο σημείο όπου ήταν τοποθετημένο το MEEO. Από τον πίνακα παρατηρούμε ότι όταν η συχνότητα της εκπεμπόμενης συνεχούς κυματομορφής ήταν ίση ή παρόμοια με την συχνότητα του σήματος που εξέπεμπε η επίγεια μονάδα ελέγχου προς το MEEO f_u , ή με την συχνότητα του σήματος που εξέπεμπε το MEEO προς την επίγεια μονάδα ελέγχου f_d , ακόμη και μια χαμηλή τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της εκπεμπόμενης συνεχούς κυματομορφής ήταν αρκετή να προκαλέσει διαταραχή του καναλιού επικοινωνίας, ενώ αυτό αποκαθίστατο όταν η συχνότητα της εκπεμπόμενης συνεχούς κυματομορφής απέκλινε αρκετά από τη συχνότητα λειτουργίας του καναλιού. Επομένως, μόνο όταν η συχνότητα της εκπεμπόμενης συνεχούς

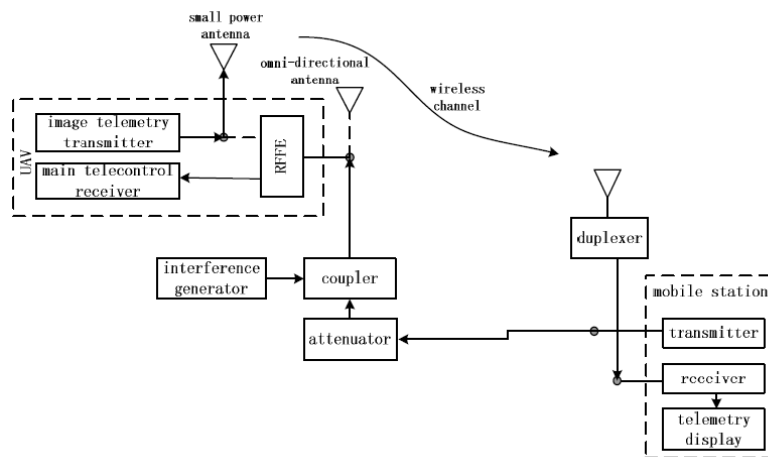
κυματομορφής είχε συγκεκριμένη σχέση με την συχνότητα του καναλιού επικοινωνίας, ήταν δυνατή η διαταραχή του καναλιού.

2.3.2.2 Ανάλυση της Διαδρομής Ηλεκτρομαγνητικής Σύζευξης

Με βάση την κατασκευαστική δομή του MMEO, υπάρχουν τρεις πιθανοί τρόποι σύζευξης της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής που οδηγεί τελικά στην διαταραχή του καναλιού επικοινωνίας:

Η κεραία του MEEO αποτελεί την πιθανή διαδρομή σύζευξης, όταν η συχνότητα λειτουργίας της είναι παραπλήσια με τη συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας διαταραχής. Επιπροσθέτως, ακόμη και όταν οι δύο παραπάνω συχνότητες δεν είναι παραπλήσιες, υπάρχει το ενδεχόμενο της σύζευξης μέσω του διπλέκτη, λόγω της μη ιδανικής συχνοτικής απόδοσής του. Τέλος, η ύπαρξη ανοιγμάτων για εξαερισμό ή έκθεση αισθητήρων στο κέλυφος του MEEO, το οποίο αναπόφευκτα είναι κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό μικρού πάχους, μπορεί να οδηγήσει σε ρυθμό λαθών (bit error rate - BER) του καναλιού επικοινωνίας πάνω από μία οριακή τιμή, προκαλώντας διαταραχή στη λειτουργία του.

Προκειμένου να αποδειχθεί ότι η πιο πιθανή διαδρομή σύζευξης της συνεχούς ακτινοβολίας παρεμβολής συγκεκριμένης συχνότητας περιλαμβάνει αρχικά την κεραία του MEEO και στη συνέχεια το εμπρόσθιο άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE), αποτελούμενο από τον διπλέκτη και τον ενισχυτή, καταλήγοντας στον δέκτη και προκαλώντας τη διαταραχή στο κανάλι επικοινωνίας δεδομένων μεταξύ του δέκτη και της επίγειας μονάδας ελέγχου, χρησιμοποιήθηκε ένας εξασθενητής με είσοδο το σήμα από την επίγεια μονάδα ελέγχου.



Εικόνα 20: Τοπολογία Πειράματος [11]

Ο εξασθενητής ρυθμίστηκε έτσι, ώστε το σήμα της επίγειας μονάδας ελέγχου να έχει ελάχιστη τιμή τέτοια, ώστε να εξασφαλίζεται οριακή λειτουργία του καναλιού επικοινωνίας. Η έξοδος του εξασθενητή στη συνέχεια τροφοδοτήθηκε σε ένα διπλέκτη, μαζί με την συνεχή κυματομορφή παρεμβολής, συχνότητας f . Το συνδυασμένο σήμα εισήχθη στον διπλέκτη του MEEO. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με διάφορες τιμές για τη συχνότητα f και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα

f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
	$f_1 = f_u$	$2f_2 = f_u$	$3f_3 = f_u$	$4f_4 = f_u$	$5f_5 = f_u$	f_d
Στάθμη ισχύος (dBm)	-130	-34	-21	-15	-13	-13
Κατάσταση καναλιού	διαταραχή	διαταραχή	διαταραχή	διαταραχή	λειτουργία	λειτουργία
Αυτόματος Έλεγχος Κέρδους (V)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,69	0,69

Πίνακας 8: Κατάσταση του καναλιού επικοινωνίας για διαφορετικές συχνότητες [11]

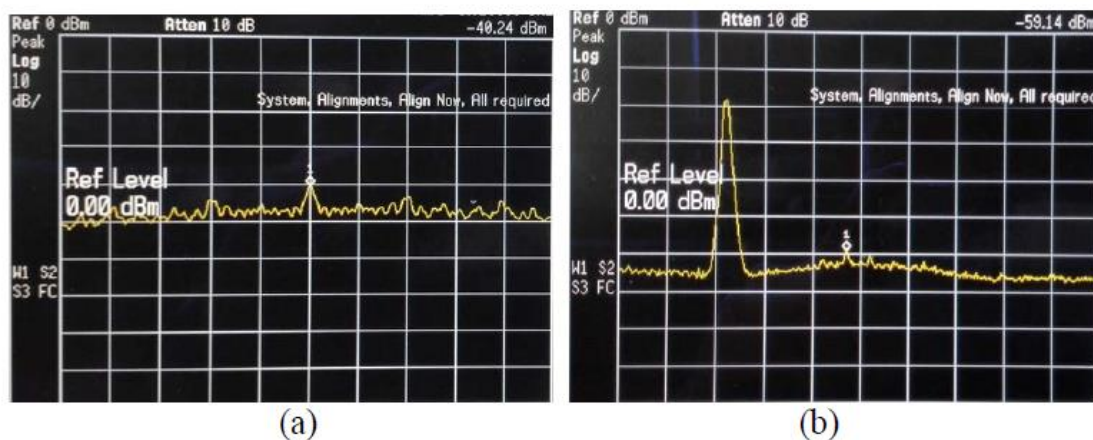
Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται ότι το κανάλι επικοινωνίας δεδομένων του MEEO με την επίγεια μονάδα ελέγχου μπορεί να διαταραχθεί, όταν η συνεχής

μικροκυματική κυματομορφή παρεμβολής που εισέρχεται στον διπλέκτη έχει την ίδια συχνότητα με το σήμα της επίγειας μονάδας ελέγχου που εισέρχεται στον ίδιο διπλέκτη, ακόμη και στην περίπτωση που το δεύτερο έχει υποστεί εξασθένηση της τάξης των -130 dBm. Όταν η συχνότητα της συνεχούς μικροκυματικής κυματομορφής παρεμβολής ελαττώνεται στο 1/2, 1/3 και 1/4 της f_u , η συνεχής μικροκυματική κυματομορφή παρεμβολής που εισέρχεται στον διπλέκτη πρέπει να ενισχυθεί αντίστοιχα, για να καταφέρει να προκαλέσει διαταραχή στη λειτουργία του καναλιού. Όταν δε, η συχνότητα της συνεχούς μικροκυματικής κυματομορφής παρεμβολής ελαττώνεται στο 1/5 της f_u , ακόμη και αν η ισχύς της αυξηθεί στα -13 dBm, αδυνατεί να προκαλέσει διαταραχή στο κανάλι. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι εάν η συνεχής μικροκυματική κυματομορφή παρεμβολής έχει συχνότητα που διαφέρει κατά πολύ από τη συχνότητα λειτουργίας του καναλιού ή έχει πολύ χαμηλή ισχύ, δεν μπορεί να προκαλέσει διαταραχή στη λειτουργία του καναλιού επικοινωνίας δεδομένων μεταξύ του MEEO και της επίγειας μονάδας ελέγχου.

Στη συνέχεια, προκειμένου να διερευνηθεί η συμβολή των αρμονικών συχνοτήτων f_2, f_3, f_4, f_5 της συνεχούς μικροκυματικής κυματομορφής παρεμβολής στην διαταραχή της λειτουργίας του καναλιού, τοποθετήθηκε ένα ζωνοπερατό φίλτρο με κεντρική συχνότητα f_u , και εύρος ζώνης 20 MHz, μεταξύ της γεννήτριας της συνεχούς μικροκυματικής κυματομορφής παρεμβολής και του διπλέκτη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παραπάνω συχνότητες δεν μπορούν να προκαλέσουν διαταραχή στο κανάλι, αλλά προκύπτουν ως αποτέλεσμα της μη γραμμικής λειτουργίας μονάδων του συστήματος παραγωγής της συνεχούς μικροκυματικής κυματομορφής παρεμβολής, όπως πχ ο ενισχυτής. Άρα, συμπεραίνεται ότι μόνο η συνεχής μικροκυματική κυματομορφή παρεμβολής με συχνότητα παραπλήσια της συχνότητας λειτουργίας του καναλιού καταφέρνει να ακολουθήσει τη διαδρομή σύζευξης μέσω της κεραίας και του διπλέκτη και να φτάσει στο MEEO προκαλώντας διαταραχή στο κανάλι επικοινωνίας δεδομένων. Η έξοδος του σήματος από το εμπρόσθιο άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE), μετρήθηκε με αναλυτή φάσματος (spectrum analyzer), τόσο

με την ύπαρξη σήματος σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, όσο και χωρίς. Αυτό έγινε προκειμένου να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του σήματος από την επίγεια μονάδα ελέγχου με και χωρίς την ύπαρξη της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, και αφού αυτό πέρασε από την κεραία του MEEO και τον διπλέκτη.

Το σήμα της επίγειας μονάδας ελέγχου έφτασε στην κεραία του MEEO και στη συνέχεια πέρασε στο RFFE, (a) χωρίς την παρουσία της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, όπου η μετρούμενη ισχύς του σήματος ήταν -54 dBm και η συχνότητά του ήταν f_u , ενώ μετά την επεξεργασία του από το RFFE, η ισχύς του ήταν $-40,24$ dBm, και (b) με την παρουσία της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, με ισχύ -14 dBm και συχνότητα 10 MHz χαμηλότερη της f_u . Στην περίπτωση αυτή, η μετρούμενη ισχύς του σήματος από την επίγεια μονάδα ελέγχου ελαττώθηκε από $-40,24$ dBm σε $-59,14$ dBm πριν και μετά από την επεξεργασία του από το RFFE αντίστοιχα.

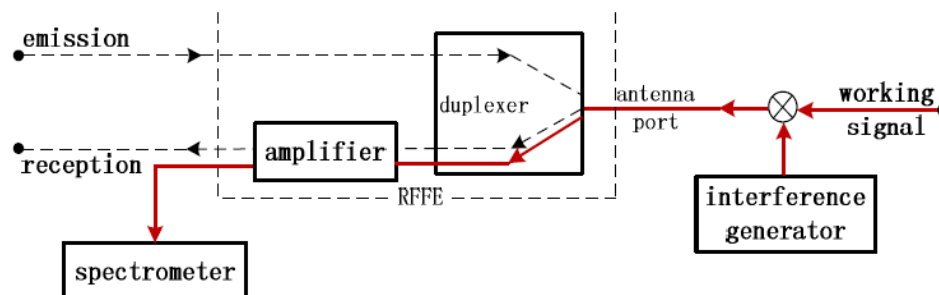


Εικόνα 21: Σήμα Εξόδου του RFFE. (a) χωρίς την παρουσία της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, (b) με την παρουσία της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής [11]

Επομένως, φαίνεται καθαρά ότι η σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή συγκεκριμένης συχνότητας, εισέρχεται στο MEEO χρησιμοποιώντας ως κύρια διαδρομή σύζευξης την κεραία και το εμπρόσθιο άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE), αποτελούμενο από τον διπλέκτη και τον ενισχυτή.

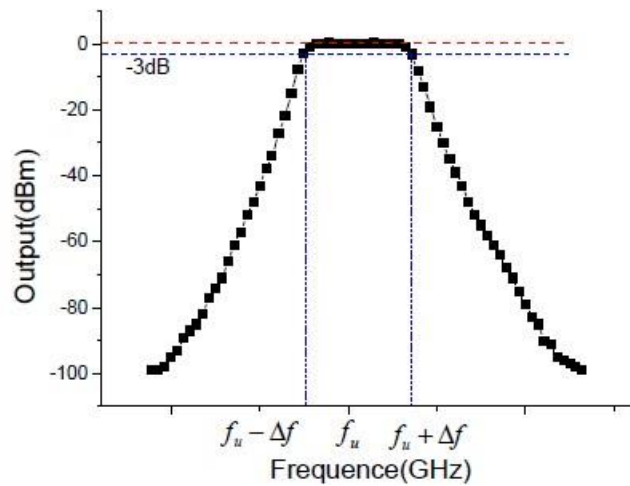
2.3.2.3 Μηχανισμός Επίδρασης της Σκόπιμης Ηλεκτρομαγνητικής Παρεμβολής

Το εμπρόσθιο άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE) έχει τρεις θύρες: Η πρώτη χρησιμοποιείται για τη σύνδεση με την κεραία, η δεύτερη χρησιμοποιείται για τη σύνδεση με το δέκτη και τη μεταφορά του σήματος από την επίγεια μονάδα ελέγχου (τηλεχειριστήριο) και η τρίτη για τη σύνδεση με τον πομπό για τη μεταφορά σημάτων τηλεμετρίας από το MEEO. Θεωρητικά, ο διπλέκτης εντός του RFFE μπορεί να αποκόψει το σήμα της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και να απομονώσει το σήμα από το τηλεχειριστήριο. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν είχαν ως στόχο την εκτίμηση της απόκρισης συχνότητας του RFFE και της ικανότητας του να δημιουργεί απομόνωση. Όπως αποδείχθηκε, το σήμα της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής με συγκεκριμένη συχνότητα, κατάφερε να περάσει από το RFFE και να προκαλέσει διαταραχή στο κανάλι επικοινωνίας δεδομένων του MEEO με την επίγεια μονάδα ελέγχου (τηλεχειριστήριο). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, το σήμα του τηλεχειριστηρίου εισήχθη στη θύρα σύνδεσης του διπλέκτη με την κεραία και μεταφέρθηκε στο διπλέκτη. Το σήμα εξόδου του RFFE μετρήθηκε στη θύρα του δέκτη.



Εικόνα 22: Τοπολογία δοκιμών συχνότητας [11]

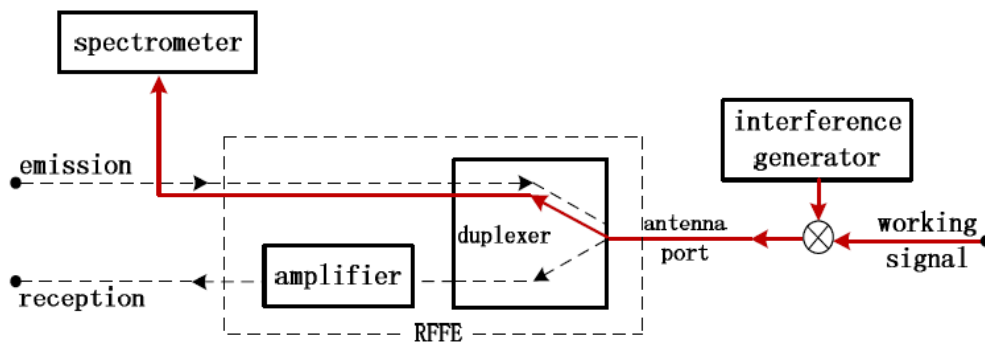
Για να γίνει ακριβής σύγκριση του σήματος εξόδου με το σήμα από το τηλεχειριστήριο, η ισχύς του σήματος εξόδου καθορίστηκε σε 0 dBm, και αναλόγως ρυθμίστηκε η ισχύς του σήματος εισόδου, στα - 22 dBm.



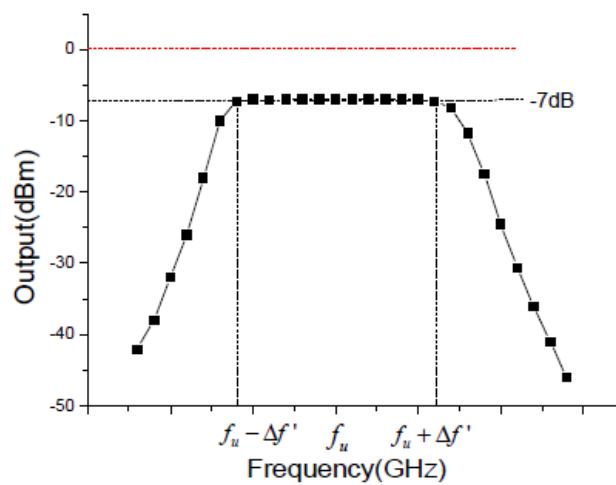
Εικόνα 23: Απόκριση Συχνότητας του RFFE [11]

Όπως διαπιστώθηκε, το RFFE επέφερε ενίσχυση του σήματος από -22dBm σε 0 dBm, εξ αιτίας του ενισχυτή που ήταν συνδεδεμένος σε σειρά με το υπόλοιπο κύκλωμα, όταν το σήμα εισόδου έχει το ίδιο εύρος συχνοτήτων με το τηλεχειριστήριο. Το σήμα εισόδου εξασθενούσε σταδιακά από τον διπλέκτη όταν η συχνότητά του διέφερε από τη συχνότητα του σήματος του τηλεχειριστηρίου. Όταν η συχνότητα της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ήταν παραπλήσια με τη συχνότητα του σήματος του τηλεχειριστηρίου, δεν υφίστατο μεγάλη εξασθένηση από το διπλέκτη και ήταν δυνατόν να διαταράξει το κανάλι επικοινωνίας. Όπως προέκυψε από τα πειράματα, το εύρος ζώνης των 3 dB του RFFE είναι προσεγγιστικά 30 MHz, λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων λειτουργίας των καναλιών.

Η εκτίμηση της ικανότητας του RFFE να προκαλεί απομόνωση του σήματος, δοκιμάστηκε στο σήμα εξόδου από τη θύρα του πομπού, όταν σήματα διαφόρων συχνοτήτων, με ισχύ 0 dBm εισήλθαν στη θύρα σύνδεσης με την κεραία στο διπλέκτη.



Εικόνα 24: Τοπολογία δοκιμών απομόνωσης [11]



Εικόνα 25: Ικανότητα απομόνωσης του RFFE [11]

Όπως διαπιστώθηκε, το εισερχόμενο σήμα στην θύρα της κεραίας, το οποίο θα μπορούσε να απομονωθεί από την θύρα του πομπού, συζεύχθηκε στη θύρα αυτή με διαφορετική εξασθένιση, η οποία εξαρτάτο από την συχνότητα του εισερχόμενου σήματος. Όταν το εισερχόμενο σήμα είχε την ίδια συχνότητα με το σήμα τηλεμετρίας, υφίστατο εξασθένιση μόνο κατά 7 dB από το RFFE. Αύξηση της απόκλισης στις τιμές των συχνοτήτων, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόσβεσης. Το εισερχόμενο σήμα ίδιας συχνότητας με το σήμα του τηλεχειριστηρίου, ήταν πιθανό να εξασθενήσει κατά 40 dB, ενώ διέρχονταν εύκολα από τη θύρα του δέκτη. Σημειώνεται ότι για λόγους ασφαλείας και αποφυγής διαταραχών, απαιτείται από το RFFE να αυξήσει την αρνητική απομόνωση στα 40 dBm. Επομένως, όταν το σήμα του τηλεχειριστηρίου δέχεται σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική

παρεμβολή από μία συνεχή κυματομορφή της οποίας η συχνότητα είναι παρόμοια με αυτή του σήματος τηλεμετρίας, το σήμα της σκόπιμης παρεμβολής μπορεί να φτάσει στο δέκτη και να προκαλέσει διαταραχή του καναλιού επικοινωνίας δεδομένων με την επίγεια μονάδα ελέγχου.

2.3.3 Συμπεράσματα

Είναι πολύ σημαντικό για το MEEO να διατηρεί συνεχώς την επικοινωνία με την επίγεια μονάδα ελέγχου (τηλεχειριστήριο), ακόμη και σε περιβάλλον σκόπιμων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Μία προηγμένη μέθοδος εκτίμησης της τρωτότητας του MEEO στις παρεμβολές αυτές είναι η χρήση εξασθενητών που προσομοιώνουν διαφορετικές συνθήκες επικοινωνίας. Σύμφωνα με τα πειράματα, το κανάλι επικοινωνίας δεδομένων μεταξύ του MEEO και του τηλεχειριστηρίου μπορεί να διαταραχθεί, όταν το MEEO ακτινοβοληθεί σκόπιμα με συνεχή κυματομορφή (CW), συχνότητας ίδιας ή παραπλήσιας με τη συχνότητα του σήματος από το τηλεχειριστήριο. Η διαδρομή σύζευξης που δημιουργείται μεταξύ της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και του MEEO περιλαμβάνει κυρίως το εμπρόσθιο άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE), μέσω της κεραίας. Η παρεμβολή μπορεί να εισέλθει στο εσωτερικό του MEEO, να διαταράξει το σήμα από το τηλεχειριστήριο, προκαλώντας υψηλό ρυθμό λαθών (bit error rate – BER) στο κανάλι επικοινωνίας δεδομένων, και τελικά να το θέσει εκτός λειτουργίας, καθώς στην περίπτωση αυτή, το RFFE δεν έχει τη δυνατότητα να αποσβέσει τη σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

2.4 Απόκριση του Συστήματος Αισθητήρων του Μη Επανδρωμένου Εναέριου Οχήματος σε Επιθέσεις με Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό Υψηλής Ισχύος

Στην έρευνα αυτή, μελετήθηκε από τους G. Lubkowski, M. Lanzrath, L. C. Lavau, και M. Suhrke [3], η επίδραση της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής με Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό Υψηλής Ισχύος (High Power Electromagnetics - HPEM) στους αισθητήρες ενός MEEO, και συγκεκριμένα ενός εμπορικού τετρακόπτερου (quadcopter).

2.4.1 Τοπολογία Πειραμάτων

Το MEEO, διαμέτρου 50 cm, τοποθετήθηκε ακινητοποιημένο, χωρίς τους έλικες, μέσα σε ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένο θάλαμο μαζί με το τηλεχειριστήριο, χωρίς την παρουσία σήματος GPS. Η ακτινοβολία που εφαρμόστηκε σκόπιμα, παράχθηκε από χοανοκεραία και είχε τη μορφή ηλεκτρομαγνητικού παλμού υψηλής ισχύος στενής ζώνης με συχνότητες μεταξύ 100 MHz και 3,4 GHz. Στο πεδίο του χρόνου ο παλμός αυτός αντιστοιχεί σε συνεχή κυματομορφή, διαμορφωμένη από έναν τετραγωνικό παλμό, τυπικό ενός radar, με διάρκεια 1 μsec και συχνότητα επανάληψης (pulse repetition frequency – PRF) 1 KHz. Οι τιμές της έντασης του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου ήταν κατά πολύ υψηλότερες σε σχέση με τα τυπικά επίπεδα ατρωσίας ενός MEEO και ο χρόνος που απαιτούνταν για την επίτευξη της μέγιστης τιμής πεδίου ήταν περίπου 20 μsec .



Εικόνα 26: Τοποθέτηση του MMEO εντός του θαλάμου [3]

Προηγούμενη σχετική έρευνα [12] έδειξε ότι για τιμές έντασης του ηλεκτρικού πεδίου έως 10 V/m και συχνότητες τυπικές ενός ραδιοσταθμού ισχύος (470 MHz - 862 MHz) ή εντός του φάσματος λειτουργίας ISM και GPS (1,4 GHz - 2,7 GHz), δεν παρατηρήθηκαν κρίσιμα σφάλματα στους αισθητήρες και στα υποσυστήματα του MEEO.

Σε άλλη έρευνα [13], για τιμές έντασης του ηλεκτρικού πεδίου έως 30 V/m και συχνότητες μεταξύ 80 MHz και 9,375 GHz, δεν παρατηρήθηκαν κρίσιμα σφάλματα στους αισθητήρες και στα υποσυστήματα του MEEO.

Τέλος, έρευνα [14] για τιμές έντασης του ηλεκτρικού πεδίου έως 100 V/m και συχνότητες μεταξύ 100 MHz και 2 GHz, ανέδειξε την παρουσία σφαλμάτων στον αισθητήρα καταγραφής της θερμοκρασίας της μπαταρίας και τον αισθητήρα καταγραφής της κατακόρυφης ταχύτητας του MEEO.

Η συμπεριφορά του MEEO στην ακτινοβολία μελετήθηκε με τη χρήση θωρακισμένων καμερών που παρακολουθούσαν τις φωτεινές ενδείξεις του MEEO σχετικά με την κατάσταση του ελεγκτή πτήσης, τη στάθμη της μπαταρίας, την ισχύ του σήματος επικοινωνίας με το τηλεχειριστήριο και την κατάσταση της κάμερας. Η καταγραφή της ταχύτητας των κινητήρων έγινε μέσω οπτικών ινών και με μικροελεγκτή με λογισμικό σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Τα μηνύματα κατάστασης του τηλεχειριστηρίου, το οποίο ήταν τοποθετημένο μαζί με το MEEO εντός του χώρου διεξαγωγής των πειραμάτων, μεταφέρονταν σε πραγματικό χρόνο σε οθόνη, με τη χρήση ειδικής εφαρμογής. Τα δεδομένα αυτά συνδυάστηκαν με την εξαγωγή των αρχείων πτήσης (flight records) από το MEEO.

2.4.2 Αποτελέσματα

Τα σφάλματα που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σχετικά με την επίδραση της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στη λειτουργία του MEEO, κατηγοριοποιήθηκαν ως εξής:

N – Δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση, το MEEO λειτουργούσε κανονικά.

I – Ήπιες διακυμάνσεις στην ταχύτητα των κινητήρων ή στη συνδεσιμότητα του MEEO με το τηλεχειριστήριο, χωρίς να αποσταθεροποιούν την πτήση του. Επίσης, εμφάνιση σφαλμάτων στο μαγνητόμετρο και στην πυξίδα, τυχαίες κινήσεις της κάμερας και απώλεια της μεταδιδόμενης εικόνας.

II – Μεγάλες ή απότομες μεταβολές στην ταχύτητα των κινητήρων, μείωση της αξιοπιστίας και της πτητικής ικανότητας με αυξημένη πιθανότητα πτώσης υπό κανονικές συνθήκες πτήσης.

III – Διακοπή της λειτουργίας ενός ή περισσότερων κινητήρων, απώλεια των βασικών λειτουργιών και τελικά πτώση του MEEO. Εμφάνιση κρίσιμων σφαλμάτων στο τηλεχειριστήριο και μεταβολές στις φωτεινές ενδείξεις της κατάστασης του MEEO.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν ως εξής:

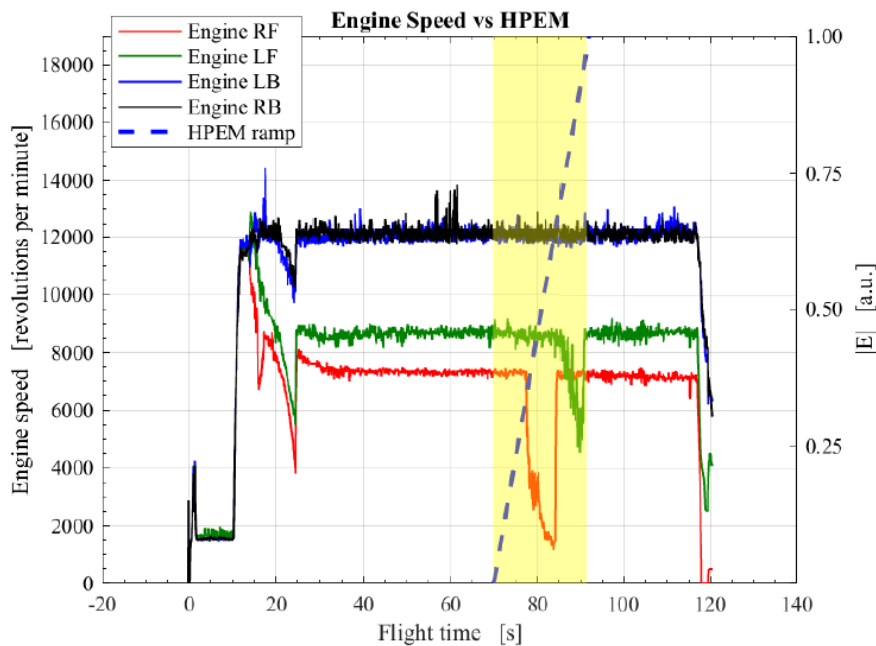
· $0 < t < 10$ sec: Εκκίνηση κινητήρων σε σχετικά χαμηλή ταχύτητα. Το MEEO παραμένει στο έδαφος σε κατάσταση ηρεμίας (idle mode).

· $10 < t < 25$ sec: Το MEEO ανασηκώνεται χειροκίνητα από τον χειριστή σε ύψος περίπου 1 m. Η ταχύτητα των κινητήρων αυξάνει και η κατάσταση αυτή αναγνωρίζεται από το MEEO ως κατάσταση πτήσης. Το MEEO τοποθετείται σε ξύλινη βάση, με τρόπο τέτοιο, ώστε οι αισθητήρες του να μην αναγνωρίζουν ότι αυτό βρίσκεται ακόμη στο έδαφος και το εξαναγκάσουν να επανέλθει σε κατάσταση ηρεμίας.

· $70 < t < 90$ sec: Εφαρμόζεται η σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή πάνω στο MEEO.

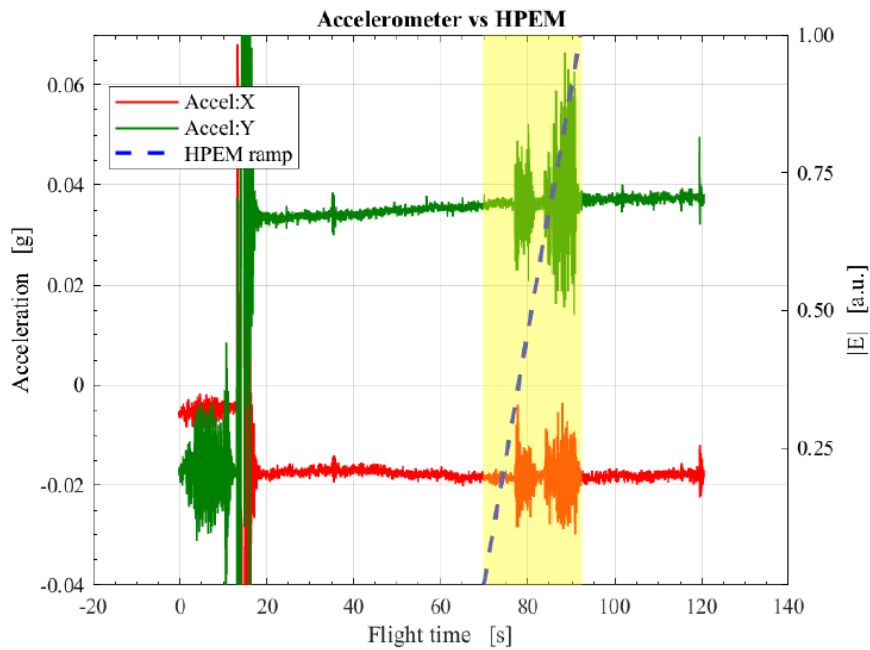
· $90 < t < 115$ sec: Σταματά η εφαρμογή της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και ενώ το MEEO είναι σε κατάσταση πτήσης, δίνεται η εντολή για προσγείωση και το MEEO σβήνει τους κινητήρες του. Σε περίπτωση που η σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή προκάλεσε σοβαρά σφάλματα στη λειτουργία του MEEO, γίνεται χειροκίνητη επανεκκίνησή του και η διαδικασία ξεκινά από την αρχή, με χαμηλότερη τιμή στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής.

Ένα παράδειγμα σφάλματος τύπου II αποτελεί το εξής: Σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας πτήσης, η ταχύτητα των κινητήρων του MEEO κυμαίνεται μεταξύ 7000 rpm και 12000 rpm. Κατά τη διάρκεια εφαρμογής της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, η ταχύτητα του μπροστά-δεξιού κινητήρα μειώνεται από 7500 rpm σε 2000 rpm και η ταχύτητα του μπροστά-αριστερού κινητήρα μειώνεται από 9000 rpm σε 5000 rpm. Μετά το τέλος της εφαρμογής της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, η ταχύτητα των κινητήρων αποκαθίσταται.

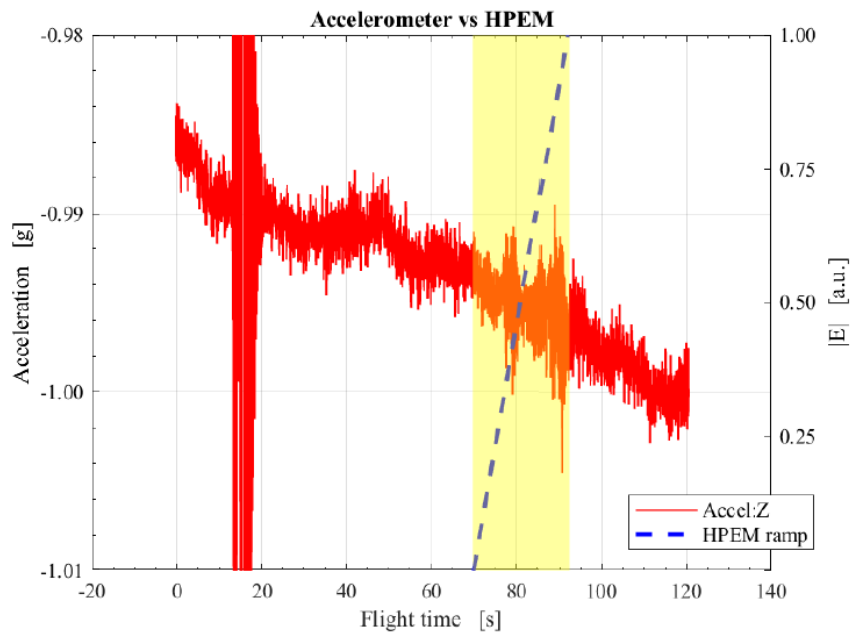


Εικόνα 27: Ταχύτητα των κινητήρων του MEEO [3]

Μελέτη των ενδείξεων του επιταχυνσιόμετρου κατά την διάρκεια της εφαρμογής της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, έδειξε ότι, οι τιμές της οριζόντιας διαταραχής έφταναν τα 0,04 gr, με φυσιολογικές τιμές μεταξύ 0,02 gr και 0,06 gr. Το ερώτημα που τέθηκε ήταν εάν οι ενδείξεις αυτές οφείλονταν πράγματι στην εφαρμογή της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, η σε δονήσεις ως αποτέλεσμα της αυξομείωσης της ταχύτητας των κινητήρων. Αυτό απαντήθηκε από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν παρατηρήθηκε καταγραφή κατακόρυφης διαταραχής από το επιταχυνσιόμετρο. Επομένως, η οριζόντια ένδειξη οφείλονταν στον τρόπο με τον οποίο είχε στερεωθεί το MEEO στη βάση, ο οποίος επέτρεπε μεγαλύτερη κίνηση στον οριζόντιο από ό,τι στον κατακόρυφο άξονα, λόγω των κραδασμών στους κινητήρες.



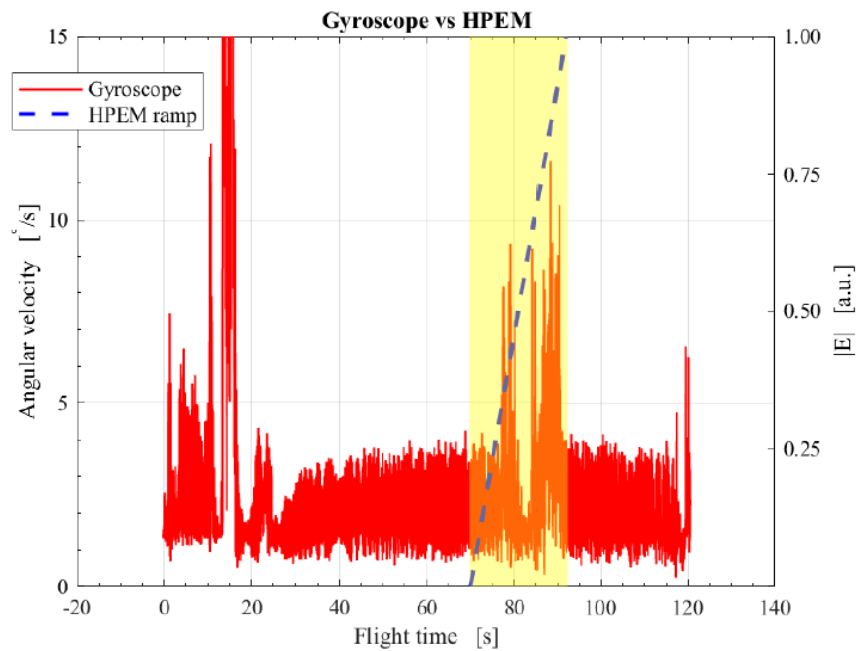
Εικόνα 28: Ενδείξεις επιταχυνσιόμετρου στον οριζόντιο άξονα [3]



Εικόνα 29: Ενδείξεις επιταχυνσιόμετρου στον κατακόρυφο άξονα [3]

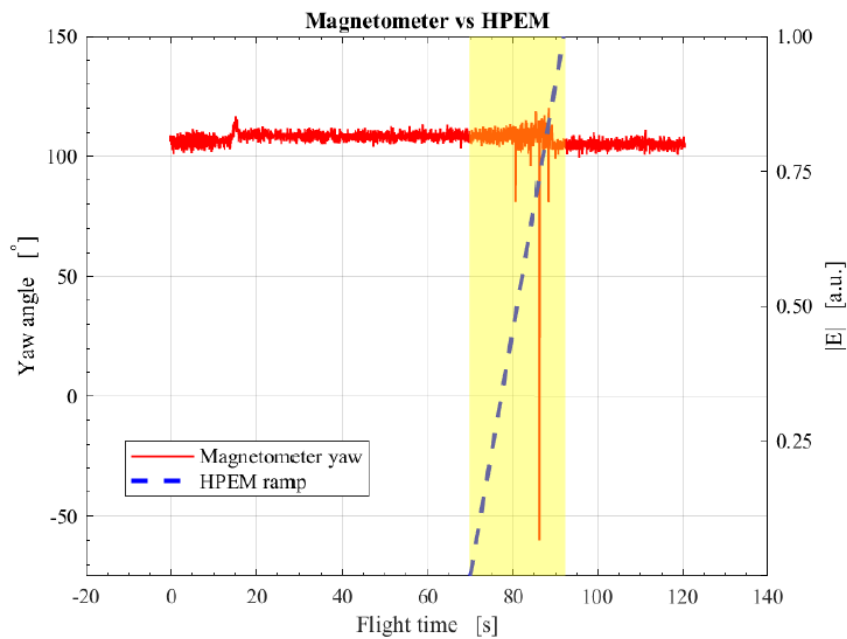
Μικρή μεταβολή επίσης, της τάξης του 10%, παρατηρήθηκε στις ενδείξεις του γυροσκοπίου, κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής

παρεμβολής, αλλά και αυτό φάνηκε να οφείλεται σε δονήσεις ως αποτέλεσμα της αυξομείωσης της ταχύτητας των κινητήρων.



Εικόνα 30: Ενδείξεις γυροσκοπίου [3]

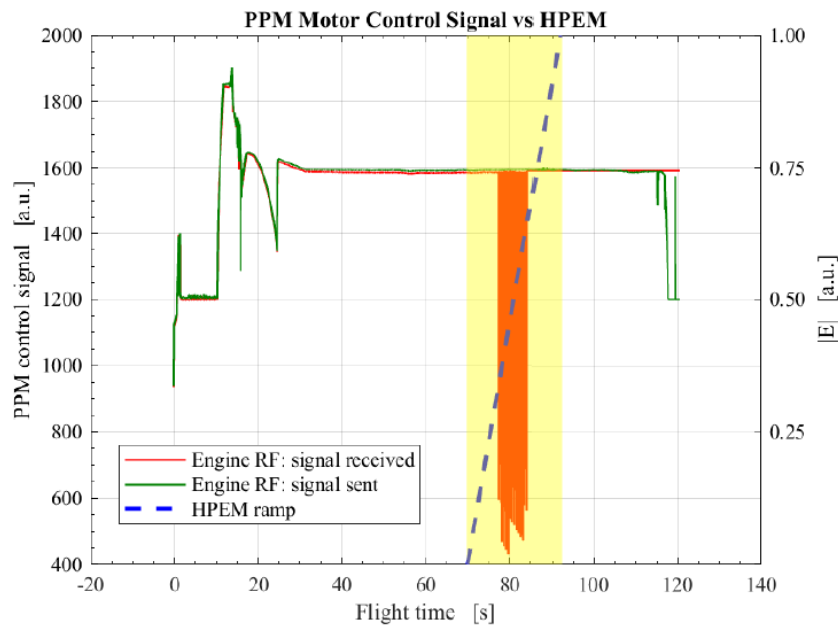
Η σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή έδειξε να επηρεάζει ελαφρώς τις ενδείξεις του μαγνητόμετρου, ενώ δεν είχε καμία επίδραση στις ενδείξεις του βαρομέτρου και στη λειτουργία του συστήματος αποφυγής εμποδίων, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση υλοποιούνταν από οπτικούς αισθητήρες και αισθητήρες υπερήχων.



Εικόνα 31: Ενδείξεις μαγνητόμετρου [3]

Επομένως, ο μοναδικός αισθητήρας που επηρεάστηκε άμεσα από την εφαρμογή της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ήταν το γυροσκόπιο, ενώ οι μεταβολές στις ενδείξεις των υπόλοιπων αισθητήρων αποδείχθηκε ότι οφείλονταν σε δονήσεις ως αποτέλεσμα της αυξομείωσης της ταχύτητας των κινητήρων.

Το τελικό ερώτημα που τίθεται είναι πώς η σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή επηρεάζει την ταχύτητα των κινητήρων. Από την μελέτη των δεδομένων πτήσης προκύπτει ότι οι κινητήρες που επηρεάζονται είναι μόνο οι δύο μπροστινοί και αυτό μάλλον οφείλεται (χωρίς ακόμη να μπορεί να αποδειχθεί λόγω της μη αναστρέψιμης ζημίας που προκλήθηκε στο MEEO κατά τη διάρκεια των πειραμάτων) στην υπόθεση ότι δημιουργείται διαδρομή σύζευξης της εφαρμοζόμενης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής από το εμπρόσθιο τμήμα του MEEO μεταξύ του δέκτη του τηλεχειριστηρίου και του κυκλώματος του ελεγκτή πτήσης.



Εικόνα 32: Ενδείξεις των κινητήρων [3]

2.4.3 Συμπεράσματα

Στην παρούσα έρευνα εξετάστηκε η τρωτότητα του συστήματος αισθητήρων του MEEO σε σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, προερχόμενη από υψηλής ισχύος ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς στενής ζώνης. Το σημαντικότερο φαινόμενου που παρατηρήθηκε ήταν παρεμβολή στο σήμα ελέγχου της ταχύτητας των κινητήρων του MEEO. Η ραγδαία μεταβολή της ταχύτητας των κινητήρων είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κραδασμών στο MEEO, στους οποίους οφείλονταν οι αποκλίσεις στις ενδείξεις των αισθητήρων του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου. Ωστόσο, η σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή επηρέασε άμεσα τη λειτουργία των ενδείξεων του μαγνητόμετρου, ενώ δεν είχε καμία επίδραση στις ενδείξεις του βαρόμετρου και του συστήματος αποφυγής εμποδίων.

2.5 Μελέτη της Επίδρασης Ηλεκτρομαγνητικού Παλμού Υπερ-Ευρείας Ζώνης σε Εμπορικά Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα

Στην έρευνα αυτή, μελετήθηκε από τους K. Yu Sakharov, A. V. Sukhov, V. L. Ugolev, και Yu. M. Gurevich [15], η επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού παλμού υπερ-ευρείας ζώνης
 Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Δημήτρης Μπιζιούρας, AM DCOM-13

(Ultra-Wide Band – UWB) σε εμπορικά MEEO, κατηγοριοποιήθηκαν τα σφάλματα που προκλήθηκαν σε αυτά, και σκιαγραφήθηκαν τα χαρακτηριστικά ενός πρότυπου ακτινοβολητή για την παραγωγή σκόπιμων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Η χρήση τέτοιων φορητών συστημάτων, που διαταράσσουν τη λειτουργία του καναλιού επικοινωνίας δεδομένων του MEEO με την επίγεια μονάδα ελέγχου (jamming) συνεχώς κερδίζει έδαφος, καθώς αυτά δεν απαιτούν συστήματα οδήγησης υψηλής ακρίβειας, είναι επαναχρησιμοποιήσιμα, και έχουν σχετικά εύκολη χρήση και χαμηλό κόστος [16]. Το πρόβλημα όμως, είναι ότι τα MEEO έχουν τη δυνατότητα (εγγενώς ή μετά από αναβάθμιση) να χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες για την επικοινωνία με το τηλεχειριστήριο και την μετάδοση εικόνας. Επίσης, τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GPS) μπορούν να υποκατασταθούν από αδρανειακά συστήματα, ανθεκτικά σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Κατά κανόνα, τα συστήματα anti-drone jamming εκπέμπουν συνεχείς κυματομορφές (CW) σε συχνότητες 2,4/5,8 GHz, GLONASS (1,6 GHz) ή GPS band (1,1 GHz – 1,6 GHz). Με τον τρόπο αυτό χάνεται η επικοινωνία μεταξύ του MEEO και του επίγειου τηλεχειριστηρίου και το MEEO εξαναγκάζεται σε προσγείωση.

Ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός υπερ-ευρείας ζώνης έχει μικρή διάρκεια, της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων psec, με φάσμα συχνοτήτων από δεκάδες MHz έως εκατοντάδες GHz. Οι έως σήμερα γνωστοί ακτινοβολητές μπορούν να παράξουν παλμούς με πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου δεκάδων KV/m σε απόσταση μέχρι και 1 Km [17], [18]. Η σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή αυτής της μορφής περιγράφεται στα πρότυπα IEC 61000-4-36 [19] και IEEE Std. 1642-2015 [20].

2.5.1 Ο Υπό Δοκιμή Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το MEEO Phantom 3 Standard της εταιρείας DJI, με εγκατεστημένο το πιο πρόσφατο υλικολογισμικό (firmware). Το μοντέλο αυτό κυκλοφόρησε συνολικά σε 16900 μονάδες προϊόντος, και είναι ένα από τα πιο δημοφιλή μοντέλα MEEO στις ΗΠΑ. Χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες λειτουργίας 2,4 GHz και 5,8 GHz με άλλα δημοφιλή

μοντέλα, όπως DJI Mavic, DJI Inspire, 3D Robotics, Solo, Yuneec, Typhoon, Parrot Bebop, κ.α.



Εικόνα 33: Το MEEO DJI Phantom 3 Standard πάνω στην εύκαμπτη βάση [15]

Οι βασικές τεχνικές προδιαγραφές του DJI Phantom 3 Standard απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα.

Parameter	Value
Navigation	Built-in GPS
Image and telemetry channel operating frequency, GHz	2.400-2.483
Image and telemetry channel transmitter power, dBm	27 (USA), 20 (CE)
Remote controller operating frequency, GHz	5.725-5.825
Remote controller transmitter power, dBm	19 (USA), 14 (CE)
Maximal transmission distance (outdoor, aircraft's altitude 120 m), m	1000 (USA), 500 (CE)

Πίνακας 9: Τεχνικές προδιαγραφές του DJI Phantom 3 Standard [15]

Το MEEO κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν στερεωμένο σε εύκαμπτη βάση. Το τηλεχειριστήριο ήταν εξοπλισμένο με κεραία μεγάλων αποστάσεων τύπου ITELITE ITE-DBS01, η οποία, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, επεκτείνει το εύρος ελεύθερης λήψης στα 3000 m. Για τον έλεγχο του MEEO χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή DJI GO για λειτουργικό σύστημα Android.

2.5.2 Υποδομή Πειραμάτων

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί ακτινοβολητές (R-1, R-2, R-3), κατασκευασμένοι από το Ρωσικό Ινστιτούτο VNIIOFI [21]. Οι τεχνικές προδιαγραφές τους απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα:

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)

Πίνακας 10: Τεχνικές προδιαγραφές ακτινοβολητών [15]

Από τον πίνακα των τεχνικών προδιαγραφών προκύπτει ότι οι συγκεκριμένοι ακτινοβολητές έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών παλμών υπερ-ευρείας ζώνης μεγάλου πλάτους με χαμηλή συχνότητα επανάληψης (R-1 με PRF = 1 KHz) και μικρού πλάτους με υψηλή συχνότητα επανάληψης (R-2 με PRF = 0,3 MHz και R-3 με PRF=1 MHz).

Ο συντελεστής ποιότητας (Figure of Merit – FOM) είναι

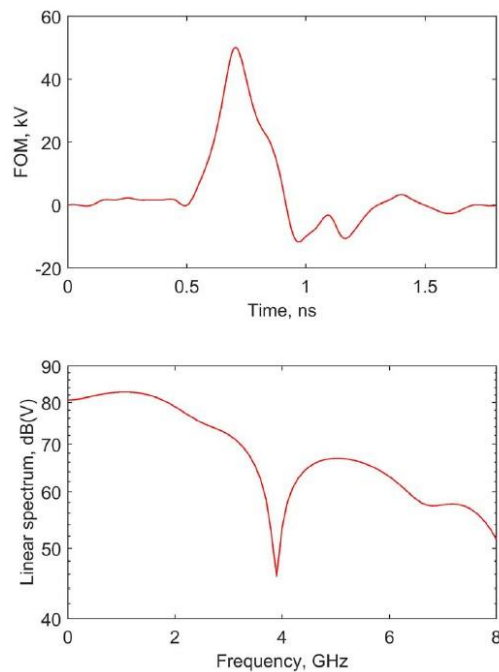
$$FOM = E X R$$

όπου E (KV/m) είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και R (m) είναι η απόσταση από το σημείο εκπομπής. Θεωρώντας ότι στο μακρινό πεδίο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ελαττώνεται με ρυθμό $1/R$, μπορούμε να την υπολογίσουμε για δεδομένη απόσταση R και για δεδομένη τιμή του FOM .

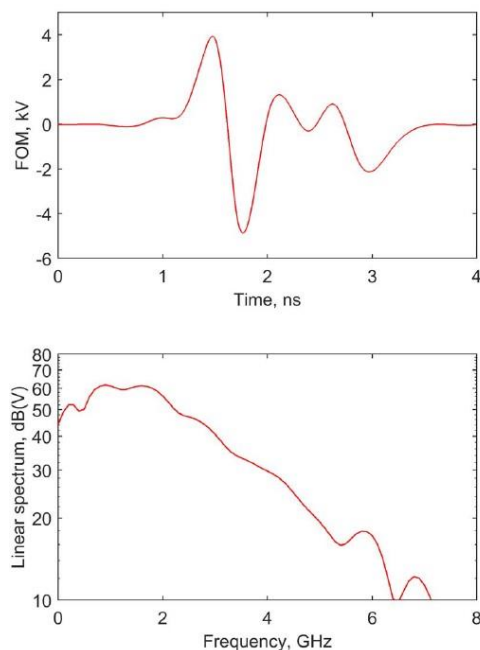
Από την κυματομορφή του ακτινοβολητή R-1, παρατηρούμε ότι το φάσμα του παλμού είναι αρκετά ευρύ και εμφανίζει μέγιστο στα 1 GHz - 2 GHz. Ωστόσο, επειδή γενικά χαρακτηρίζεται από αρκετά υψηλό FOM (έως 50 KV), για συχνότητες 5 GHz - 8 GHz το FOM κυμαίνεται μεταξύ 2 KV και 2,5 KV.

Από την κυματομορφή του ακτινοβολητή R-2, παρατηρούμε ότι το φάσμα του παλμού είναι ελαφρώς πιο στενό, αλλά με συχνότητα επανάληψης (PRF) κατά 30 φορές υψηλότερη. Αυτό οδηγεί σε αντίστοιχα φαινόμενα στο κανάλι επικοινωνίας.

Οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση αισθητήρα τύπου IPPL και παλμογράφου τύπου Tektronix DPO71604C [22].



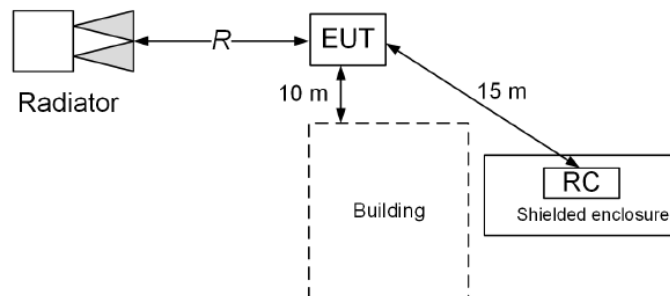
Εικόνα 34: Ακτινοβολητής R-1: Τυπική κυματομορφή και φάσμα [15]



Εικόνα 35: Ακτινοβολητής R-2: Τυπική κυματομορφή και φάσμα [15]

2.5.3 Τοπολογία και Διαδικασία Πειραμάτων

Η τοπολογία των πειραμάτων απεικονίζεται στο επόμενο διάγραμμα



Εικόνα 36: Τοπολογία πειραμάτων [15]

Το υπό δοκιμή ΜΕΕΟ ήταν τοποθετημένο πάνω σε εύκαμπτη βάση, σε απόσταση R από τον ακτινοβολητή και είχε τεθεί σε κατάσταση πτήσης. Το τηλεχειριστήριο τοποθετήθηκε σε ανοιχτό μεταλλικό κουτί για αποφυγή παρεμβολών από το σκόπιμο ηλεκτρομαγνητικό παλμό που προορίζονταν για το ΜΕΕΟ.

Το ύψος του παλμού, καθώς και τα σφάλματα που προκαλούσε, καταγράφονταν συνεχώς, ενώ εάν δεν παρατηρούνταν σφάλματα ή διαταραχές στη λειτουργία του ΜΕΕΟ, ελαττώνονταν η απόστασή του R από τον ακτινοβολητή, έως ότου εντοπιστούν οι οριακές τιμές των E και R για τις οποίες παρατηρούνταν διαταραχές και σφάλματα στο ΜΕΕΟ.

2.5.4 Αποτελέσματα

Τα σφάλματα που καταγράφηκαν ήταν δύο τύπων:

Τύπος	Σήμα Τηλεμετρίας	Συμπεριφορά ΜΕΕΟ	Αναστρεψιμότητα
A	«Απώλεια Σήματος»	Αναγκαστική προσγείωση	Όχι
B	«Αποσύνδεση»	Εκτέλεση τελευταίας εντολής	Ναι

Πίνακας 11: Τύποι σφαλμάτων [15]

A – Μη αναστρέψιμη διαταραχή. Το MEEΟ εισέρχεται σε διαδικασία αναγκαστικής προσγείωσης. Απαιτείται χειροκίνητη επανεκκίνηση του τηλεχειριστηρίου, του MEEΟ και της εφαρμογής DJI GO προκειμένου να αποκατασταθεί η λειτουργία του MEEΟ.

B – Αναστρέψιμη διαταραχή. Το MEEΟ εξακολουθεί να εκτελεί την τελευταία εντολή που έλαβε από το τηλεχειριστήριο (πχ πτήση προς τα εμπρός). Η λειτουργία του MEEΟ αποκαθίσταται όταν απενεργοποιηθεί ο ακτινοβολητής.

Στον επόμενο πίνακα απεικονίζεται η μέγιστη απόσταση (κρίσιμη απόσταση) για την οποία καταγράφηκε σφάλμα και η αντίστοιχη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E. Η μέγιστη τρωτότητα του MEEΟ εμφανίστηκε σε οριζόντια πόλωση της κεραίας.

Ακτινοβολητής	Κρίσιμη απόσταση R (m)	E (V/m)	Τύπος Σφάλματος
R-1	35	1400	A
R-2	50	70	B
R-3	34	50	B

Πίνακας 12: Μέγιστη απόσταση για την καταγραφή σφάλματος [15]

2.5.5 Συμπεράσματα

Παρατηρήθηκε ότι οι ακτινοβολητές με υψηλή συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) προκαλούν σφάλματα τύπου B, δηλαδή αναστρέψιμες διαταραχές, με τη λειτουργία του MEEΟ να αποκαθίσταται όταν απενεργοποιηθεί ο ακτινοβολητής. Επιπλέον, η διαταραχή εξαρτάται μόνο από την τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E (50-70 V/m) και όχι από τη συχνότητα επανάληψης των παλμών. Ως εκ τούτου, PRF = 300 KHz και PRF = 1 MHz οδηγούν σε ίδια αποτελέσματα.

Τα σφάλματα τύπου A προκλήθηκαν από ακτινοβολητή με χαμηλή συχνότητα επανάληψης παλμών και ήταν μη αναστρέψιμα. Το MEEΟ εισέρχονταν σε διαδικασία αναγκαστικής προσγείωσης και απαιτούνταν χειροκίνητη επανεκκίνηση του τηλεχειριστηρίου, του MEEΟ και της εφαρμογής DJI GO προκειμένου να αποκατασταθεί η λειτουργία του MEEΟ.

Πρέπει ωστόσο, να σημειωθεί, ότι η ανάπτυξη ενός ακτινοβολητή ηλεκτρομαγνητικού παλμού υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) με υψηλή συχνότητα επανάληψης παλμών, αποτελεί μια δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία, εξ αιτίας των φυσικών περιορισμών που θέτουν οι διακόπτες στερεάς κατάστασης της γεννήτριας παλμών. Στην πράξη, οι τιμές του FOM για τους ακτινοβολητές τύπου R-2 και R-3 είναι κοντά στο όριο για τη συγκεκριμένη συχνότητα επανάληψης παλμών και είναι πιθανό ότι σε αυτές τις περιπτώσεις, η αύξηση της κρίσιμης απόστασης δεν είναι εύλογη. Ταυτόχρονα όμως, είναι εφικτή η ανάπτυξη ενός ακτινοβολητή με χαμηλή συχνότητα επανάληψης παλμών, αλλά με αρκετά υψηλή τιμή FOM, όπως ισχύει για τον ακτινοβολητή τύπου R-1, για τον οποίο ο συντελεστής ποιότητας (Figure of Merit – FOM) υπολογίζεται ως εξής:

$$FOM = E \times R = K \times U \times \sqrt{S}$$

Όπου K είναι ο συντελεστής σύζευξης, U είναι το πλάτος τάσης του παλμού διέγερσης της γεννήτριας και S είναι η επιφάνεια του ανοίγματος της κεραίας.

Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια διάταξη με 4 TEM χοανοκεραίες, μήκους 0,7 m και επιφάνειας ανοίγματος 0,25 m x 0,25 m η κάθε μία. Η συνολική επιφάνεια ανοίγματος είναι 0,5 m x 0,5 m. Οι κεραίες αυτές μπορούν αν τροφοδοτηθούν από τέσσερις γραμμές 200 Ω, συνδεδεμένες σε ομοαξονικό μετασχηματιστή 4 x 200 Ω σε 50 Ω. Μια γεννήτρια υψηλής τάσης, πχ τεχνολογίας FID [23], όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα συγκεκριμένα πειράματα, με χρόνο ανόδου παλμού 200 psec - 250 psec, μπορεί να διεγείρει τη συγκεκριμένη διάταξη κεραιών. Στην πράξη, με τη γεννήτρια αυτή, μπορεί να παραχθεί παλμός πλάτους 100 KV, σε φορτίο 50 Ω. Επομένως, με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον προηγούμενο πίνακα, μπορεί να αναπτυχθεί ακτινοβολητής με κρίσιμη απόσταση R:

$$1,4 \times 35 = K \times 40 \times 0,36$$

$$1,4 \times R = K \times 100 \times 0,5$$

$$\implies 35/R = (40 \times 0,36)/(100 \times 0,5) \implies R = 120 \text{ m}$$

Τέλος, μπορεί να γίνει σύνδεση τέτοιων γεννητριών σε διάταξη, γεγονός που θα αυξήσει την κρίσιμη απόσταση στα 400-500 m.

2.6 Ανακεφαλαίωση

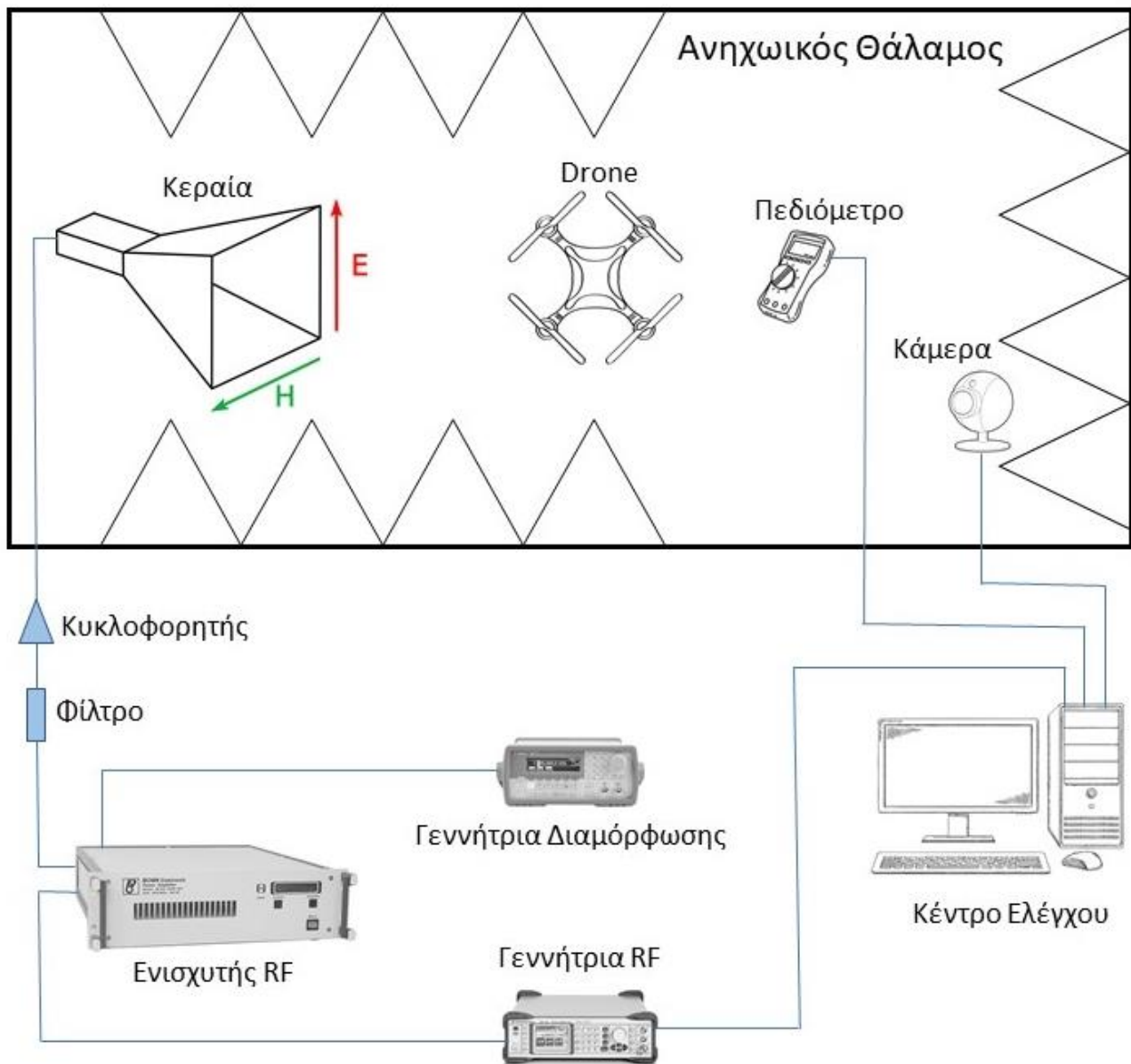
Ένα μεγάλο μέρος των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τις έρευνες που παρατέθηκαν στα προηγούμενα, αποτελεί έναυσμα ή υπόβαθρο για την παρούσα διπλωματική εργασία.

Αρχικό κοινό συμπέρασμα αποτελεί η μείωση του ορίου ευαισθησίας του MEEO στη σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, καθώς αυξάνεται το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, είτε με αύξηση της ισχύος ακτινοβολίας, είτε με μείωση της απόστασης του ακτινοβολούμενου MEEO από την κεραία. Για υψηλότερες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, οι αναστρέψιμες διαταραχές στη λειτουργία του MEEO εξελίσσονται σε μη αναστρέψιμες βλάβες. Η ευαισθησία του MEEO, επίσης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η κατασκευαστική πολυπλοκότητα του και η πυκνότητα τοποθέτησης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα. Σημαντικό επίσης ρόλο, φάνηκε να διαδραματίζει η διαδρομή σύζευξης που δημιουργείται μεταξύ της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και του MEEO μέσω της κεραίας του και περιλαμβάνει κυρίως το εμπρόσθιο άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE). Επιπροσθέτως, η ύπαρξη ανοιγμάτων για εξαερισμό ή έκθεση αισθητήρων στο κέλυφος του MEEO, μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχή στη λειτουργία του. Ειδικά στις περιπτώσεις εφαρμογής σκόπιμης ηλεκτρονικής παρεμβολής με μικροκυματικούς παλμούς υψηλής ισχύος (HPM), σημαντικό ρόλο φάνηκε ότι διαδραμάτισε η συχνότητα επανάληψης των παλμών (pulse repetition frequency – PRF), η αύξηση της οποίας, συνήθως οδηγούσε σε αύξηση της ευαισθησίας του υπό δοκιμή εξοπλισμού, καθώς και σε πιο μόνιμες βλάβες. Σε αντίστοιχα αποτελέσματα φάνηκε να οδηγεί και το πλάτος του παλμού. Συγκεκριμένα, για τετραγωνικό παλμό παρεμβολής με διάρκεια 1 μsec και συχνότητα επανάληψης (PRF) 1 KHz, τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου έως 100 V/m και συχνότητες μεταξύ 100 MHz και 2 GHz, παρατηρήθηκαν σφάλματα στον αισθητήρα καταγραφής της θερμοκρασίας της μπαταρίας και στον αισθητήρα καταγραφής της κατακόρυφης ταχύτητας του MEEO.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Πειραματική Τοπολογία

3.1 Τοπολογία και Εξοπλισμός Πειραμάτων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διενέργεια των πειραμάτων, όπως θα περιγραφεί με λεπτομέρεια στα επόμενα, περιλάμβανε τρία διαφορετικά μοντέλα μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (drones), τα οποία αποτέλεσαν και τον υπό δοκιμή εξοπλισμό (equipment under test – EUT), τον απαραίτητο μικροκυματικό εξοπλισμό για την παραγωγή των παλμών της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και τα όργανα για την καταγραφή και μέτρηση των αντίστοιχων ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών, και φυσικά τον ανηχικό θάλαμο, εντός του οποίου πραγματοποιήθηκαν όλα τα πειράματα.



Εικόνα 37: Τοπολογία και εξοπλισμός πειραμάτων

3.1.1 Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα

Οι τρεις διαφορετικοί τύποι μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (drones), που αποτέλεσαν τον υπό δοκιμή εξοπλισμό (equipment under test – EUT), είναι τυπικά εμπορικά τετρακόπτερα (quadcopters), με παραπλήσια κατασκευαστική δομή και τεχνικά χαρακτηριστικά. Το κυριότερο ηλεκτρονικό υποσύστημα ενός τέτοιου drone είναι ο

ελεγκτής πτήσης (Flight Controller), ένα κύκλωμα αποτελούμενο από έναν μικροεπεξεργαστή και τους διάφορους αισθητήρες. Ο ελεγκτής πτήσης περιλαμβάνει κατ' ελάχιστο το γυροσκόπιο [3] και τους εξής αισθητήρες:

-Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης (Inertial Measurement Unit – IMU). Είναι μια μικρή πλακέτα που συνήθως περιλαμβάνει ένα επιταχυνσιόμετρο και ένα γυροσκόπιο και ένα μαγνητόμετρο 3 αξόνων, παρέχοντας συνολικά 9 βαθμούς ελευθερίας.

-Επιταχυνσιόμετρο (Accelerometer). Υπολογίζει τη γραμμική επιτάχυνση, συνήθως εκφρασμένη σε μονάδες g (η τυπική επιτάχυνση 9,81 m/sec², οφειλόμενη στο γήινο βαρυτικό πεδίο). Ανιχνεύοντας την τιμή της βαρύτητας επιτρέπει σε ένα πολυκινητήριο drone να παραμένει σταθερό στον αέρα.

-Γυροσκόπιο (Gyroscope). Υπολογίζει το ρυθμό μεταβολής της κλίσης του drone, σε °/sec.

- Πυξίδα/Μαγνητόμετρο (Compass/Magnetometer). Υπολογίζει το γήινο μαγνητικό πεδίο και προσδιορίζει την κατεύθυνση κίνησης του drone σε σχέση με τον μαγνητικό βορρά. Σε συνδυασμό με την είσοδο πληροφορίας από το GPS μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια τον αζιμουθιακό προσανατολισμό του drone.

-Πιεσόμετρο/Βαρόμετρο (Pressure-meter/Barometer). Σε συνδυασμό με την είσοδο πληροφορίας από το GPS υπολογίζει το υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας.

-GPS. Μπορεί να είναι ενσωματωμένο στον ελεγκτή πτήσης είτε εξωτερικό.

-Αποστασιόμετρο (Distance-meter). Υπολογίζει την απόσταση του drone από ένα πιθανό εμπόδιο. Μπορεί να συνδυαστεί με έναν αισθητήρα αποφυγής εμποδίων, τεχνολογίας υπερήχων, laser lidar ή κάμερας για μεγαλύτερη ασφάλεια κατά την πτήση.

Τα συγκεκριμένα μοντέλα των drones που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν τα εξής:

3.1.1.1 DJI Phantom 3 Standard

Πρόκειται για ένα δημοφιλές εμπορικό μοντέλο τετρακόπτερου (quadcopter), που κυκλοφόρησε το 2015.



Εικόνα 38: Drone DJI Phantom 3 Standard [24]

Έχει ενσωματωμένο GPS, μέγιστη ταχύτητα πτήσης 16 m/sec (ATTI mode) και μέγιστο χρόνο πτήσης έως 25 λεπτά. Έχει κάμερα 3 αξόνων με αισθητήρα CMOS μεγέθους 1/2,3” f/2,8 και ανάλυσης 12 MP με ανάλυση video UHD 2,7 K. Το κανάλι επικοινωνίας της κάμερας με το τηλεχειριστήριο λειτουργεί σε συχνότητες 2,4 GHz έως 2,483 GHz. Η μπαταρία του drone είναι τύπου LiPo (Lithium-polymer) 4480 mAh/68 Wh, τάσης 15,2 V. Στο drone εγκαταστάθηκε το πιο πρόσφατο υλικολογισμικό (firmware).



Εικόνα 39: Το τηλεχειριστήριο του DJI Phantom 3 Standard [25]

Το τηλεχειριστήριο του drone λειτουργεί σε συχνότητες 5,725 GHz έως 5,825 GHz και μπορεί να εκπέμπει σε απόσταση 1000 m. Είναι εφοδιασμένο με μπαταρία τύπου LiPo 2600 mAh και μπορεί να φορτίσει μέσω θύρας micro-USB type-B. Ο έλεγχος του drone

πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής DJI GO για λειτουργικό σύστημα Android ή iOS. Η διαγώνια διάσταση του drone είναι 35 cm και το βάρος του (συμπεριλαμβανομένων των ελίκων και της μπαταρίας) είναι 1,2 Kg [24].

3.1.1.2 DJI Mavic Air

Είναι επίσης ένα δημοφιλές εμπορικό μοντέλο τετρακόπτερου και κυκλοφόρησε το 2018.



Εικόνα 40: Drone DJI Mavic Air [26]

Έχει ενσωματωμένο GPS, μέγιστη ταχύτητα πτήσης 68,4 Km/h και μέγιστο χρόνο πτήσης έως 21 λεπτά. Έχει κάμερα 3 αξόνων με αισθητήρα μεγέθους 1/2,3" f/2,8 και ανάλυση 12 MP με ανάλυση video UHD 4 K. Η μπαταρία του είναι τύπου LiPo (Lithium-polymer) 2375 mAh/27,43 Wh, τάσης 11,55 V. Στο drone εγκαταστάθηκε το πιο πρόσφατο υλικολογισμικό (firmware).



Εικόνα 41: Το τηλεχειριστήριο του DJI Mavic Air [26]

Το τηλεχειριστήριο του drone λειτουργεί σε συχνότητες 2,4 GHz έως 2,4835 GHz και 5,725 GHz έως 5,825 GHz και μπορεί να εκπέμπει σε απόσταση 4000 m. Είναι εφοδιασμένο με μπαταρία τύπου LiPo 2970 mAh και μπορεί να φορτίσει μέσω θύρας micro-USB type-B/C.

Ο έλεγχος του drone πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής DJI GO4 για λειτουργικό σύστημα Android ή iOS. Οι διαστάσεις του drone είναι $16,8 \times 8,3 \times 4,9$ (Μ × Π × Υ) cm και το βάρος του (συμπεριλαμβανομένων των ελίκων και της μπαταρίας) είναι 1,4 Kg [27].

3.1.1.3 Quatum Nova

Είναι ένα εμπορικό τετρακόπτερο για το οποίο υπάρχουν ελάχιστες πληροφορίες σχετικά με τον κατασκευαστή και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 42: Drone Quatum Nova [28]

Έχει ενσωματωμένο GPS και κάμερα 2 αξόνων. Ο μέγιστος χρόνος πτήσης είναι 15 λεπτά. Έχει. Η μπαταρία του είναι τύπου LiPo (Lithium-polymer) 2700 mAh. Το τηλεχειριστήριο του drone λειτουργεί σε συχνότητες 2,4 GHz (7 κανάλια εκπομπής) και είναι εφοδιασμένο με 4 μπαταρίες τύπου AAA. Οι διαστάσεις του drone είναι $30 \times 30 \times 20$ (Μ × Π × Υ) cm και το βάρος του (συμπεριλαμβανομένων των ελίκων και της μπαταρίας) είναι 0,875 Kg [29].

3.1.2 Μικροκυματικός Εξοπλισμός

Ο μικροκυματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των παλμών της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και για τη μέτρηση των αντίστοιχων ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών ήταν ο εξής:

3.1.2.1 Ενισχυτής παλμών

Χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής παλμών BONN Elektronik TWAP 0103-1000 [30], με μέγιστη ισχύ εξόδου 1 KW +/- 6%, εύρος συχνοτήτων λειτουργίας 1,0 GHz - 2,5 GHz και μέγιστη συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) 20 KHz.



Εικόνα 43: Ενισχυτής παλμών BONN Elektronik TWAP 0103-1000

Ο συγκεκριμένος ενισχυτής εφαρμόζει την τεχνολογία TWTA (travelling wave tube amplifier), η οποία βασιζόμενη στη χρήση καθοδικού σωλήνα κενού επιτυγχάνει την ενίσχυση μικροκυματικών κυματομορφών μέσω της αλληλεπίδρασης τους με μια δέσμη ηλεκτρονίων που κινείται εντός του σωλήνα [31].

3.1.2.2 Γεννήτρια RF κυματομορφών

Η γεννήτρια RF κυματομορφών Rohde & Schwarz SMB 100A [32] χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των μικροκυματικών κυματομορφών και συνδέθηκε στην είσοδο του ενισχυτή BONN. Η συγκεκριμένη γεννήτρια έχει εύρος συχνοτήτων λειτουργίας 100 KHz

- 6 GHz και δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένης παραγωγής κυματομορφών εντός προκαθορισμένου εύρους συχνοτήτων, με προκαθορισμένο χρονικό βήμα (frequency sweep).



Εικόνα 44: Γεννήτρια RF κυματομορφών Rohde & Schwarz SMB 100A [32]

Ο έλεγχος όλων των παραμέτρων λειτουργίας της γεννήτριας μπορεί να γίνει και απομακρυσμένα, από υπολογιστή, μέσω κατάλληλου web interface.

3.1.2.3 Γεννήτρια Διαμόρφωσης

Για τη διαμόρφωση και τον έλεγχο της παλμικής λειτουργίας του ενισχυτή BONN χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια RF κυματομορφών Agilent 33220A [33].



Εικόνα 45: Γεννήτρια RF κυματομορφών Agilent 33220A [34]

Η έξοδος της γεννήτριας συνδέεται στην είσοδο παλμικής διαμόρφωσης του ενισχυτή, καθορίζοντας τη συχνότητα επανάληψης των παλμών (PRF), τη διάρκειά τους και επομένως και τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) των παλμών, αφού ισχύει

$$Duty\ Cycle = PRF \times Pulse\ Duration$$

Η γεννήτρια αυτή μπορεί να παράγει παλμούς διαφόρων τύπων (sine, square, ramp, triangle, pulse, noise, DC), συχνότητας έως 5 MHz.

3.1.2.4 Φίλτρο - Κυκλοφορητής

Η έξοδος του παλμικού ενισχυτή BONN, οδηγήθηκε μέσω ενός ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων με ζώνη διέλευσης 1,0 GHz - 1,5 GHz σε έναν κυκλοφορητή, ο οποίος χρησιμοποιείται για την προστασία του ενισχυτή από ανακλώμενα κύματα.



Εικόνα 46: Φίλτρο και κυκλοφορητής

Η ενισχυμένη κυματομορφή από την έξοδο του κυκλοφορητή οδηγήθηκε στην κεραία.

3.1.2.5 Κεραία

Για την ακτινοβολήση του drone χρησιμοποιήθηκε η κεραία ATH800M5GA της εταιρείας Amplifier Research [35]. Είναι μικροκυματική κεραία τύπου χοάνης, τετραγωνικής διατομής, ευρείας ζώνης, υψηλού κέρδους, με ελάχιστη τιμή 13 dBi και μέγιστη 21 dBi (στα 5 GHz). Το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας είναι 800 MHz – 5 GHz. Οι διαστάσεις της χοάνης ακτινοβολίας είναι 46,3 x 46,3 cm. Η διαγώνιος είναι 65,478 cm και το βάθος της είναι 69,2 cm.



Εικόνα 47: Κεραία Amplifier Research ATH800M5GA [35]

3.1.2.6 Πεδιόμετρο

Η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο όπου ήταν τοποθετημένο το drone, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πεδιόμετρου, τύπου Narda NBM 550 [36], το οποίο έχει τη δυνατότητα εναλλαγής των ισοτροπικών αισθητήρων, για την κάλυψη φάσματος συχνοτήτων από 0 Hz έως 90 GHz.



Εικόνα 48: Πεδιόμετρο Narda NBM 550 [36]

Η απεικόνιση των μετρήσεων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (RMS τιμές), καθώς και ο έλεγχος της λειτουργίας του πεδιόμετρου, έγινε απομακρυσμένα, μέσω υπολογιστή, με τη χρήση του λογισμικού NBM-TS. Το πεδιόμετρο συνδέθηκε με τον υπολογιστή με γραμμή οπτικών ινών. Για τη λειτουργία του πεδιόμετρου χρησιμοποιήθηκαν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, για να αποφευχθεί η δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από το τροφοδοτικό.

3.1.3 Ανηχωικός Θάλαμος

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν εντός του ανηχωικού θαλάμου, τύπου Frankonia CHC [37], που βρίσκεται στο Εργαστήριο Μικροκυματικών Διατάξεων Υψηλής Ισχύος του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.



Εικόνα 49: Ανηχωικός Θάλαμος του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Ο ανηχωικός θάλαμος έχει εύρος συχνοτήτων λειτουργίας από 9 KHz/30 MHz έως 18 GHz και είναι σχεδιασμένος έτσι, ώστε να απορροφά όλες τις αντανακλάσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που δημιουργούνται στο εσωτερικό του, με ενδεικτική απόσβεση μεγαλύτερη των 110 dB, σε συχνότητα 1 GHz. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση άφλεκτων απορροφητικών υλικών (radiation-absorbent materials – RAM) στο δάπεδο και στα τοιχώματα του θαλάμου. Τα υλικά αυτά είναι είτε αφρός πολυουρεθάνης/πολυστυρενίου σε σχήμα πυραμίδας, με μέγεθος μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της ανακλώμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας, με στόχο αυτή να απορροφάται και να μετατρέπεται σε θερμότητα, είτε πλακίδια φερριτή, διαστάσεων 100 x 100 x 6 mm, τα οποία είναι πιο αποτελεσματικά σε χαμηλές συχνότητες, όπου το μήκος κύματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας είναι μεγάλο και δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί αποτελεσματικά από τις πυραμίδες αφρού [38], [39]. Επίσης η κατασκευή του θαλάμου

εμποδίζει την είσοδο εξωτερικών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Οι διαστάσεις του θαλάμου είναι 7,355 x 3,755 x 3,300 (Μ x Π x Υ) m και έχει ζώνη σίγασης (quiet zone - QZ) ακτίνας 1,2 m [40]. Ο θάλαμος είναι πλήρως συμβατός με το Πρότυπο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας IEC/EN 61000-4-3 [41].

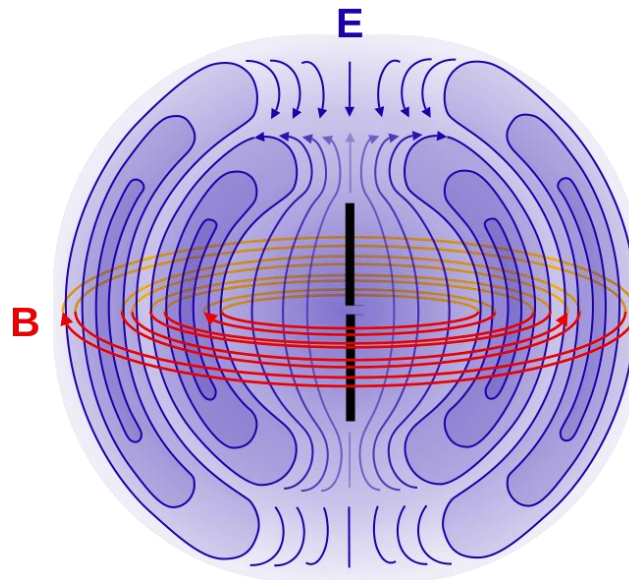
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Πειράματα Ηλεκτρομαγνητικής Ατρωσίας

4.1 Θεωρητική Ανάλυση και Διακρίβωση

Η διαδικασία των πειραμάτων για την εξέταση της τρωτότητας των τριών διαφορετικών μοντέλων drones σε σκόπιμες παλμικές μικροκυματικές παρεμβολές με συχνότητες μεταξύ 1,0 GHz και 1,5 GHz, περιλάμβανε το κύριο στάδιο, κατά το οποίο έγινε προσπάθεια εντοπισμού συγκεκριμένων κρίσιμων συχνοτήτων «ενδιαφέροντος», δηλαδή συχνοτήτων για τις οποίες προκαλείται διαταραχή της λειτουργίας του drone, στο μικρότερο δυνατό χρόνο και με τη χαμηλότερη δυνατή τιμή έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Σε ένα δεύτερο στάδιο, ειδικά για το drone DJI Phantom 3 Standard, για τις συγκεκριμένες συχνότητες ενδιαφέροντος του πρώτου σταδίου, τροποποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά των παλμών παρεμβολής, όπως πλάτος, διάρκεια και συχνότητα επανάληψης παλμών (pulse repetition frequency - PRF) και επανεξετάσθηκε η συμπεριφορά του drone.

Κατά τη διενέργεια των πειραμάτων, η απόσταση του drone από την κεραία (1 m, 2 m ή 3,2 m) υπαγορεύθηκε από την τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία θα έπρεπε να είναι επαρκής, ώστε να παρατηρηθούν κατά το ελάχιστο διαταραχές στη λειτουργία του drone. Επομένως, απαραίτητη κρίθηκε η εξέταση της ομοιομορφίας του πεδίου στη θέση όπου ήταν τοποθετημένο το drone, με τον καθορισμό των ορίων του κοντινού και του μακρινού πεδίου της κεραίας και με τη διακρίβωση (calibration) των οργάνων μέτρησης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο εντοπισμός τυχόν ασαφειών που μπορεί να εισάγει στη μεθοδολογία της ανάλυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων η ανομοιομορφία του πεδίου, λόγω της ύπαρξη στάσιμου κύματος στο σημείο των μετρήσεων. Η ανομοιομορφία εντοπίζεται συνήθως σε πολύ μικρή απόσταση από την κεραία (αντιδρόν κοντινό πεδίο), όπου η πόλωση του πεδίου δεν είναι σαφής, με την παρουσία στάσιμου κύματος και ισχυρής μαγνητικής συνιστώσας, η οποία δεν μπορεί να υπολογισθεί εύκολα. Επίσης, είναι πιθανό να εμφανίζεται ανομοιομορφία στις τιμές

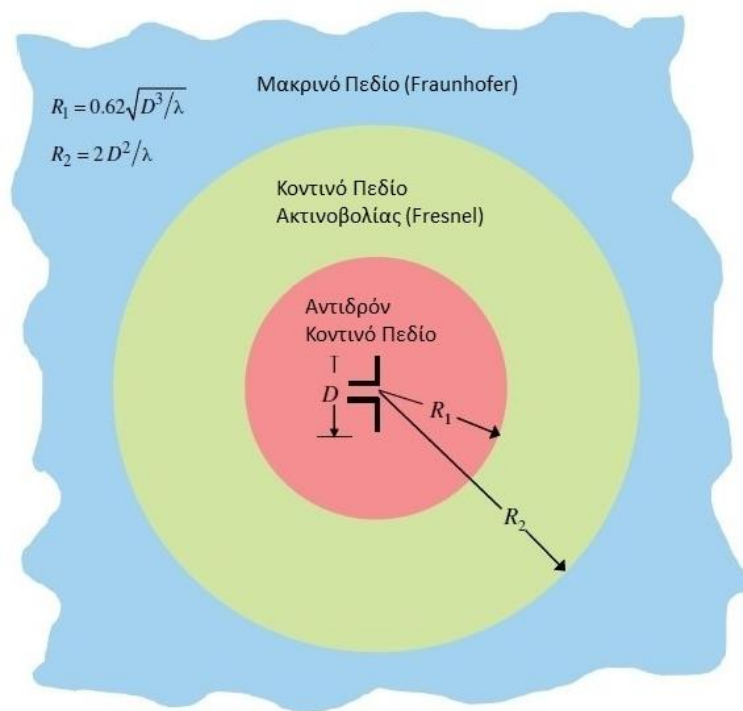
της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος και πλάτος του ακτινοβολούμενου drone.



Εικόνα 50: Αντιδρόν κοντινό πεδίο κεραίας [42]

4.1.1 Κοντινό και Μακρινό Πεδίου Κεραίας

Ο χώρος που περιβάλλει την κεραία υποδιαιρείται σε τρεις περιοχές: το αντιδρόν κοντινό πεδίο, το κοντινό πεδίο ακτινοβολίας (περιοχή Fresnel) και το μακρινό πεδίο (περιοχή Fraunhofer). Η μετάβαση μεταξύ των περιοχών είναι σχετικά ομαλή, ωστόσο αυτές εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 51: Όρια κοντινού και μακρινού πεδίου κεραίας [43]

-Το αντιδρόν κοντινό πεδίο (reactive near-field region) είναι η περιοχή που περιβάλλει άμεσα την κεραία. Εδώ υπερισχύει η άεργη συμπεριφορά του πεδίου, χωρίς να παρατηρείται ακτινοβολήση ισχύος. Το όριο της περιοχής αυτής βρίσκεται σε απόσταση

$$R_1 < 0,62 \cdot \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

από την επιφάνεια της κεραίας, όπου λ είναι το μήκος κύματος της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και D είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας.

-Το κοντινό πεδίο ακτινοβολίας (radiating near-field - Fresnel region) είναι η περιοχή μεταξύ του αντιδρόντος κοντινού πεδίου και του μακρινού πεδίου της κεραίας. Εδώ παρατηρείται ακτινοβολήση ισχύος και οι συνιστώσες του πεδίου είναι εξαρτώμενες από την απόσταση από την κεραία, ενώ στην περίπτωση που η μέγιστη διάσταση της κεραίας είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος, η περιοχή αυτή μπορεί να μην υπάρχει. Στην περίπτωση των πειραμάτων μας, όπου η μέγιστη διάσταση της κεραίας είναι η διαγώνιος

D και είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, το εξωτερικό όριο της περιοχής βρίσκεται σε απόσταση

$$R1 < R2 < \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$$

από το όριο του αντιδρόντος κοντινού πεδίου.

-Το μακρινό πεδίο (far-field - Fraunhofer region) είναι η περιοχή όπου οι εγκάρσιες συνιστώσες του πεδίου είναι ανεξάρτητες της απόστασης από την κεραία. Επίσης, η ακτινική συνιστώσα είναι πολύ χαμηλή, ώστε να μας επιτρέπει να θεωρούμε το πεδίο εγκάρσιο. Η περιοχή αυτή εκτείνεται σε αποστάσεις μεγαλύτερες του $R2$ [43].

Τα όρια των περιοχών δεν είναι σταθερά, αλλά εξαρτώνται από τη συχνότητα, καθώς στους τύπους υπολογισμού υπεισέρχεται το μήκος κύματος λ . Στην περίπτωση των πειραμάτων μας, όπου η μέγιστη διάσταση της τετραγωνικής χοάνης ακτινοβολίας της κεραίας είναι η διαγώνιος $D = 0,65478$ m, οι περιοχές ορίζονται ως εξής συναρτήσει της συχνότητας f της ακτινοβολουμένης από την κεραία σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής:

Αντιδρόν κοντινό πεδίο

$$R1 < 0,62 \cdot \sqrt{9,3576 \cdot f}$$

Κοντινό πεδίο ακτινοβολίας (περιοχή Fresnel)

$$R1 < R2 < 2,8582 \cdot 10^{-9} \cdot f$$

Μακρινό πεδίο (περιοχή Fraunhofer)

$$R > 2,8582 \cdot 10^{-9} \cdot f$$

Στον επόμενο πίνακα απεικονίζονται τα όρια των πεδίων, για ενδεικτικές συχνότητες.

Στο Παράρτημα I απεικονίζεται το σύνολο των μετρήσεων.

f (GHz)	λ (m)	Αντιδρόν κοντινό πεδίο Μέγιστη απόσταση (m)	Κοντινό πεδίο ακτινοβολίας Fresnel Διάστημα (m)	Μακρινό πεδίο Fraunhofer Ελάχιστη απόσταση (m)
1,0	0,3	0,5997	0,5997 - 2,8582	2,8582
1,1	0,2727	0,6290	0,6290 - 3,1440	3,1440
1,12	0,2678	0,6347	0,6347 - 3,2012	3,2012
1,2	0,25	0,6569	0,6569 - 3,4298	3,4298
1,25	0,24	0,6705	0,6705 - 3,5728	3,5728
1,3	0,2307	0,6838	0,6838 - 3,7157	3,7157
1,4	0,2142	0,7096	0,7096 - 4,0015	4,0015
1,5	0,2	0,7345	0,7345 - 4,2873	4,2873

Πίνακας 13: Όρια των πεδίων για ενδεικτικές συχνότητες

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα, για το εύρος συχνοτήτων 1,0 GHz - 1,5 GHz της ακτινοβολούμενης από την κεραία σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, τα όρια του αντιδρόντος κοντινού πεδίου μεταβάλλονται από 0,5997 m έως 0,7345 m και αντίστοιχα τα όρια του μακρινού πεδίου (Fraunhofer) μεταβάλλονται από 2,8582 m έως 4,2873 m. Επομένως, για κάθε συχνότητα, η ελάχιστη απόσταση του 1 m του drone από την κεραία, δεν εμπίπτει εντός της περιοχής του αντιδρόντος κοντινού πεδίου, αλλά στην ενδιάμεση περιοχή του κοντινού πεδίου ακτινοβολίας (περιοχή Fresnel). Το ίδιο ισχύει και για την ενδιάμεση απόσταση των 2 m. Ωστόσο, η μέγιστη απόσταση των 3,2 m του drone από την κεραία, εμπίπτει εντός της περιοχής του μακρινού πεδίου (περιοχή Fraunhofer) μόνο για τις συχνότητες από 1,0 GHz έως 1,12 GHz. Για όλες τις υπόλοιπες συχνότητες (από 1,13 GHz έως 1,5 GHz), η απόσταση των 3,2 m εμπίπτει στην ενδιάμεση περιοχή του κοντινού πεδίου ακτινοβολίας (περιοχή Fresnel), όπου η επίδραση του στάσιμου κύματος στο χώρο, είναι μεν υπαρκτή, αλλά σταδιακά μειούμενη με την απόσταση.

4.1.2 Διακρίβωση Μετρητικού Οργάνου

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία του βασικού μετρητικού οργάνου, του πεδιόμετρου Narda NBM 550 και να εξασφαλισθεί η λήψη ακριβών μετρήσεων για τις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ήταν απαραίτητο να προηγηθεί η διαδικασία διακρίβωσής (calibration) του οργάνου. Κατά τη διαδικασία της διακρίβωσης, χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο μετρητικό όργανο ο αισθητήρας Montena SFE3-5G [44].



Εικόνα 52: Αισθητήρας Montena SFE3-5G [44]

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι τύπου D-dot, δηλαδή οι μετρήσεις που λαμβάνει αναφέρονται στην τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Ο αισθητήρας αυτός τοποθετήθηκε στη ίδια ακριβώς θέση με το πεδιόμετρο Narda NBM 550 και λάμβανε μετρήσεις ταυτόχρονα με αυτό. Οι μετρήσεις απεικονίζονταν απ' ευθείας στον ψηφιακό παλμογράφο τύπου Rohde & Schwarz RTO1044 [45].



Εικόνα 53: Παλμογράφος Rohde & Schwarz RTO1044 [46]

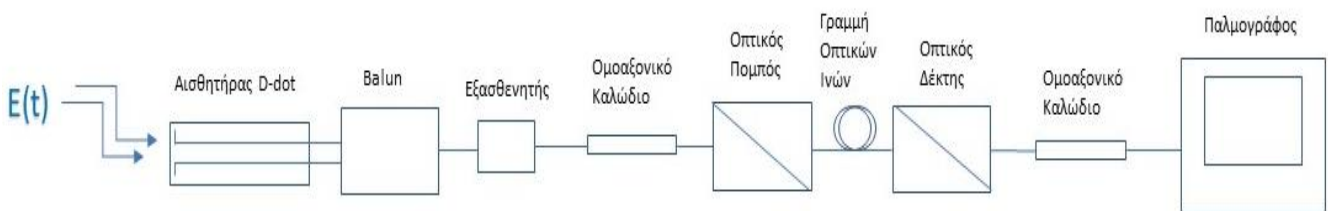
4.1.2.1 Υπολογισμός της Εξασθένισης της Γραμμής Συνδεσμολογίας του Αισθητήρα Montena SFE3-5G

Οι δύο ακροδέκτες του αισθητήρα Montena SFE3-5G που μετέφεραν balanced σήματα παλμών οδηγήθηκαν σε έναν μετατροπέα τύπου balun [47], στην έξοδο του οποίου

λαμβάνονταν το unbalanced σήμα. Το σήμα αυτό στη συνέχεια μέσω οπτικής ζεύξης που περιλάμβανε τον οπτικό πομπό, την γραμμή οπτικών ινών και τον οπτικό δέκτη, οδηγούνταν στην οθόνη του παλμογράφου. Σημειώνεται ότι στην έξοδο του balun ήταν απαραίτητη η σύνδεση εξασθενητή (attenuator), με κατάλληλη ονομαστική τιμή (10 dB, 30 dB ή 30 dB), έτσι ώστε το σήμα να οδηγηθεί εξασθενημένο στη γραμμή οπτικών ινών για λόγους προστασίας του παλμογράφου.



Εικόνα 54: Σύνδεση του αισθητήρα Montena SFE3-5G με το balun και τη γραμμή οπτικών ινών [47]



Εικόνα 55: Διάγραμμα πλήρους συνδεσμολογίας του αισθητήρα Montena SFE3-5G

Σε ένα πρώτο στάδιο, ήταν απαραίτητο να μετρηθεί η τιμή πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με τη χρήση των δύο οργάνων, Montena SFE3-5G και Narda NBM 550. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε ο solid state μικροκυματικός ενισχυτής παραγωγής συνεχών κυματομορφών (continuous wave – CW) τύπου Ophir 5225 [48], ο οποίος τροφοδοτούσε άμεσα την κεραία τύπου Amplifier Research ATH800M5GA με συνεχείς κυματομορφές συχνότητας από 200 MHz έως 1000 MHz. Η σύγκριση επικεντρώθηκε στις ενδεικτικές συχνότητες από 800 MHz έως 1000 MHz. Τα δύο μετρητικά όργανα τοποθετήθηκαν σε απόσταση 3m από την κεραία, με διαφορετικά επίπεδα ισχύος εκπομπής 0 dBm, -3 dBm, -6 dBm και -10 dBm αντίστοιχα. Στην έξοδο του balun συνδέθηκε εξασθενητής 10 dB.



Εικόνα 56: Μικροκυματικός ενισχυτής παραγωγής συνεχών κυματομορφών Ophir 5225

Οι τιμές του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που μετρήθηκε από τα δύο όργανα απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα. Σημειώνεται ότι ο αισθητήρας Montena SFE3-5G απεικονίζει στην οθόνη του παλμογράφου το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε V, ενώ το πεδιόμετρο Narda NBM 550 απεικονίζει στην ενσωματωμένη οθόνη του την RMS τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε V/m, η οποία συνδέεται με το αντίστοιχο πλάτος, με τη σχέση

$$E_{rms} = 0,707 \cdot E_{max}$$

Στον πίνακα, οι RMS μετρούμενες τιμές του Narda NBM 550, έχουν μετατραπεί σε τιμές πλάτους με βάση τη σχέση $E_{max} = E_{rms}/0,707$.

CW	0 dBm		-3dBm		-6 dBm		-10 dBm	
	Montena SFE3-5G (V)	Narda NBM 550 (V/m)	Montena SFE3-5G (V)	Narda NBM 550 (V/m)	Montena SFE3-5G (V)	Narda NBM 550 (V/m)	Montena SFE3-5G (V)	Narda NBM 550 (V/m)
800	0,125	96,690	0,119	91,513	0,106	82,036	0,086	59,094
900	0,148	107,270	0,142	98,302	0,111	79,844	0,075	54,045
1000	0,161	95,388	0,141	84,469	0,114	67,439	0,077	45,742

Πίνακας 14: Τιμές πλάτους της έντασης ηλεκτρικού πεδίου

Στη συνέχεια, σε ένα δεύτερο στάδιο, με βάση τις παραπάνω τιμές, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της εξασθένισης ισχύος που εισάγει ολόκληρη η γραμμή συνδεσμολογίας του αισθητήρα Montena SFE3-5G έως τον παλμογράφο, με βάση τη σχέση

$20 \cdot \log(E_{Narda}/E_{Montena})$, για επίπεδα ισχύος εκπομπής 0 dBm, -3 dBm, -6 dBm και -10 dBm αντίστοιχα. Οι τιμές της εξασθένισης ισχύος απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα.

CW f (MHz)	Power Attenuation $20 \cdot \log (E_{Narda}/E_{Montena})$			
	0 dBm	-3dBm	-6 dBm	-10 dBm
800	57,71259015	57,67856042	57,72767604	56,69889622
900	57,19208667	56,78184002	57,13803983	57,12808175
1000	55,44298551	55,49191169	55,42684018	55,47496203

Πίνακας 15: Εξασθένιση ισχύος της πλήρους γραμμής συνδεσμολογίας του αισθητήρα Montena SFE3-5G

Από τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι για κάθε συχνότητα, η εξασθένιση ισχύος που εισάγει ολόκληρη η γραμμή συνδεσμολογίας του αισθητήρα Montena SFE3-5G έως τον παλμογράφο είναι σχετικά σταθερή και ανεξάρτητη του επιπέδου της ισχύος εκπομπής. Επίσης, με δεδομένο ότι οι μετρήσεις του πεδιόμετρου Narda NBM 550 είναι αξιόπιστες, ο παραπάνω πίνακας μας δίνει τις τιμές εξασθένισης που πρέπει να εισαχθούν στις ρυθμίσεις της θύρας εισόδου του παλμογράφου για το σήμα του αισθητήρα Montena SFE3-5G, έτσι ώστε να γίνεται η κατάλληλη αναγωγή για τον υπολογισμό των τιμών του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όπως αυτές απεικονίζονται στον Πίνακα 14.

4.1.2.2 Θεωρητικός Υπολογισμός της Έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου

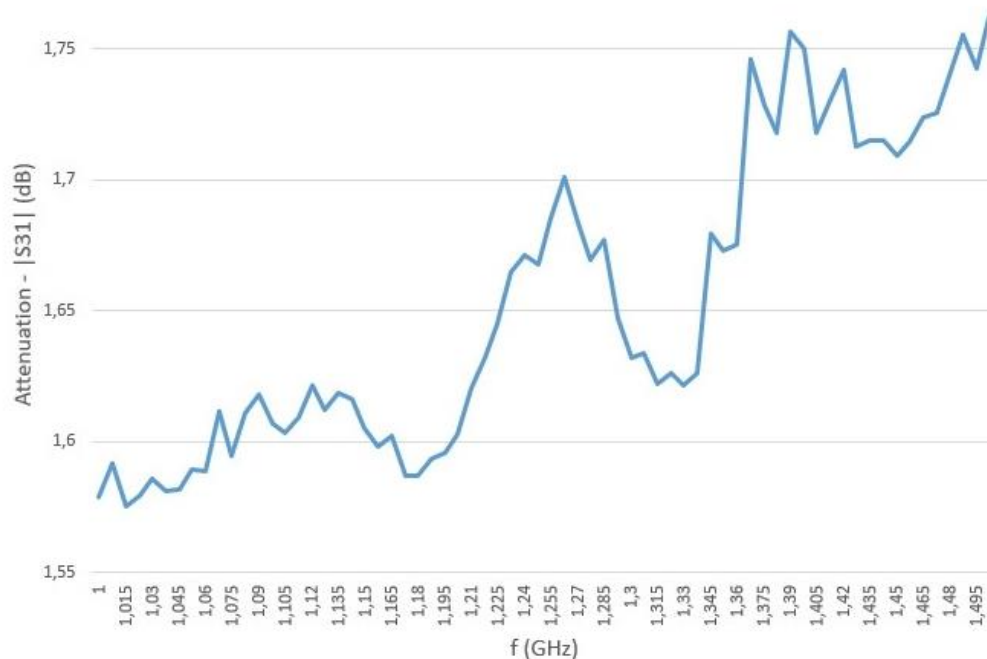
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο θεωρητικός υπολογισμός της τιμής του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για επίπεδα ισχύος εκπομπής 0 dBm, -3 dBm, -6 dBm και -10 dBm αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό του πλάτους της ισχύος εξόδου P του ενισχυτή Ophir 5225 χρησιμοποιήθηκαν τιμές αρχείου με υπολογισμούς της τάσης εξόδου V (τιμές peak-to-peak) του συγκεκριμένου ενισχυτή και στη συνέχεια υπολογίσθηκε η ισχύς εξόδου για φορτίο 50 Ω, με βάση τη σχέση

$$P = \frac{\left(\frac{V}{2}\right)^2}{50}$$

Ο θεωρητικός υπολογισμός της τιμής του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου πραγματοποιήθηκε με βάση τη σχέση

$$E = \sqrt{\frac{377 \cdot P \cdot 10^{-CableAtt/10} \cdot 10^{ARGain/10}}{4\pi R^2}}$$

Η εξασθένιση (CableAtt) των καλωδίων σύνδεσης της εξόδου του ενισχυτή με την κεραία υπολογίστηκε με τη χρήση του VNA (Vector Network Analyzer) τύπου Rohde & Schwarz ZVA24 [49] και απεικονίζεται στο επόμενο διάγραμμα. Στο Παράρτημα II.a απεικονίζεται το σύνολο των μετρήσεων.



Εικόνα 57: Εξασθένιση των καλωδίων σύνδεσης της εξόδου του ενισχυτή με την κεραία

Οι τιμές για το κέρδος της κεραίας (ARGain) ελήφθησαν από την καμπύλη κέρδους του κατασκευαστή.

Τα αποτελέσματα του θεωρητικού υπολογισμού της τιμής του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα.

	0 dBm	-3 dBm	-6 dBm	-10 dBm				0 dBm	-3 dBm	-6 dBm	-10 dBm	0 dBm	-3 dBm	-6 dBm	-10 dBm
f (MHz)	P (W)				Cable Att (dB)	AR Gain (dB)	R (m)	E (V/m)				Theory vs Montena (Power Att)			
800	327,06	275,19	200,56	90,40	1,25	11,2	3	103,84	95,25	81,31	54,59	58,33	58,02	57,65	56,01
900	296,55	233,86	140,07	60,51	1,42	11,65	3	102,11	90,68	70,18	46,13	56,76	56,08	56,01	55,75
1000	157,08	113,17	63,65	31,19	1,56	12,45	3	80,18	68,06	51,04	35,73	53,93	53,61	53,00	53,33

Πίνακας 16: Θεωρητικός υπολογισμός της τιμής του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Προκειμένου να γίνει σύγκριση των θεωρητικών τιμών του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με τις τιμές που μετρήθηκαν στον παλμογράφο από τον αισθητήρα Montena SFE3-5G, όπως αυτές απεικονίζονται στον Πίνακα 14, χρησιμοποιήθηκε η σχέση

$$Theory\ vs\ Montena\ (Power\ Att) = 20 \cdot \log(E_2/E_1)$$

όπου E_2 η θεωρητικά υπολογισμένη τιμή του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου από τον Πίνακα 16 και E_1 η αντίστοιχη τιμή από τον Πίνακα 14, όπως αυτή μετρήθηκε στον παλμογράφο από τον αισθητήρα Montena SFE3-5G. Η σύγκριση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, εφόσον οι θεωρητικά υπολογισμένες τιμές δεν απέχουν πολύ από τις μετρούμενες, η χρήση του πεδίομετρου Narda NBM 550 ενδείκνυται ως βασικού μετρητικού οργάνου στα πειράματά μας, καθώς παράγει σχετικά αξιόπιστες μετρήσεις.

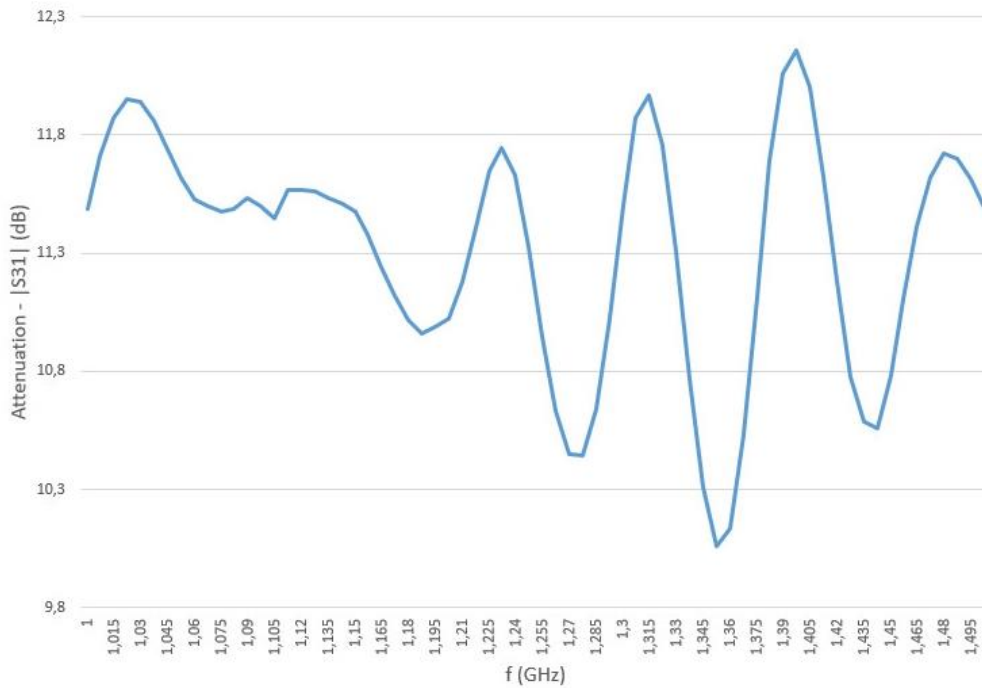
4.1.2.3 Υπολογισμός της Πραγματικής Ενεργού Επιφάνειας του Αισθητήρα Montena SFE3-5G

Σε ένα επόμενο βήμα, και εφόσον πλέον θεωρούνται αξιόπιστες οι μετρήσεις της τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου από το πεδίομετρο Narda NBM 550, και επομένως οι τιμές της εξασθένισης ισχύος της γραμμής συνδεσμολογίας του αισθητήρα Montena SFE3-5G με τον παλμογράφο, επιχειρήθηκε ο ακριβής υπολογισμός της πραγματικής τιμής της ενεργού επιφάνειας A_{eq} του αισθητήρα, η οποία από τον κατασκευαστή δίνεται ίση με $0,0020\ m^2$, σταθερή για κάθε συχνότητα.

Με βάση τον υπολογισμό που προηγήθηκε, σχετικά με την συνολική εξασθένιση ισχύος της γραμμής συνδεσμολογίας του αισθητήρα Montena SFE3-5G με τον παλμογράφο, όπως αυτή αποτυπώνεται στον Πίνακα 15, στο βήμα αυτό γίνεται ο διαχωρισμός της γραμμής συνδεσμολογίας σε δύο τμήματα και υπολογίζεται η εξασθένιση ισχύος του κάθε τμήματος χωριστά. Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει το balun, τον εξασθενητή και την οπτική ζεύξη (οπτικός πομπός, γραμμή οπτικών ινών και οπτικός δέκτης), ενώ το δεύτερο τμήμα περιλαμβάνει τον αισθητήρα.

Ο υπολογισμός της εξασθένισης ισχύος του πρώτου τμήματος (balun, εξασθενητής, οπτικός πομπός, γραμμή οπτικών ινών και οπτικός δέκτης) πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του VNA (Vector Network Analyzer) τύπου Rohde & Schwarz ZVA24. Αποσυνδέθηκε ο αισθητήρας από τις δύο θύρες του balun και στην πρώτη θύρα του balun συνδέθηκε ως είσοδος η θύρα 1 του VNA, ενώ στη δεύτερη θύρα του balun συνδέθηκε φορτίο R_s με τιμή 50 Ω. Το άλλο άκρο της γραμμής, δηλαδή η έξοδος του οπτικού δέκτη συνδέθηκε στη θύρα 3 του VNA. Το VNA μέτρησε την τιμή της παραμέτρου σκέδασης $|S_{31}|$ που αντιστοιχεί στο μέτρο της εξασθένισης του συγκεκριμένου τμήματος της συνδεσμολογίας, για συχνότητες από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, για επίπεδα ισχύος εκπομπής 0 dBm, -3 dBm, -6 dBm. Ο εξασθενητής στην έξοδο του balun είχε τιμή 10 dB.

Στο επόμενο διάγραμμα αποτυπώνεται η εξασθένιση ισχύος του πρώτου τμήματος (balun, εξασθενητής, οπτικός πομπός, γραμμή οπτικών ινών και οπτικός δέκτης). Στο Παράρτημα II.b απεικονίζεται το σύνολο των μετρήσεων.



Εικόνα 58: Εξασθένιση ισχύος του πρώτου τμήματος (balun, εξασθενητής, οπτικός πομπός, γραμμή οπτικών ινών και οπτικός δέκτης)

Ο υπολογισμός της εξασθένισης ισχύος του δεύτερου τμήματος (αισθητήρας Montena SFE3-5G) σχετίζεται άμεσα με τον υπολογισμό της πραγματικής τιμής της ενεργού επιφάνειας A_{eq} του αισθητήρα, η οποία υπολογίσθηκε εμπειρικά με τρόπο τέτοιο, ώστε να επαληθεύει τις τιμές της εξασθένισης του Πίνακα 15.

Τα μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της εξασθένισης ισχύος του αισθητήρα απεικονίζονται στον Πίνακα 17.

f (MHz)	A_{eq} (m ²)	BalunOptAtt (dB)	KbalunOpt	Ksensor	PowerAtt (dB)	0 dBm	-3 dBm	-6 dBm	-10 dBm
						E (V/m)			
800	0,0023	-11,78	3,88	195,48	57,60	95,47	90,71	80,86	65,57
900	0,0022	-11,76	3,87	181,66	56,94	104,27	100,17	78,09	52,92
1000	0,0023	-11,49	3,75	156,38	55,38	94,735	83,41	67,10	45,26

Πίνακας 17: Θεωρητικός υπολογισμός της τιμής του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Στον παραπάνω Πίνακα 17, η στήλη *BalunOptAtt* απεικονίζει τη μέτρηση της εξασθένισης ισχύος του πρώτου τμήματος (balun, εξασθενητής, οπτικός πομπός, γραμμή οπτικών ινών και οπτικός δέκτης) που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του VNA, η στήλη *KbalunOpt* απεικονίζει τον συντελεστή εξασθένισης του πρώτου τμήματος (balun, εξασθενητής, οπτικός πομπός, γραμμή οπτικών ινών και οπτικός δέκτης), που δίνεται από τη σχέση

$$K_{balunOpt} = 10^{-BalunOptAtt/20}$$

Με τη χρήση των παραπάνω τιμών, είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο συντελεστής απόσβεσης του αισθητήρα *Ksensor*, λύνοντας ως προς *Ksensor* τη σχέση

$$E = K_{balunOpt} \cdot K_{sensor} \cdot V_{sensor}$$

όπου οι τιμές των *E* (ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που μετρά το πεδίομετρο Narda NBM 550) και *KbalunOpt* λαμβάνονται από τον Πίνακα 17 και η τιμή του *Vsensor* (πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που απεικονίζει ο αισθητήρας Montena SFE3-5G στην οθόνη του παλμογράφου σε V) λαμβάνεται από τον Πίνακα 14.

Τέλος, η ενεργός επιφάνεια *Aeq* του αισθητήρα Montena SFE3-5G, υπολογίζεται λύνοντας ως προς *Aeq* τη σχέση

$$K_{sensor} = \frac{1}{R_s \cdot A_{eq} \cdot \epsilon_0 \cdot 2\pi f}$$

όπου *Rs* είναι η αντίσταση που βλέπει ο αισθητήρας προς το balun (50 Ω)

και $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A}^2\text{s}^4\text{kg}^{-1}\text{m}^{-3}$ είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

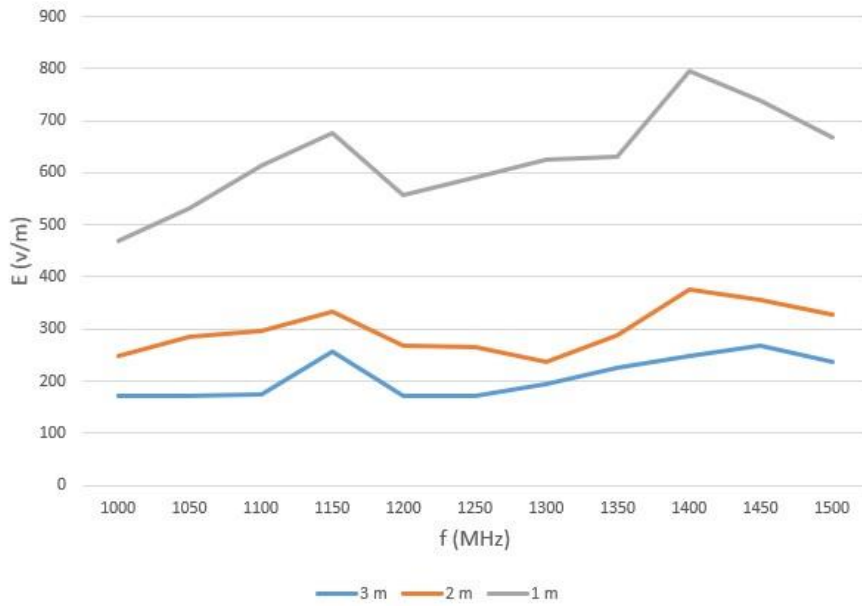
Από τον Πίνακα 17 προκύπτει ότι, οι τιμές που υπολογίσθηκαν για την ενεργό επιφάνεια *Aeq* του αισθητήρα, είναι μεγαλύτερες ή ίσες με την αντίστοιχη τιμή των 0,0020 m² που δίνεται από τον κατασκευαστή. Αυτό είναι πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι κατασκευασμένος κυρίως για τη μέτρηση παλμών DC, των οποίων το φάσμα ξεκινά από τη συχνότητα 0 Hz, άρα οι μετρήσεις εμφανίζουν μεγαλύτερη ακρίβεια στις χαμηλές συχνότητες. Επομένως, η τιμή της ενεργού επιφάνειας *Aeq* = 0,0020 m² που δίνεται από τον κατασκευαστή, είναι πιθανότατα προσαρμοσμένη στις χαμηλές συχνότητες, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η αύξησή της στα 0,0023 m²

στις υψηλότερες συχνότητες (1,0 GHz – 1,5 GHz), στις οποίες διενεργήθηκαν τα πειράματά μας.

4.1.2.4 Ενδεικτικές Μετρήσεις της Έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με Παλμικές Κυματομορφές

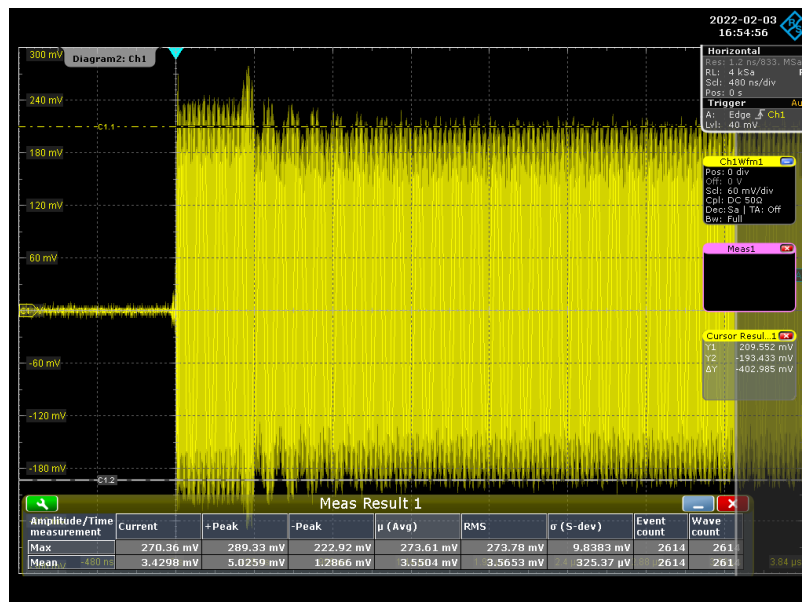
Στη συνέχεια, σε αντιδιαστολή με τις συνεχείς κυματομορφές (duty cycle 100%) του ενισχυτή Ophir 5225, διενεργήθηκαν ενδεικτικές μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με παλμικές κυματομορφές που παράγονται από τον ενισχυτή BONN Elektronik TWAP 0103-1000, για συχνότητες από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με duty cycle 5% και σε απόσταση 1 m, 2 m και 3m από την κεραία. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα ο αισθητήρας Montena SFE3-5G, ο οποίος υπολογίζει την ακριβή τιμή του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου και το πεδιόμετρο Narda NBM 550, το οποίο υπολογίζει την RMS τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με αξιοπιστία, ωστόσο, που θεωρείται οριακή για τιμές duty cycle χαμηλότερες του 5%. Στην έξοδο του balun συνδέθηκε εξασθενητής 20 dB.

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται οι τιμές του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όπως ελήφθησαν από τον αισθητήρα Montena SFE3-5G, για απόσταση 1 m, 2 m και 3 m από την κεραία. Στο Παράρτημα II.c απεικονίζεται το σύνολο των μετρήσεων.



Εικόνα 59: Τιμές πλάτους κορυφής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται ένας παλμός που παράγεται από τον ενισχυτή BONN Elektronik TWAP 0103-1000, όπως αυτός απεικονίζεται στο πεδίο του χρόνου στον παλμογράφο, από τον αισθητήρα Montena SFE3-5G.

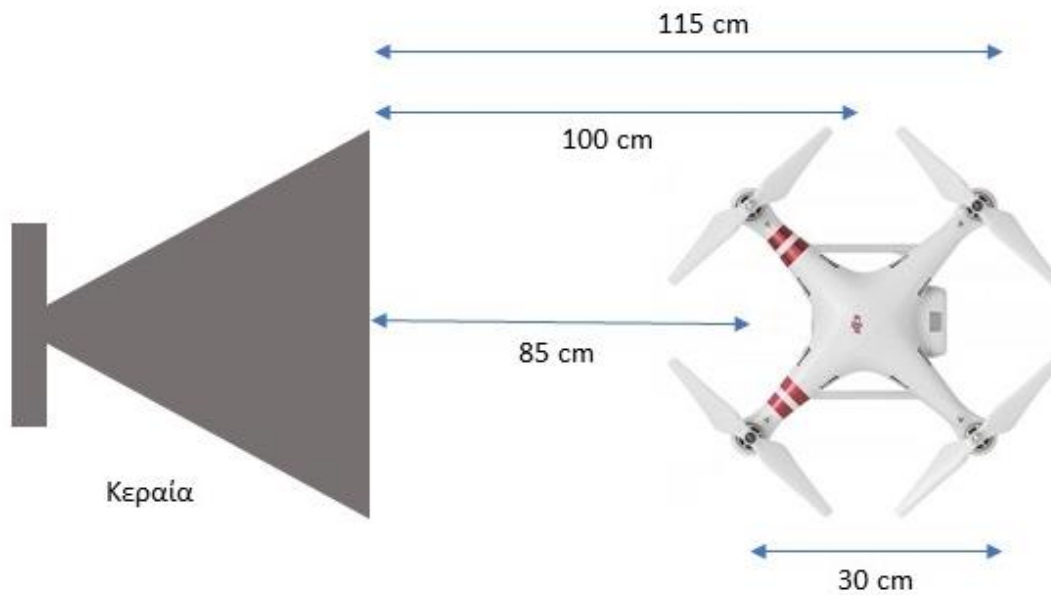


Εικόνα 60: Απεικόνιση παλμού στον παλμογράφο από τον αισθητήρα Montena SFE3-5G

Πρέπει, στο σημείο αυτό να τονισθεί, ότι όπως αποτυπώνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας-58, η ισχύς εξόδου του ενισχυτή BONN Elektronik TWAP 0103-1000 κατά κανόνα αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας. Ωστόσο, ο ενισχυτής κατά τη διάρκεια των δοκιμαστικών μετρήσεων εμφάνισε έντονη αστάθεια στη λειτουργία του σε επιλεγμένες συχνότητες. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε υψηλή διακύμανση και ταλάντωση στην έξοδό του, όπως αυτή μετρήθηκε από τον αισθητήρα Montena SFE3-5G, στις συχνότητες 1,0 GHz και 1,2 GHz. Η αστάθεια αυτή συνήθως αποκαθίστατο (για τη συχνότητα 1,0 GHz, αλλά όχι για συχνότητα 1,2 GHz) μετά από την παρέλευση κάποιων ωρών διαρκούς λειτουργίας. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πιθανότητα φθοράς ή βλάβης στον καθοδικό σωλήνα του ενισχυτή.

4.1.2.5 Έλεγχος της Ομοιομορφίας του Πεδίου

Τέλος, προκειμένου να διερευνηθεί η ύπαρξη ανομοιομορφίας στις μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος του ακτινοβολούμενου drone, λόγω της ασάφειας των ορίων του μακρινού πεδίου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές μετρήσεις σε τρία διαφορετικά σημεία κατά τη διαμήκη διεύθυνση του drone DJI Phantom 3 Standard, το οποίο έχει συνολικό μήκος 30 cm. Τα συγκεκριμένα σημεία στα οποία μετρήθηκε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ήταν το κέντρο του drone, σε απόσταση 1 m από την κεραία, το άκρο των μπροστινών βραχιόνων του drone, σε απόσταση 0,85 m από την κεραία και το άκρο των πίσω βραχιόνων του drone, σε απόσταση 1,15 m από την κεραία.



Εικόνα 61: Σημεία μετρήσεων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του drone

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (peak-to-peak τιμές σε mV/m) για τρεις ενδεικτικές συχνότητες, απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα. Στον ίδιο πίνακα απεικονίζεται (σε dB) η διαφορά των τιμών των ακραίων σημείων, σε σχέση με το κέντρο του drone.

f (MHz)	E (mV/m) peak-to-peak			Διαφορά Τιμών Ακραίων Σημείων (dB)	
	85 cm	100 cm	115 cm	$20 \cdot \log (85\text{cm}/100\text{cm})$	$20 \cdot \log (115\text{cm}/100\text{cm})$
1100	251,642	224,3	201,493	0,999077	-0,93139
1200	258,806	223,6	230,149	1,270051	0,250746
1300	325,97	265,3	292,836	1,788808	0,857744

Πίνακας 18: Μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του drone

Από τον παραπάνω πίνακα επιβεβαιώνεται η αναμενόμενη μείωση της τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης από την κεραία. Αντιθέτως, δεν παρατηρείται διαφορά στις τιμές μεταξύ των τριών διαφορετικών σημείων κατά μήκος του drone, τέτοια, ώστε να υποδηλώνει έντονη διακύμανση του πεδίου και παρουσία ισχυρού στάσιμου κύματος. Ωστόσο, για να μελετηθεί εκτενέστερα η ομοιομορφία του Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Δημήτρης Μπιζιούρας, AM DCOM-13

πεδίου, απαιτούνται περισσότερες μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος, πλάτος και ύψος του drone.

4.2 Μεθοδολογία και Διαδικασία Πειραμάτων

Εντός του ανηχωικού θαλάμου τοποθετήθηκε η κεραία, το υπό δοκιμή drone και το πεδιόμετρο. Το drone τοποθετήθηκε ακίνητο πάνω σε ξύλινη επίπεδη βάση, η οποία στηρίζονταν σε διηλεκτρικό στύλο, σε ύψος που συνέπιπτε με τον άξονα εκπομπής της κεραίας. Για λόγους ασφαλείας κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, οι έλικες του drone αφαιρέθηκαν.



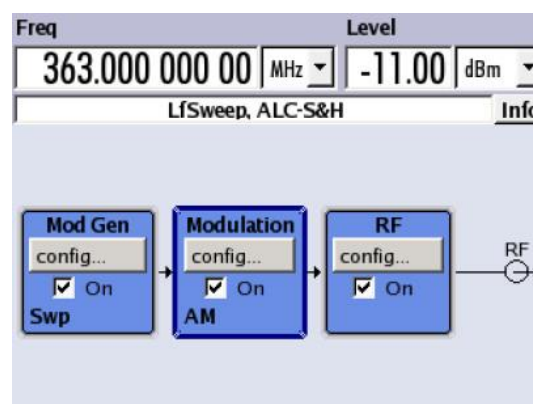
Εικόνα 62: Τοποθέτηση του drone πάνω σε βάση

Το τηλεχειριστήριο του drone τοποθετήθηκε πίσω από την κεραία, έτσι ώστε να μην διαταράσσεται η λειτουργία του από τυχόν ακτινοβολία, λόγω του -ωστόσο πολύ ασθενούς- οπίσθιου λοβού της κεραίας.

Τα πειράματα διενεργήθηκαν με την πόρτα του θαλάμου κλειστή και ασφαλισμένη. Πριν από την έναρξη των πειραμάτων, καθώς και περιοδικά κατά τη διάρκεια αυτών, πραγματοποιούνταν πλήρης μηδενισμός της ένδειξης του πεδιόμετρου, με την

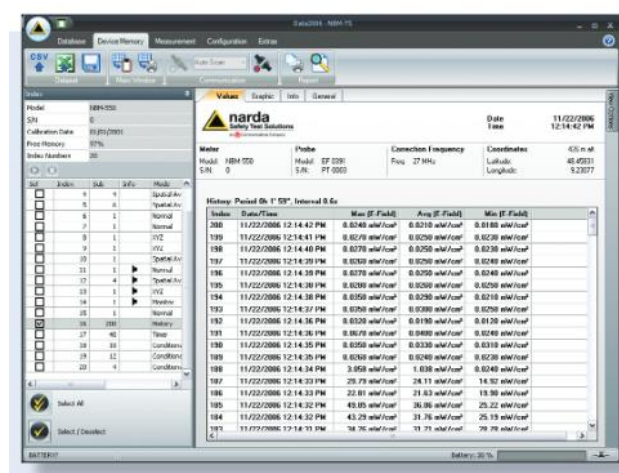
απομάκρυνση του τηλεχειριστηρίου του drone εκτός θαλάμου, λόγω της χαμηλής -αλλά υπαρκτής- ηλεκτρομαγνητικής εκπομπής που αυτό προκαλεί κατά τη λειτουργία του, της τάξης του 1 V/m.

Ο έλεγχος της λειτουργίας του μικροκυματικού εξοπλισμού, για λόγους ασφαλείας, πραγματοποιούνται απομακρυσμένα, μέσω υπολογιστή. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος λειτουργίας της γεννήτριας RF κυματομορφών Rohde & Schwarz SMB 100A πραγματοποιούνται μέσω κατάλληλου web interface που αυτή διαθέτει.



Εικόνα 63: Web interface για τη γεννήτρια RF Rohde & Schwarz SMB 100A [32]

Η απεικόνιση των μετρήσεων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (RMS τιμές), καθώς και ο έλεγχος της λειτουργίας του πεδιόμετρου Narda NBM 550, γίνονται απομακρυσμένα, μέσω του λογισμικού NBM-TS.

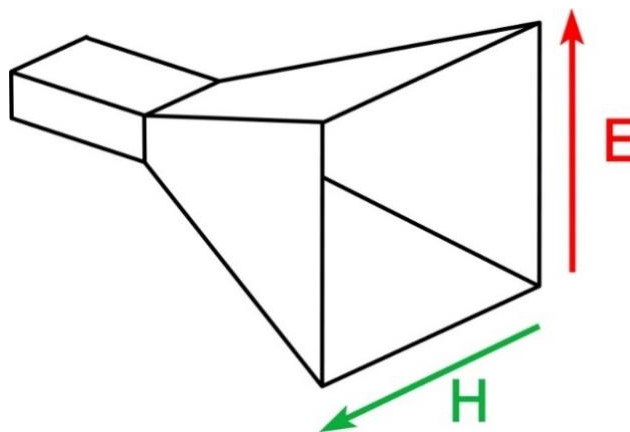


Εικόνα 64: Λογισμικό απομακρυσμένου ελέγχου NBM-TS για το πεδιόμετρο Narda NBM 550 [50]

Επίσης, εντός του θαλάμου τοποθετήθηκε κάμερα, η οποία παρακολουθούσε το drone και μετέφερε εικόνα και ήχο σχετικά με τη λειτουργία του, στον απομακρυσμένο υπολογιστή ελέγχου, μέσω USB σύνδεσης.

Κάθε φορά που έπρεπε να πραγματοποιηθεί επίσκεψη στον ανηχικό θάλαμο, είτε για επιθεώρηση του εξοπλισμού, είτε για επαναφορά της λειτουργίας του drone μετά από απενεργοποίησή του, τίθεντο εκτός λειτουργίας, τόσο ο ενισχυτής παλμών, όσο και οι δύο γεννήτριες RF κυματομορφών.

Προκειμένου να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα η διαδικασία σκόπιμης ακτινοβολίας του drone σε πραγματικές συνθήκες πτήσης, αλλά και σε συνδυασμό με τους περιορισμούς του περιβάλλοντος του ανηχικού θαλάμου, το drone τοποθετήθηκε διαδοχικά σε προκαθορισμένες θέσεις, που αντιστοιχούν στον τρόπο με τον οποίο σχετίζεται πόλωση της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου της εκπεμπόμενης από την κεραία ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τον άξονα τοποθέτησης του drone.



Εικόνα 65: Πόλωση των συνιστωσών του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου της κεραίας [51]

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζονται ενδεικτικά οι θέσεις που ορίστηκαν για την τοποθέτηση του drone DJI Phantom 3 Standard, αλλά η ίδια λογική ακολουθήθηκε και στην τοποθέτηση των υπόλοιπων δύο drones.



Head-1



Head-2



Side-1



Side-2



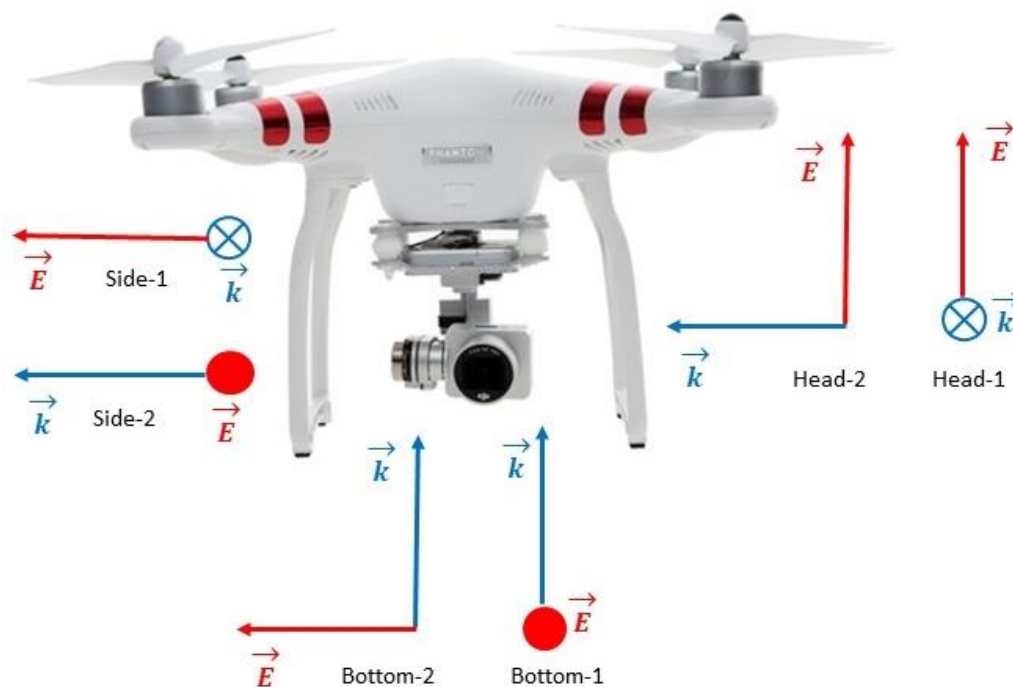
Bottom-1



Bottom-2

Εικόνα 66: Θέσεις τοποθέτησης του drone DJI Phantom 3 Standard

Οι θέσεις του drone σε σχέση με το διάνυσμα διάδοσης (k) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και της πόλωσης της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου (E), απεικονίζονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 67: Θέσεις του drone σε σχέση με το διάνυσμα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (\vec{k}) και της πόλωσης της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου (\vec{E})

Η διαδικασία των πειραμάτων περιλάμβανε τα εξής: Για κάθε θέση του drone, αυτό ακτινοβολήθηκε με σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή συχνότητας εντός του φάσματος 1,0 GHz – 1,5 GHz, με βήμα 10 KHz. Επομένως σε κάθε θέση, λαμβάνονταν 50 μετρήσεις, για ισάριθμες συχνότητες. Για κάθε συχνότητα, καταγράφονταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο του drone. Εάν εντός χρονικού διαστήματος 30 sec δεν παρατηρούνταν καμία μεταβολή στην κατάσταση των ενδεικτικών λυχνιών πτήσης (LEDs) του drone ή στον ήχο του κινητήρα, που παρακολουθούνταν διαρκώς μέσω της κάμερας, γίνονταν μετάβαση στην επόμενη συχνότητα. Εάν σε κάποια συχνότητα παρατηρούνταν σβήσιμο του drone, δηλαδή απενεργοποίηση όλων των κινητήρων του, καταγράφονταν ο χρόνος που απαιτήθηκε για την απενεργοποίηση και στη συνέχεια τόσο το drone, όσο και το τηλεχειριστήριο επαναφέρονταν σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας (reset) και συνεχίζονταν η διαδικασία των πειραμάτων.

Κατά το στάδιο της τελικής μαθηματικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων και για λόγους ακριβέστερης προσομοίωσης της θέσης του drone όταν αυτό ακτινοβολείται σε Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Δημήτρης Μπιζιούρας, AM DCOM-13

πραγματικές συνθήκες πτήσης, ορίσθηκαν θεωρητικά δύο ευρύτερες πολώσεις του drone: η κατακόρυφη πόλωση (VERT_POL), ως άθροισμα των αποτελεσμάτων για κάθε συχνότητα, των φυσικών θέσεων Head1, Head2, Bottom1, Bottom2 του drone και η οριζόντια πόλωση (HOR_POL), ως άθροισμα των αποτελεσμάτων για κάθε συχνότητα, των φυσικών θέσεων Side1, Side2, Bottom1, Bottom2 του drone. Επίσης, για λόγους πληρότητας στην ανάλυση, ορίσθηκε και μια γενική πόλωση (SUM), ως άθροισμα των αποτελεσμάτων για κάθε συχνότητα, όλων των φυσικών θέσεων του drone (Head1, Head2, Side1, Side2, Bottom1, Bottom2). Συνοψίζοντας, οι ομαδοποιήσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων VERT_POL και HOR_POL αντιστοιχούν στις γωνίες πρόσπτωσης και τις πολώσεις στις οποίες αναλύεται ένα ακτινοβολούμενο πεδίο από μία επίγεια κεραία κατακόρυφα και οριζόντια πολωμένη, αντίστοιχα. Επίσης, αξίζει να επισημανθεί ότι οι φυσικές θέσεις Head1, Head2, Side1 και Side2 αποκτούν μία μεγαλύτερη σημασία όταν η κλίση της στόχευσης του MEEO είναι μικρή. Αντίθετα, όταν η κλίση της στόχευσης είναι μεγάλη, οι φυσικές θέσεις Bottom1, Bottom2 έχουν μεγαλύτερη σημασία. Όπως προαναφέρθηκε, πρωταρχικός σκοπός των πειραμάτων ήταν ο εντοπισμός των συχνοτήτων εκείνων, για τις οποίες προκαλούνταν σβήσιμο ή άλλη διαταραχή της λειτουργίας του drone, στο μικρότερο δυνατό χρόνο και με τη χαμηλότερη δυνατή τιμή έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, σε όσο το δυνατόν περισσότερες θέσεις, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και πολώσεις της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου.

Για το λόγο αυτό, στη μαθηματική ανάλυση, ως κριτήριο για τον εντοπισμό των κρίσιμων συχνοτήτων ενδιαφέροντος, χρησιμοποιήθηκε το μέγεθος του αντιστρόφου του γινομένου του χρόνου σβησίματος t επί την RMS τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E (με έναν συντελεστή 100 για λόγους αριθμητικής κλίμακας).

$$\text{Κριτήριο Συχνοτήτων} \frac{100}{t \cdot E}$$

Όσο μεγαλύτερο ήταν το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, τόσο πιο υψηλή ήταν η πιθανότητα για τη συχνότητα αυτή να

περιλαμβάνεται στις τελικές ενδιαφέρουσες συχνότητες. Το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων απεικονίζεται στα αποτελέσματα στον κατακόρυφο άξονα όλων των διαγραμμάτων, ενώ στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz.

Κατά την ακτινοβολήση των drones, η ισχύς και η συχνότητα ακτινοβολήσης ορίζονταν στη γεννήτρια RF Rohde & Schwarz SMB 100A απομακρυσμένα, μέσω web interface, ενώ τοπικά στη γεννήτρια RF κυματομορφών Agilent 33220A ορίζονταν η διάρκεια των παλμών διαμόρφωσης και η συχνότητα επανάληψης τους (PRF) και επομένως και ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) των παλμών, αφού ισχύει

$$Duty Cycle = PRF \times Pulse Duration$$

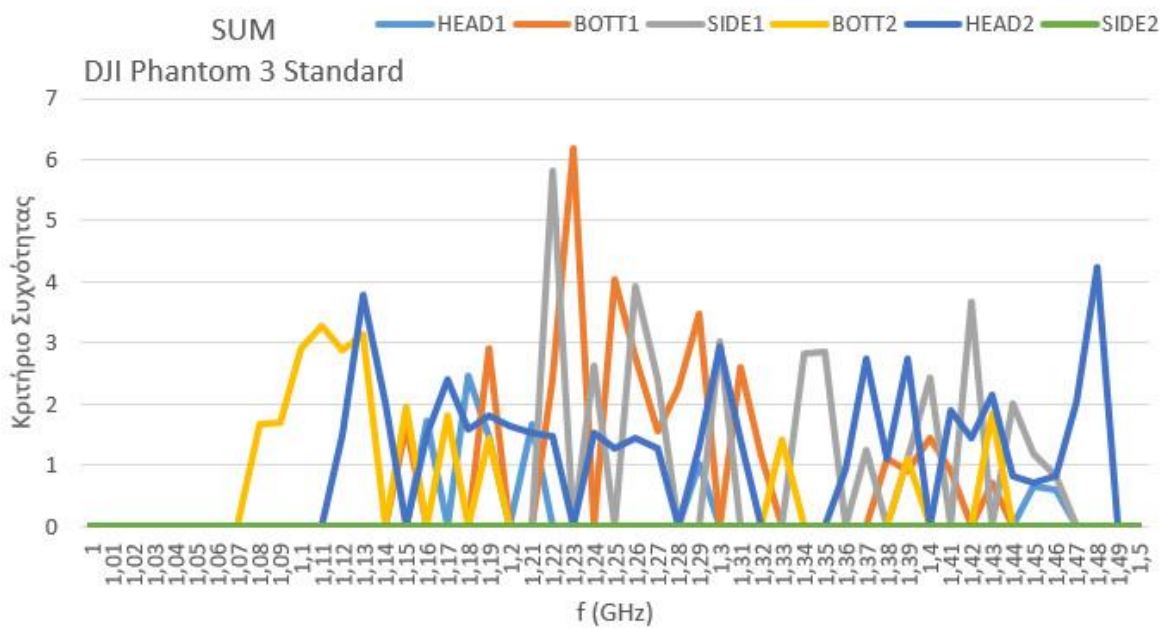
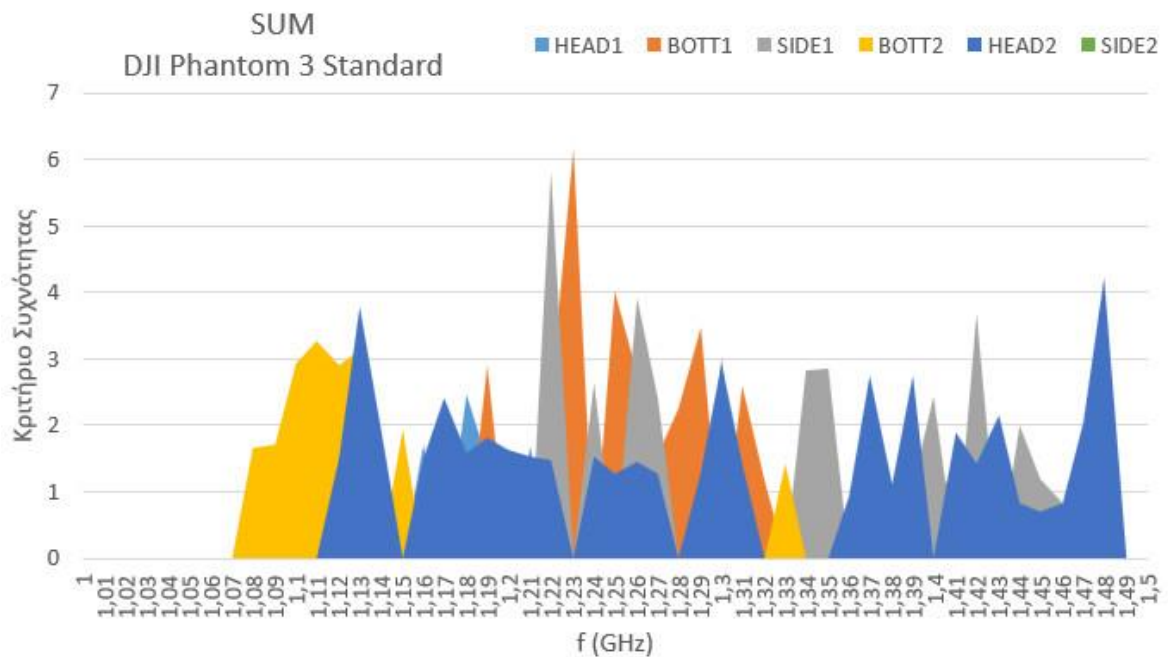
4.3 Αποτελέσματα Πειραμάτων

Τα αποτελέσματα των διενεργηθέντων πειραμάτων, καθώς και η μαθηματική ανάλυσή τους, παρατίθενται διεξοδικά στα επόμενα, για κάθε drone χωριστά.

4.3.1 DJI Phantom 3 Standard

Το drone DJI Phantom 3 Standard τοποθετήθηκε σε απόσταση 3,2 m από την κεραία και ακτινοβολήθηκε με ισχύ -23 dBm, διάρκεια παλμού 50 msec και συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) 1 KHz (Duty Cycle 5 %). Το drone έσβησε σε όλες τις θέσεις σε επιλεγμένες συχνότητες, εκτός από τη θέση Side2, όπου δεν παρατηρήθηκε καμία διαταραχή στη λειτουργία του, σε καμία συχνότητα, ενώ σε τυχαία δοκιμή που πραγματοποιήθηκε στη θέση αυτή, σε συχνότητα 1,12 GHz με αύξηση της ισχύος στα -10 dBm, το drone έσβησε σε χρόνο 4 Sec.

Στο επόμενο διάγραμμα εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για τη γενική πόλωση (SUM) για το drone DJI Phantom 3 Standard. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz.

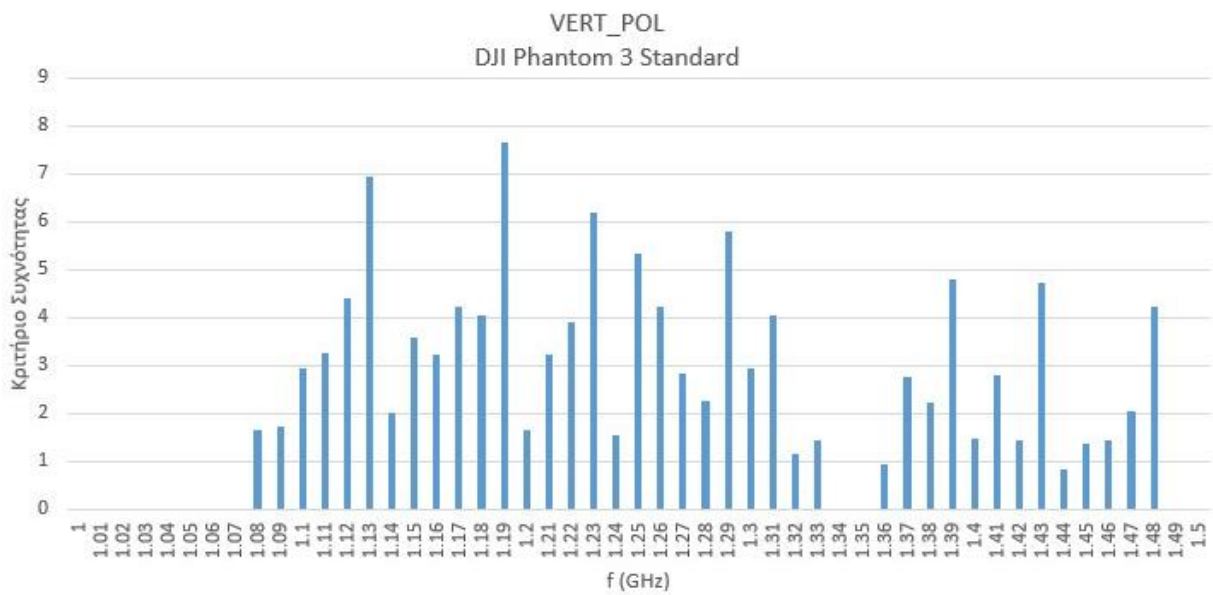


Εικόνα 68: Αποτελέσματα των πειραμάτων για τη γενική πόλωση (SUM) για το drone DJI Phantom 3 Standard

Σύμφωνα με τα εικονιζόμενα αποτελέσματα και όπως είναι αναμενόμενο η γωνία πρόσπτωσης και η πόλωση αποτελούν παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν την ηλεκτρομαγνητική ατρωσία των υπό έλεγχο drones. Ουσιαστικά, η γωνία πρόσπτωσης

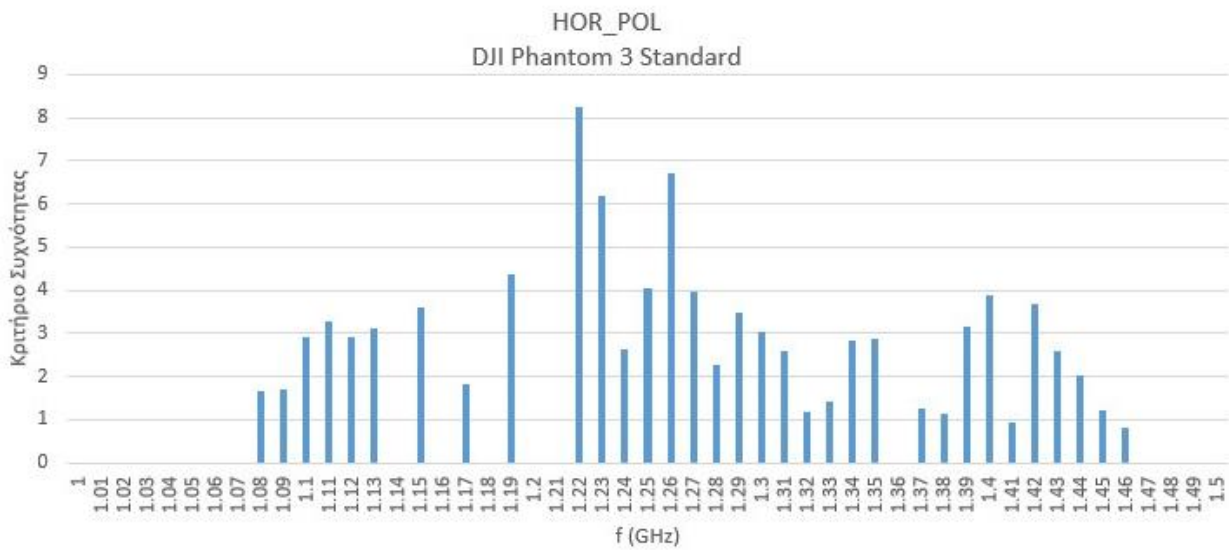
και η πόλωση καθορίζουν τον συντελεστή σύζευξης μεταξύ του ακτινοβολούμενου πεδίου και του drone, καθώς και τη φυσική διαδρομή των επαγόμενων σημάτων παρεμβολής έως τα υποσυστήματα, τα οποία παρεμβάλλονται με κρίσιμο τρόπο. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι εμφανές ότι ανάλογα με τη συχνότητα, η ένταση των φαινομένων παρεμβολής δημιουργεί είτε ταυτοτικές είτε συμπληρωματικές σχέσεις ανάμεσα στις διαφορετικές πειραματικές τοπολογίες. Για παράδειγμα, η εκπομπή στη ζώνη συχνοτήτων 1,1 GHz – 1,2 GHz φαίνεται να επιδρά περισσότερο στις φυσικές θέσεις Head2, Bottom1 και Bottom 2 και ως εκ τούτου σχετίζεται με την κατακόρυφη πόλωση. Στη ζώνη συχνοτήτων 1,2 GHz – 1,3 GHz τα φαινόμενα παρεμβολών εντοπίζονται στις φυσικές θέσεις Side1, Head2 και Bottom1 και ως εκ τούτου σχετίζονται τόσο με την οριζόντια όσο και με την κατακόρυφη πόλωση. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στη ζώνη συχνοτήτων 1,4 GHz -1,5 GHz, όπου τα φαινόμενα εντοπίζονται στις φυσικές θέσεις Head2, Side1, Bottom1 και Bottom2. Η επιλεκτικότητα ως προς την πόλωση εξετάζεται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην Εικόνα 69 και στην Εικόνα 70.

Στο επόμενο ραβδόγραμμα (Εικόνα 69) εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για την κατακόρυφη πόλωση (VERT_POL), για το drone DJI Phantom 3 Standard. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz. Τα αποτελέσματα της Εικόνας 69 επιβεβαιώνουν τα σχόλια που διατυπώθηκαν στην Εικόνα 68. Η κατακόρυφη πόλωση φαίνεται να επιτυγχάνει προνομακική σύζευξη με το MEEO σε μία ζώνη συχνοτήτων 1,1 GHz - 1,3 GHz. Φαινόμενα παρεμβολών εντοπίζονται και στη ζώνη συχνοτήτων 1,4 GHz – 1,5 GHz αλλά συγκριτικά με αυτά της ζώνης 1,1 GHz - 1,3 GHz, η ένταση των φαινομένων είναι εξασθενημένη βάσει του κριτηρίου συχνοτήτων.



Εικόνα 69: Αποτελέσματα των πειραμάτων για την κατακόρυφη πόλωση (VERT_POL) για το drone DJI Phantom 3 Standard

Στο ραβδόγραμμα της Εικόνας 70 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για την οριζόντια πόλωση (HOR_POL), για το drone DJI Phantom 3 Standard. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz. Σύμφωνα με τα εικονιζόμενα αποτελέσματα, η προνομιακή ζώνη συχνοτήτων για την οριζόντια πόλωση περιορίζεται στη ζώνη συχνοτήτων 1,22 GHz – 1,35 GHz. Εκτός αυτής της ζώνης συχνοτήτων τα φαινόμενα είναι πιο διάσπαρτα και συγκριτικά μικρότερης έντασης.



Εικόνα 70: Αποτελέσματα των πειραμάτων για την οριζόντια πόλωση (HOR_POL) για το drone DJI Phantom 3 Standard

Στους Πίνακες 19 και 20 αποτυπώνονται οι πιο ενδιαφέρουσες συχνότητες για το drone DJI Phantom 3 Standard, για κάθε πραγματική θέση του drone, υπολογισμένες με κριτήριο την κάθε μία από τις δύο θεωρητικές θέσεις – πολώσεις, κατακόρυφη και οριζόντια. Στους ίδιους πίνακες απεικονίζεται η αντίστοιχη RMS τιμή της έντασης του E του ηλεκτρικού πεδίου και ο χρόνος που απαιτήθηκε για το σβήσιμο του drone. Η ταξινόμηση των συχνοτήτων γίνεται ξεκινώντας από την καλύτερη. Στις περιπτώσεις όπου δεν επιτυγχάνεται απενεργοποίηση των κινητήρων του MEEO, στη στήλη του χρόνου t καταχωρείται η ένδειξη ∞ . Σε κάθε Πίνακα χρωματίζονται οι στήλες, οι οποίες περιλαμβάνουν φυσικές τοποθετήσεις που αντιστοιχούν στη συμπληρωματική πόλωση. Η συμπερίληψη αυτών των στηλών διευκολύνει τον εντοπισμό των συχνοτήτων, των οποίων η μειωμένη ατρωσία δεν είναι επιλεκτική ως προς την πόλωση. Στο Παράρτημα III.a απεικονίζεται το σύνολο των μετρήσεων.

Drone: DJI Phantom 3 Standard Πόλωση: Κατακόρυφη (VERT_POL)		P: -23 dBm d: 3,2 m		Pulse Width: 50 μsec PRF: 1 KHz Duty Cycle: 5 %				
Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζεται σε RMS τιμές								
f (GHz)	Head1		Head2		Bottom1		Bottom2	
	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)
1,19	6	11,3	6	9,2	4	8,6	7	9,78
1,13	∞	7,8	4	6,6	∞	6,4	5	6,38
1,23	∞	9	∞	9,4	2	8,1	∞	7,8
1,29	10	9,7	10	7,7	4	7,2	∞	7,9
1,25	∞	9,6	10	7,8	4	6,2	∞	6,7

Πίνακας 19: Συχνότητες ενδιαφέροντος για το drone DJI Phantom 3 Standard σε κατακόρυφη πόλωση

Drone: DJI Phantom 3 Standard Πόλωση: Οριζόντια (HOR_POL)		P: -23 dBm d: 3,2 m		Pulse Width: 50 μsec PRF: 1 KHz Duty Cycle: 5 %				
Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζεται σε RMS τιμές								
f (GHz)	Side1		Side2		Bottom1		Bottom2	
	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)
1,22	4	4,3	∞	9,6	5	8,2	∞	7,76
1,26	5	5,1	∞	8,9	6	6	∞	6,9
1,23	∞	5,7	∞	9,9	2	8,1	∞	7,8
1,19	∞	5,8	∞	9,4	4	8,6	7	9,78
1,25	∞	4,9	∞	8,9	4	6,2	∞	6,7

Πίνακας 20: Συχνότητες ενδιαφέροντος για το drone DJI Phantom 3 Standard σε οριζόντια πόλωση

Αξίζει να επισημανθεί ότι οι τιμές της έντασης του προσπίπτοντος πεδίου είναι ιδιαίτερα χαμηλές (< 11,3 V/m RMS). Οι χαμηλές τιμές του πεδίου ομοιάζουν με αυτές που θα παρατηρούσαμε σε σενάρια jamming αλλά στις εξεταζόμενες περιπτώσεις το ενδεχόμενο της σύζευξης μέσω της κεραίας (front door coupling) θα πρέπει να αποκλεισθεί για

τουλάχιστον δύο λόγους: α) τα ασύρματα κανάλια του DJI Phantom 3 Standard λειτουργούν σε αρκετά υψηλότερες συχνότητες (2,45 GHz και 5 GHz) και β) οι φυσικές τοποθετήσεις Bottom1 και Bottom2 στις οποίες παρατηρούνται σοβαρές διαταραχές χαρακτηρίζονται από ασύμβατη πόλωση της κεραίας σε σχέση με την πόλωση του ακτινοβολούμενου πεδίου. Το ζήτημα αυτό θα σχολιασθεί εκτενέστερα στην ενότητα των συμπερασμάτων του παρόντος κεφαλαίου.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα 1,19 GHz επιδεικνύει μειωμένη ατρωσία και στις δύο πολώσεις, ενώ αυτό ισχύει ανεξάρτητα της κλίσης της στόχευσης (γωνία ανύψωσης, αζιμουθίου). Επίσης, η συχνότητα 1,29 GHz παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τη διαφορά ότι επιδεικνύει μια αυξημένη επιλεκτικότητα συγκριτικά με την 1,19 GHz, σε ό,τι αφορά την αζιμουθιακή γωνία πρόσπτωσης.

4.3.2 DJI Mavic Air

Το drone DJI Mavic Air τοποθετήθηκε σε απόσταση 1 m και 2 m από την κεραία, και ακτινοβολήθηκε με ισχύ -1 dBm και -3 dBm, διάρκεια παλμού 50 μsec και συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) 1 KHz (Duty Cycle 5 %). Η τοποθέτησή του σε μικρότερες αποστάσεις προέκυψε από την αδυναμία πρόκλησης διαταραχών στην απόσταση των 3.2 m. Ωστόσο, οι κινητήρες έσβησαν μόνο στις θέσεις Head1 και Bottom1. Σε όλες τις υπόλοιπες θέσεις δεν παρατηρήθηκε καμία διαταραχή στη λειτουργία του, σε καμία συχνότητα. Όμως, στη θέση Bottom1, για ισχύ -3 dBm και σε απόσταση 1 m από την κεραία, στη συχνότητα 1,09 GHz, υπέστη ανεπανόρθωτη βλάβη η πρώτη μπαταρία του drone. Οι μετρήσεις συνεχίστηκαν με τη δεύτερη μπαταρία του drone, ξεκινώντας αντίστροφα, από τη συχνότητα 1,5 GHz. Όμως, στη συχνότητα 1,19 GHz, υπέστη ανεπανόρθωτη βλάβη και η δεύτερη μπαταρία. Για το λόγο αυτό, δεν κατέστη δυνατόν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στο διάστημα συχνοτήτων από 1,09 GHz έως 1,19 GHz.

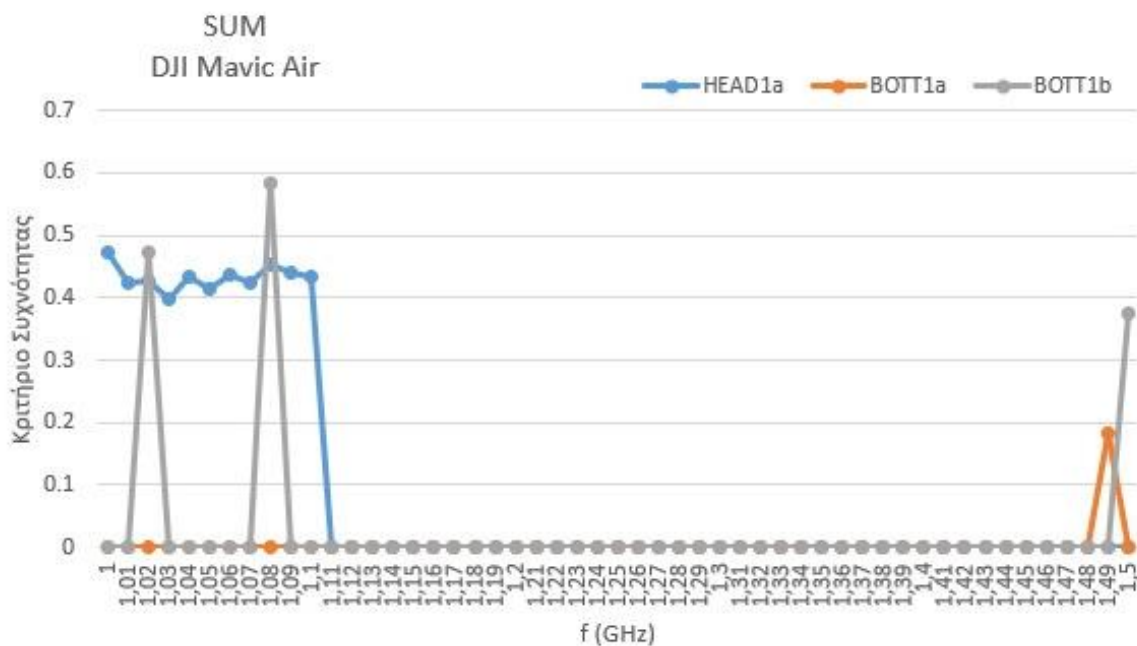
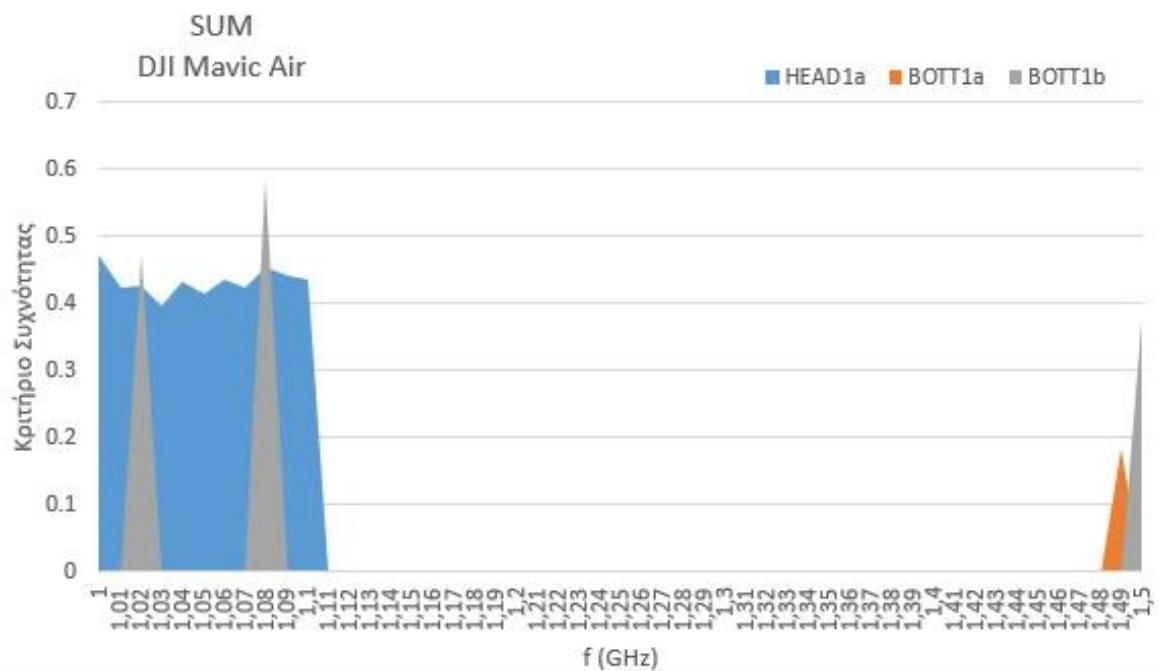


Εικόνα 71: Μπαταρία του drone DJI Mavic Air [52]

Στο επόμενο διάγραμμα εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για τη γενική πόλωση (SUM) για το drone DJI Mavic Air. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz.

Οι πειραματικές τοπολογίες Head1 και Bottom1a αφορούν πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με ισχύ οδήγησης του ενισχυτή $P=-1$ dBm σε απόσταση $d=1$ m και $d=2$ m αντίστοιχα, ενώ στην περίπτωση της τοπολογίας Bottom1b, η ισχύς οδήγησης είναι $P=-3$ dBm και η απόσταση είναι $d=1$ m.

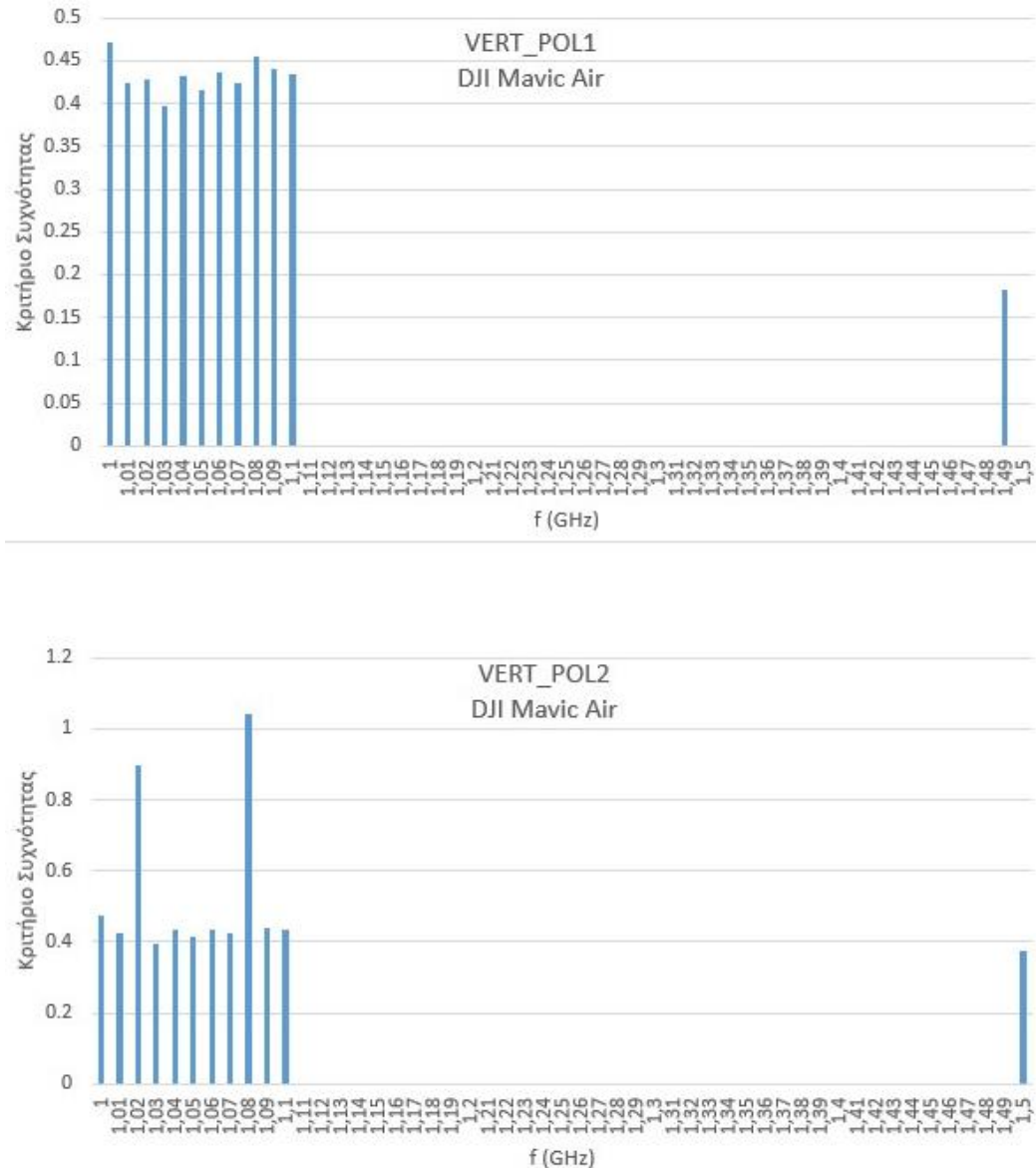
Τα αποτελέσματα της Εικόνας 72 αναδεικνύουν μία συμπαγή ζώνη συχνοτήτων 1,0 GHz – 1,1 GHz πρόκλησης διαταραχών στη θέση Head1 σε απόσταση 1m και ισχύ -1 dBm και με σαφώς ενισχυμένη ακτινοβολία από τη μετακίνηση στα -3 dBm, προκύπτουν μεμονωμένες συχνότητες πρόκλησης διαταραχών για τη θέση Bottom1b. Τα φαινόμενα των διαταραχών εμφανίζονται και περίπου στο 1,5 GHz αλλά αυτήν τη φορά αποκλειστικά για τη θέση Bottom1.



Εικόνα 72: Αποτελέσματα των πειραμάτων για τη γενική πόλωση (SUM) για το drone DJI MAVIC Air

Στο ραβδόγραμμα της Εικόνας 73 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για δύο διαφορετικές περιπτώσεις κατακόρυφης πόλωσης (VERT_POL1: P=-1 dBm, d=1 m και d=2 m και VERT_POL2: P=-1 dBm και P=-3 dBm, d=1 m), για αντίστοιχες αποστάσεις και τιμές ισχύος, για το drone DJI MAVIC Air. Στον

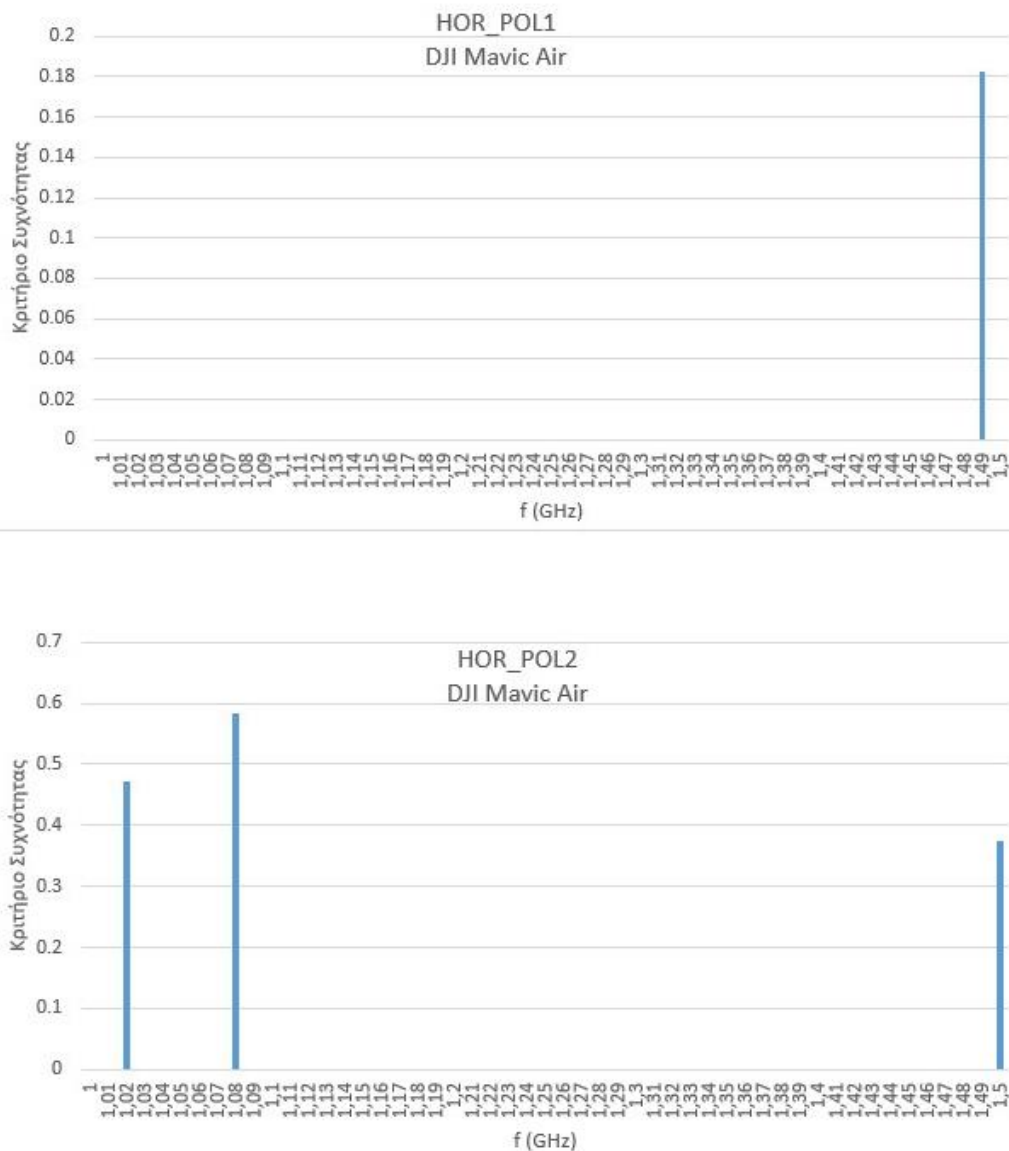
κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz.



Εικόνα 73: Αποτελέσματα των πειραμάτων για την κατακόρυφη πόλωση (VERT_POL) για το drone DJI Mavic Air

Στο ραβδόγραμμα της Εικόνας 74 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για δύο διαφορετικές περιπτώσεις οριζόντιας πόλωσης (HOR_POL1 και HOR_POL2), για αντίστοιχες αποστάσεις και τιμές ισχύος, για το drone DJI Mavic Air. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον

οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz. Όπως είναι αναμενόμενο η περίπτωση της οριζόντιας πόλωσης είναι συγκριτικά με τη κατακόρυφη πόλωση αναποτελεσματική διότι περιλαμβάνει μόνο τα αποτελέσματα της φυσικής θέσης bottom1, δεδομένου ότι σε όλες τις υπόλοιπες θέσεις δεν προκαλούνται παρεμβολές.



Εικόνα 74: Αποτελέσματα των πειραμάτων για την οριζόντια πόλωση (HOR_POL) για το drone DJI Mavic Air

Στους επόμενους πίνακες αποτυπώνονται οι πιο ενδιαφέρουσες συχνότητες για το drone DJI Mavic Air, για κάθε πραγματική θέση του MEEO, υπολογισμένες με κριτήριο την κάθε μία από τις δύο θεωρητικές θέσεις – πολώσεις, κατακόρυφη και οριζόντια (δύο Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Δημήτρης Μπιζιούρας, AM DCOM-13

διαφορετικές περιπτώσεις για κάθε πόλωση, για αντίστοιχες αποστάσεις και τιμές ισχύος $P=-1$ dBm, $d=2$ m και $P=-3$ dBm, $d=1$ m). Στους ίδιους πίνακες απεικονίζεται η αντίστοιχη RMS τιμή της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου και ο χρόνος που απαιτήθηκε για το σβήσιμο του drone. Η ταξινόμηση των συχνοτήτων γίνεται ξεκινώντας από την καλύτερη. Στο Παράρτημα III.b απεικονίζεται το σύνολο των μετρήσεων.

Drone: Mavic Air		P: -1 dBm		Pulse Width: 50 μsec	
Πόλωση: Κατακόρυφη 1 (VERT_POL1)		d: 1 m, 2 m		PRF: 1 KHz	
				Duty Cycle: 5 %	
Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζεται σε RMS τιμές					
f (GHz)	Head1 (d = 1 m)			Bottom1a (d = 2 m)	
	t (sec)	E (V/m)	t (sec)	E(V/m)	
1	1	212	∞	113	
1,08	1	220	∞	126	
1,09	1	227	∞	152	
1,06	1	229	∞	142	
1,1	1	230	∞	165	

Πίνακας 21: Συχνότητες ενδιαφέροντος για το drone DJI Mavic Air σε κατακόρυφη πόλωση 1

Drone: Mavic Air		P: -1 dBm, -3 dBm		Pulse Width: 50 μsec	
Πόλωση: Κατακόρυφη 2 (VERT_POL2)		d: 1 m		PRF: 1 KHz	
				Duty Cycle: 5 %	
Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζεται σε RMS τιμές					
f (GHz)	Head1 (P = -1 dBm)			Bottom1b (P = -3 dBm)	
	t (sec)	E (V/m)	t (sec)	E(V/m)	
1,08	1	220	1	171	
1,02	1	234	1	212	
1	1	212	∞	158	
1,09	1	227	∞	ΒΛΑΒΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	
1,06	1	229	∞	233	

Πίνακας 22: Συχνότητες ενδιαφέροντος για το drone DJI Mavic Air σε κατακόρυφη πόλωση 2

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πινάκων 21 και 22 προκύπτει μία απαίτηση για ένα πεδίο με ένταση της τάξης των 200 V/m RMS προκειμένου να προκληθούν διαταραχές στις θέσεις Head1 και Bottom1.

Drone: Mavic Air Πόλωση: Οριζόντια 1 (HOR_POL1)	P: -1 dBm d: 2 m	Pulse Width: 50 µsec PRF: 1 KHz Duty Cycle: 5 %
Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζεται σε RMS τιμές		
	Bottom1a	
f (GHz)	t (sec)	E(V/m)
1,49	2	274

Πίνακας 23: Συχνότητες ενδιαφέροντος για το drone DJI Mavic Air σε οριζόντια πόλωση 1

Drone: Mavic Air Πόλωση: Οριζόντια 2 (HOR_POL2)	P: -3 dBm d: 1 m	Pulse Width: 50 µsec PRF: 1 KHz Duty Cycle: 5 %
Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζεται σε RMS τιμές		
	Bottom1b	
f (GHz)	t (sec)	E(V/m)
1,08	1	171
1,02	1	212
1,5	1	267

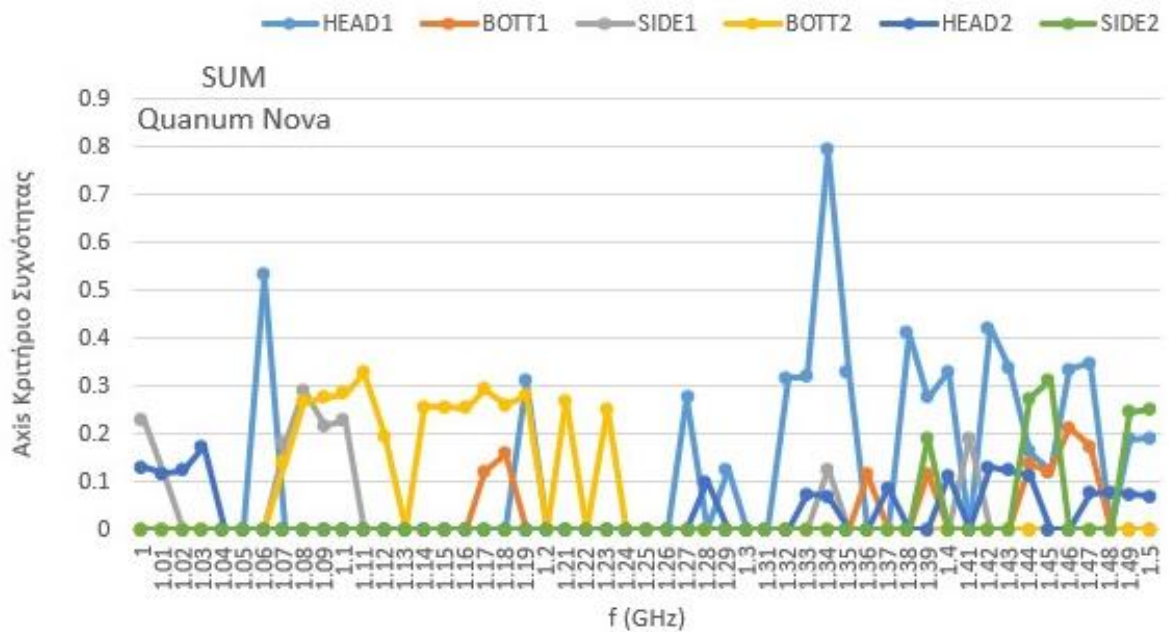
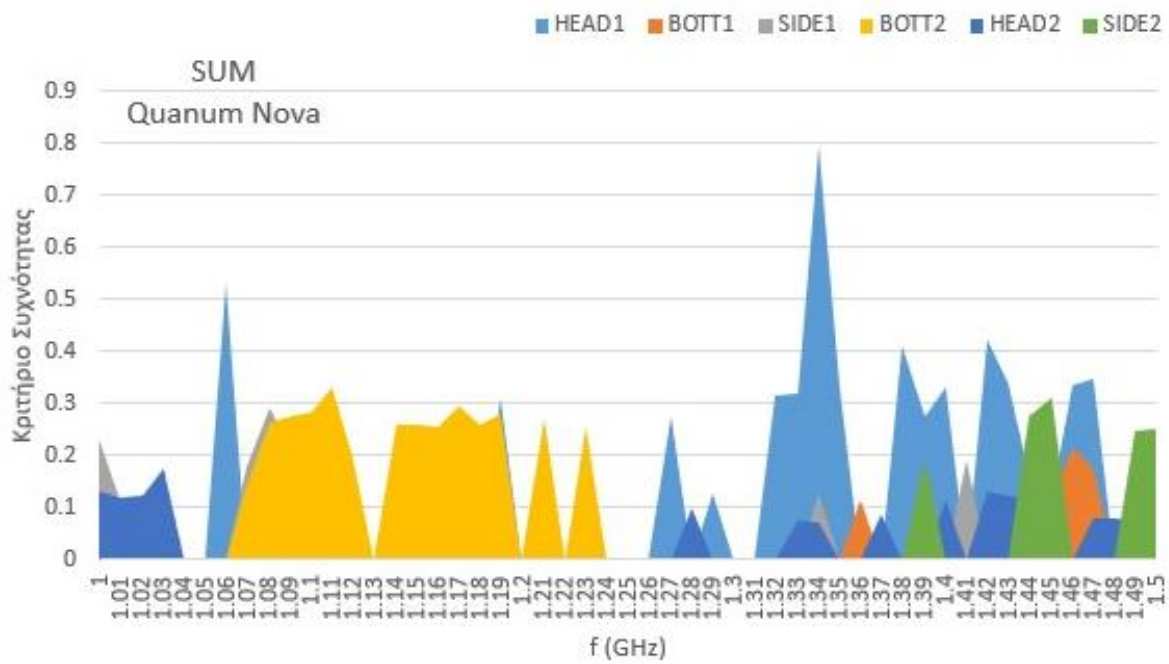
Πίνακας 24: Συχνότητες ενδιαφέροντος για το drone DJI Mavic Air σε οριζόντια πόλωση 2

Τα αποτελέσματα των Πινάκων 23 και 24 αναδεικνύουν την επιπλέον δυνατότητα πρόκλησης διαταραχών σε υψηλότερη συχνότητα (1,49 GHz – 1,50 GHz) με την προϋπόθεση της αύξησης της έντασης του πεδίου σε μία τιμή 270 V/m RMS.

4.3.3 Quanium Nova

Το drone Quanium Nova τοποθετήθηκε σε απόσταση 1 m και 2 m από την κεραία, και ακτινοβολήθηκε με ισχύ -3 dBm, διάρκεια παλμού 50 μ sec και συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) 1 KHz (Duty Cycle 5 %). Το drone έσβησε σε όλες τις θέσεις σε επιλεγμένες συχνότητες, ενώ σε ορισμένες θέσεις και συχνότητες, παρατηρήθηκε αυξομείωση του ήχου των κινητήρων, υποδηλώνοντας διαταραχή στη λειτουργία, χωρίς ωστόσο να σβήσει.

Στο επόμενο διάγραμμα εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για τη γενική πόλωση (SUM) για το drone Quanium Nova. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz.

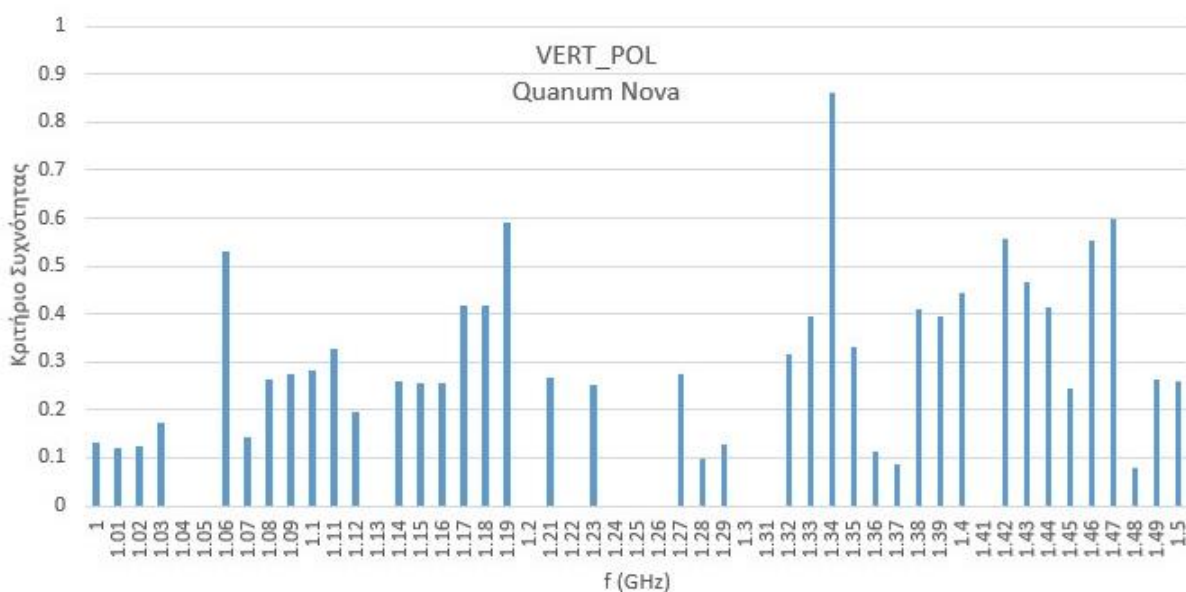


Εικόνα 75: Αποτελέσματα των πειραμάτων για τη γενική πόλωση (SUM) για το drone Quantum Nova

Τα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 75, επιδεικνύουν μία αξιοσημείωτη συμπληρωματικότητα ως προς τη φυσική θέση στη ζώνη συχνοτήτων 1,0 GHz – 1,3 GHz, π.χ. σε πολύ λίγες συχνότητες εμφανίζονται σοβαρές διαταραχές σε δύο διαφορετικές φυσικές θέσεις. Ως εκ τούτου, η ζώνη συχνοτήτων 1,0 GHz – 1,3 GHz

χαρακτηρίζεται από μία έντονη επιλεκτικότητα ως προς τη γωνία πρόσπτωσης του ακτινοβολούμενου πεδίου. Το γεγονός αυτό αναιρείται σε σημαντικό βαθμό στη ζώνη 1,3 GHz – 1,5 GHz. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι στη ζώνη 1,3 GHz – 1,5 GHz το ακτινοβολούμενο πεδίο είναι ισχυρότερο (Εικόνα 59), οπότε η ανάδειξη των παρεμβολών είναι αναμενόμενη. Η διαφοροποίηση ανάμεσα στις δύο πολώσεις παρουσιάζεται στις Εικόνες 76 και 77.

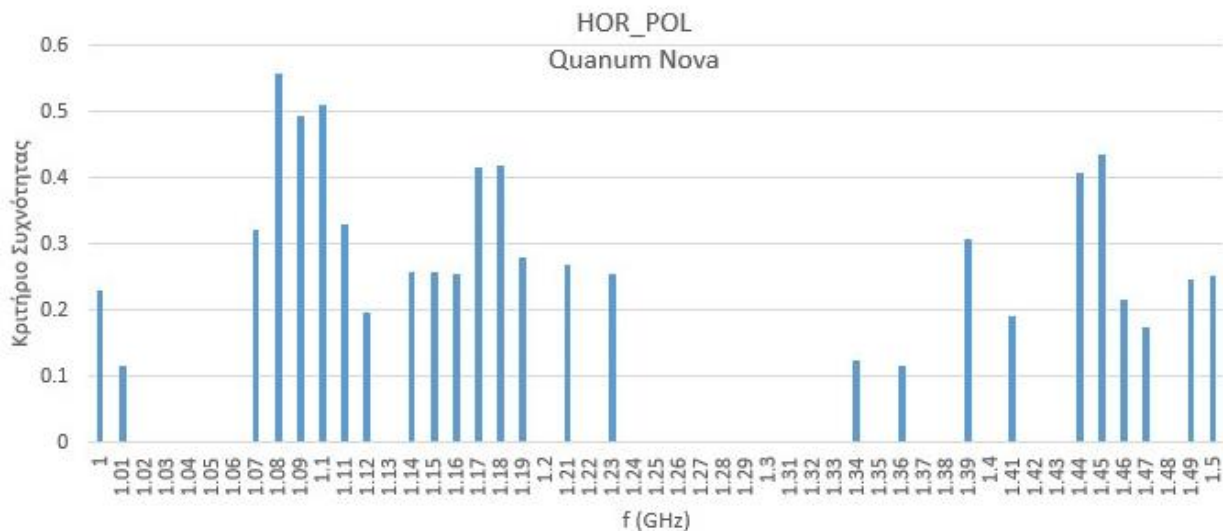
Στο ραβδόγραμμα της Εικόνας 76 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για την κατακόρυφη πόλωση (VERT_POL), για το drone Quantum Nova. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz.



Εικόνα 76: Αποτελέσματα των πειραμάτων για την κατακόρυφη πόλωση (VERT_POL) για το drone Quantum Nova

Στο επόμενο ραβδόγραμμα εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε συχνότητα, για την οριζόντια πόλωση (HOR_POL), για το drone Quantum Nova. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το μέγεθος του κριτηρίου συχνοτήτων και στον

οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες στο φάσμα από 1,0 GHz έως 1,5 GHz, με βήμα 10 MHz.



Εικόνα 77: Αποτελέσματα των πειραμάτων για την οριζόντια πόλωση (HOR_POL) για το drone Quantum Nova

Στους επόμενους πίνακες αποτυπώνονται οι πιο ενδιαφέρουσες συχνότητες για το drone Quantum Nova, για κάθε πραγματική θέση του drone, υπολογισμένες με κριτήριο την κάθε μία από τις δύο θεωρητικές θέσεις – πολώσεις, κατακόρυφη και οριζόντια. Στους ίδιους πίνακες απεικονίζεται η αντίστοιχη RMS τιμή της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου και ο χρόνος που απαιτήθηκε για το σβήσιμο του drone. Η ταξινόμηση των συχνοτήτων γίνεται ξεκινώντας από την καλύτερη. Όπως και στην περίπτωση των Πινάκων 19 και 20, οι χρωματισμένες στήλες αντιστοιχούν σε φυσικές θέσεις που σχετίζονται με τη συμπληρωματική πόλωση και διευκολύνουν τον εντοπισμό των συχνοτήτων, οι οποίες δεν παρουσιάζουν επιλεκτικότητα ως προς την πόλωση. Στο Παράρτημα III.c απεικονίζεται το σύνολο των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 25 για την κατακόρυφη πόλωση υποδεικνύουν ότι η συχνότητα 1,34 GHz χαρακτηρίζεται από μειωμένη επιλεκτικότητα: α) ως προς την πόλωση (διαταραχές στη φυσική θέση Head), β) ως προς την κλίση της κατεύθυνσης

στόχευσης (διαταραχές στη φυσική θέση Head). Επίσης, η συχνότητα 1,47 GHz φαίνεται να είναι μία συχνότητα με μειωμένα επίπεδα ατρωσίας ανεξάρτητα από τη γωνία πρόσπτωσης αλλά αυτό ισχύει κυρίως για την κατακόρυφη πόλωση (αδυναμία πρόκλησης διαταραχών σε θέσεις Bottom). Τέλος, η συχνότητα 1,42 GHz αποτελεί μία ενδιαφέρουσα συχνότητα αλλά αποκλειστικά για την κατακόρυφη πόλωση και γωνίες στόχευσης μικρής κλίσης, δηλ. σχετικά κοντά στον ορίζοντα.

Drone: Quantum Nova		P: -3 dBm		Pulse Width: 50 μsec				
Πόλωση: Κατακόρυφη (VERT_POL)		d: 1 m, 2 m		PRF: 1 KHz		Duty Cycle: 5 %		
Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζεται σε RMS τιμές								
f	Head1 (d = 2 m)		Head2 (d = 1 m)		Bottom1 (d = 1 m)		Bottom2 (d = 1 m)	
(GHz)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)
1,34	1	126	3	484	∞	219	∞	232
1,47	3	96	3	434	3	192	∞	230
1,19	3	107	∞	300	∞	160	2	179
1,42	2	118	2	379	∞	169	∞	212
1,46	3	99	∞	397	3	155	∞	213

Πίνακας 25: Συχνότητες ενδιαφέροντος για το drone Quantum Nova σε κατακόρυφη πόλωση

Στην περίπτωση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 26 για την οριζόντια πόλωση καταδεικνύεται μία αύξηση της ατρωσίας του Quantum Nova, διότι υπάρχει συμπληρωματικότητα ως προς τη κλίση της γωνίας στόχευσης. Οι συχνότητες 1,08 GHz – 1,1 GHz και 1,45 GHz επιδεικνύουν μειωμένη ατρωσία αλλά για μικρές και μεγάλες κλίσεις στόχευσης (παρεμβολές για τις φυσικές θέσεις Side και Bottom).

Drone: Quanum Nova		P: -3 dBm		Pulse Width: 50 μsec				
Πόλωση: Οριζόντια		d: 1 m, 2 m		PRF: 1 KHz				
(HOR_POL)				Duty Cycle: 5 %				
Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου απεικονίζεται σε RMS τιμές								
f (GHz)	Side1 (d = 1 m)		Side2 (d = 2 m)		Bottom1 (d = 1 m)		Bottom2 (d = 1 m)	
	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)	t (sec)	E(V/m)
1,08	2	171	∞	127	∞	171	2	189
1,1	2	221	∞	126	∞	171	2	176
1,09	2	229	∞	129	∞	212	2	182
1,45	∞	176	2	160	5	162	∞	165
1,18	∞	243	∞	137	3	210	2	192














Πίνακας 26: Συχνότητες ενδιαφέροντος για το drone Quanum Nova σε οριζόντια πόλωση

4.4 Ανάλυση των δεδομένων πτήσης

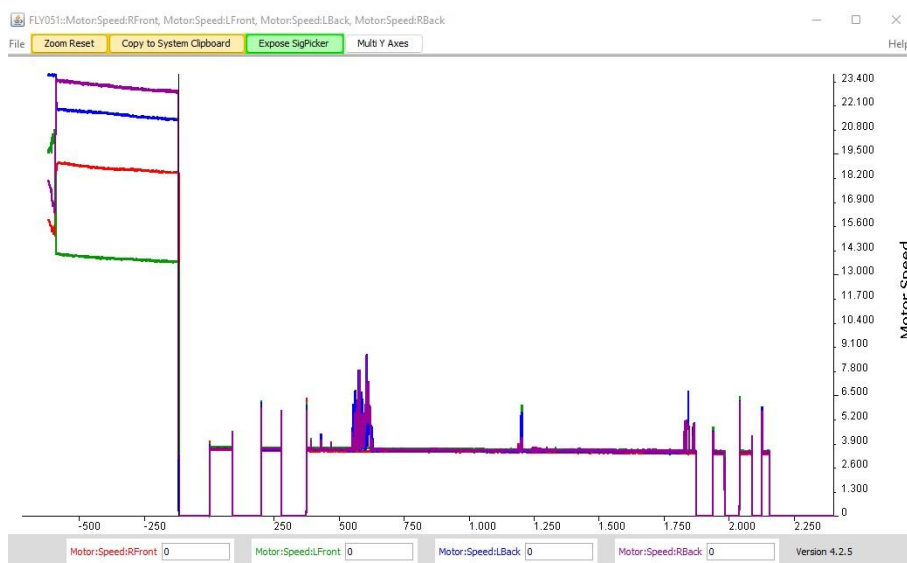
Εκτός από την παρακολούθηση του MEEO σε πραγματικό χρόνο μέσω της κάμερας και την άμεση καταγραφή των αντίστοιχων μεγεθών (συχνότητα, ένταση ηλεκτρικού πεδίου, χρόνος σβησίματος), μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις κατά την ανάλυση της συμπεριφοράς του MEEO στην έκθεσή του σε σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ήταν η πρόσβαση και η ανάλυση των αρχείων δεδομένων πτήσης (Log Files) των drones DJI Phantom 3 Standard και DJI Mavic Air, καθώς το drone Quanum Nova δε διαθέτει λειτουργία καταγραφής δεδομένων πτήσης σε αρχείο. Επειδή δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο για την καταγραφή των δεδομένων αυτών [53], τα drones της εταιρείας DJI παράγουν δύο τύπους δυαδικών αρχείων στην μόνιμη μνήμη τους: τα αρχεία τύπου .dat που έχουν την μορφή FLYXXX.dat και τα αρχεία τύπου .txt, που είναι επίσης δυαδικά και δεν πρέπει να συγχέονται με τα τυπικά αρχεία κειμένου με την ίδια κατάληξη .txt. Τα αρχεία δεδομένων πτήσης καταγράφονται σε πραγματικό χρόνο, κατά τη λειτουργία του drone, τόσο στην εσωτερική μνήμη του MEEO, όσο και -συγκεκριμένα για το μοντέλο DJI Mavic Air- στη συσκευή κινητού τηλεφώνου που ελέγχει το MEEO μέσω της εφαρμογής DJI GO4 για Android. Τα αρχεία αυτά μπορούν στη συνέχεια να

αποθηκευτούν μέσω USB σύνδεσης στον Η/Υ από το drone ή από τη συσκευή του κινητού τηλεφώνου.

Η αποκρυπτογράφηση και ανάγνωση των αρχείων δεδομένων πτήσης έγινε είτε μέσω της εφαρμογής CsvView που εγκαταστάθηκε τοπικά στον Η/Υ, είτε μέσω της on-line εφαρμογής airdata.com. Κάθε εφαρμογή αναλύει τα δεδομένα με διαφορετικό τρόπο και εμφανίζει πληροφορίες είτε με γραφικά, είτε σε μορφή κειμένου ή αρχείου τύπου .csv, σχετικά με την κατάσταση και τις στροφές των κινητήρων, το GPS, τη στάθμη της μπαταρίας, τον τρόπο και το χρόνο πτήσης, κλπ. Ωστόσο, σε περιπτώσεις ακαριαίας παύσης της λειτουργίας του MEEO, υπάρχει το ενδεχόμενο να μην έχει γίνει η καταγραφή του αιτίου στο αρχείο πτήσης.

Flight time	Altitude	Home Dist	Type	Notification
00m 02s	0.0 m	0 m	Mode	Mode changed to Manual
00m 02s	0.0 m	0 m	Tip	Log filename: FLY539.DAT
00m 09s	0.0 m	0 m	Mode	Mode changed to Atti
00m 34s	-0.8 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 12 times)
00m 35s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error , Compass Error (repeated 2 times)
00m 35s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 48 times)
00m 40s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 48 times)
00m 45s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 48 times)
00m 50s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 49 times)
00m 55s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 14 times)
01m 00s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 48 times)
01m 05s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 11 times)
01m 06s	0.0 m	0 m		96% Battery at maximum distance
01m 07s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 48 times)
01m 12s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 48 times)
01m 17s	0.0 m	0 m	Low Risk	 Compass Error (repeated 48 times)

Εικόνα 78: Log File του drone DJI Phantom 3 Standard, από την on-line εφαρμογή airdata.com



Εικόνα 79: Log File σχετικά με τους κινητήρες του drone DJI Mavic Air, από την εφαρμογή CsvView

Για την ανάλυση των δεδομένων πτήσης των πειραμάτων μας χρησιμοποιήθηκε κυρίως η εγκατεστημένη στον υπολογιστή εφαρμογή CsvView, η οποία έχει τη δυνατότητα μετατροπής του αρχείου καταγραφής των δεδομένων πτήσης τύπου .dat σε αρχείο τύπου .csv. Στη συνέχεια, τα δεδομένα του αρχείου αυτού μεταφέρονταν σε ένα αρχείο τύπου Excel .xlsx, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό την εξαιρετικά λεπτομερή ανάλυση της συμπεριφοράς του drone, μέσω εκατοντάδων παραμέτρων πτήσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε ένα τυπικό αρχείο δεδομένων πτήσης τύπου .xlsx περιλαμβάνονται 293 στήλες, που αντιστοιχούν σε ισάριθμες παραμέτρους πτήσης και 46300 γραμμές, που αντιστοιχούν σε ισάριθμες χρονικές στιγμές ελέγχου της κατάστασης του MEEO, για μια πτήση διάρκειας μερικών λεπτών.

Η ανάλυση των αρχείων δεδομένων πτήσης περιέλαβε κυρίως το drone DJI Phantom 3 Standard, καθώς σε αυτό αποθηκεύτηκε μεγάλος αριθμός αρχείων δεδομένων πτήσης και επικεντρώθηκε στον εντοπισμό των καταχωρήσεων εκείνων που αντιστοιχούσαν σε διαταραχές που ήδη είχαν παρατηρηθεί σε πραγματικό χρόνο κατά τη διενέργεια των πειραμάτων, όπως η πλήρης απενεργοποίηση των κινητήρων ή μεταβολές στην ταχύτητα και στον ήχο τους και μεταβολές της φωτεινότητας ή σβήσιμο των ενδεικτικών λυχνιών πτήσης (LEDs).

Τα κρίσιμα σφάλματα καταγράφηκαν στη στήλη 126 του αρχείου .xlsx, με όνομα eventLog. Από την ανάλυση των σφαλμάτων αυτών προκύπτει ότι σε κάθε περίπτωση, της χρονικής στιγμής που αντιστοιχούσε στο καθολικό σβήσιμο των κινητήρων, αν και αυτή δεν καταγράφονταν στο αρχείο δεδομένων πτήσης, πιθανόν λόγω της ταυτόχρονης ακαριαίας απενεργοποίησης του drone, προηγούνταν διαδοχικές καταγραφές που υποδήλωναν απώλεια της επικοινωνίας του drone με την επίγεια μονάδα ελέγχου (τηλεχειριστήριο), με το αντίστοιχο σφάλμα να εκφράζεται με μεταβολή της φωτεινότητας σβήσιμο των ενδεικτικών λυχνιών πτήσης (LEDs). Ακολουθούσε μια τελική καταγραφή που υποδήλωνε απόφαση του λογισμικού ελέγχου του drone για αναγκαστική προσγείωση και πιθανόν, στη συνέχεια απενεργοποίηση των κινητήρων. Ενδεικτικά παρατίθενται οι καταχωρήσεις αυτές:

423 [LED] changed: rc completely lost

4982 [LED] changed: rc completely lost

5378 [Ctrl<8>] REQ_RC_LOST AUTO_LANDING ctrl_auto_landing

Τα μη κρίσιμα σφάλματα καταγράφηκαν στη στήλη 142 του αρχείου .xlsx, με όνομα osd_data:nonGPSCause και αντιστοιχούσαν σε διαταραχή στην πυξίδα (COMPASS_ERROR_LARGE). Αν και οι χρονικές στιγμές εμφάνισης των σφαλμάτων αυτών δε συνέπιπταν με απενεργοποίηση των κινητήρων ή άλλες δευτερεύουσες διαταραχές, η συσσώρευσή τους κατά δεκάδες ή και εκατοντάδες είναι πιθανόν να οδηγεί το λογισμικό ελέγχου του drone, σε συνδυασμό με δεδομένα από άλλους αισθητήρες, στη λήψη απόφασης για αναγκαστική προσγείωση. Σε αυτό το σημείο αξίζει να επισημανθεί ότι η δυνατότητα δημιουργίας μη κρίσιμων διαταραχών στην πυξίδα, η οποία επιβεβαιώνεται από τα πειράματα, συμπίπτει με τις ανάλογες παρατηρήσεις της ερευνητικής εργασίας [3].

4.5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στα επόμενα ακολουθεί ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, για κάθε drone χωριστά.

4.5.1 DJI Phantom 3 Standard

Το drone DJI Phantom 3 Standard, εμφάνισε αυξημένη τρωτότητα σε πολλές θέσεις, στην περιοχή συχνοτήτων της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής από 1,13 GHz έως 1,29 GHz, σε απόσταση 3,2 m από την κεραία και με πολύ χαμηλή ισχύ (-23 dBm), άρα και πολύ χαμηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου, διάρκεια παλμού 50 μ sec και PRF 1 KHz (Duty Cycle 5 %).

Ενδεικτικά, στην την περίπτωση της κατακόρυφης πόλωσης, για την πιο ενδιαφέρουσα συχνότητα 1,19 GHz, στη θέση Head1 το drone έσβησε σε χρόνο 6 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 11,3 V/m, στη θέση Head2 έσβησε σε χρόνο 6 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 9,2 V/m, στη θέση Bottom1 έσβησε σε χρόνο 4 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 8,6 V/m, ενώ τέλος στη θέση Bottom2 έσβησε σε χρόνο 7 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 9,78 V/m.

Αντίστοιχα, στην την περίπτωση της οριζόντιας πόλωσης, για την πιο ενδιαφέρουσα συχνότητα 1,22 GHz, στη θέση Side1 έσβησε σε χρόνο 4 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 4,3 V/m, στη θέση Side2 δεν έσβησε με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 9,6 V/m, στη θέση Bottom1 έσβησε σε χρόνο 5 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 8,2 V/m, ενώ τέλος στη θέση Bottom2 δεν έσβησε, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 7,76 V/m.

Σημαντικό εύρημα των πειραμάτων αποτελεί η παρατήρηση ότι σε όλες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες προκλήθηκε σβήσιμο των κινητήρων του drone, πριν αυτό συμβεί, μεσολαβούσε ένα σταθερό χρονικό διάστημα διάρκειας 8 sec, κατά το οποίο αναβόσβηναν με χαρακτηριστικό τρόπο οι ενδεικτικές λυχνίες πτήσης (LEDs).

Η καταγραφή του σφάλματος “*rc completely lost*” ομοιάζει με την περίπτωση του jamming και δικαιολογεί τις ιδιαίτερα χαμηλές εντάσεις πεδίου, οι οποίες προκαλούν απενεργοποίηση των κινητήρων. Όπως ήδη έχει σχολιασθεί συνοπτικά, στην περίπτωση

μας, οι συχνότητες των παρεμβολών βρίσκονται εκτός ζώνης συχνοτήτων του πομποδέκτη του DJI Phantom 3 Standard (2,4 GHz και 5 GHz). Επίσης, η δυνατότητα πρόκλησης παρεμβολών δεν περιορίστηκε σε φυσικές θέσεις όπως η Side και η Bottom, οι οποίες επιδεικνύουν ασυμβατότητα πόλωσης μεταξύ της κεραίας και του προσπίπτοντος πεδίου (Εικόνες 51 και 80). Συνεπώς, υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι δεν λαμβάνει χώρα ένα φαινόμενο παρεμβολών μέσω της κεραίας. Η καλωδίωση μεταξύ των κεραίων και του πομποδέκτη είναι ένα επιπλέον σημείο όπου ενδέχεται να υπάρχει σύζευξη μεταξύ του προσπίπτοντος πεδίου και του MEEO. Η συγκεκριμένη καλωδίωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 80. Η διαδρομή και η τοποθέτηση της καλωδίωσης ευνοεί τη σύζευξη σε ορισμένες φυσικές θέσεις, όπως η Side, αλλά αυτό δεν συμβαίνει στις φυσικές θέσεις Head. Δεδομένου ότι οι παρεμβολές μπορούν να προκληθούν τόσο στις θέσεις Head όσο και στις Side μάλλον θα πρέπει να αποκλεισθεί το ενδεχόμενο σύζευξης με αυτόν τον τρόπο. Η πρόκληση της διαταραχής μέσω της πλακέτας ή υποσυστημάτων, όπως ο ίδιος ο πομποδέκτης και η κεντρική μονάδα ελέγχου, τα οποία απεικονίζονται στην Εικόνα 81 είναι εκδοχές που συγκεντρώνουν εκ των πραγμάτων μεγαλύτερες πιθανότητες. Αξίζει να επισημανθεί ότι αυτή η εκδοχή συμφωνεί με τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας [11]. Επίσης, η πρόκληση παρεμβολών στην τροφοδοσία είτε μέσω της μπαταρίας είτε μέσω της καλωδίωσης από την μπαταρία έως την κεντρική πλακέτα αποτελεί μία επιπλέον εύλογη υπόθεση εργασίας.

Η ευαισθησία του DJI Phantom στις θέσεις Head1, Head2, Bottom1, Bottom2 και Side1 δεν είναι εύκολο να ερμηνευθούν αλλά μπορεί να διαπιστωθεί ότι προκαλείται ένα έμμεσο jamming που διαταράσσει μέσω άτυπης σύζευξης (back-door) τη λειτουργία του πομποδέκτη. Ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση της φυσικής θέσης Side2, στην οποία δεν παρατηρήθηκε καμία διαταραχή στη λειτουργία του drone για ισχύ -23 dBm, σε καμία συχνότητα, και ως εκ τούτου ήταν απαραίτητη η αύξηση της ισχύος στα -10 dBm, για να επιτευχθεί σβήσιμο του drone. Η θέση Side2 μάλλον δεν προσφέρεται για αλληλεπίδραση με την μπαταρία διότι το πεδίο προσπίπτει στη μικρή επιφάνεια της μπαταρίας. Αυτό όμως συμβαίνει και στην περίπτωση της θέσης Head2 όπου προκαλούνται παρεμβολές.

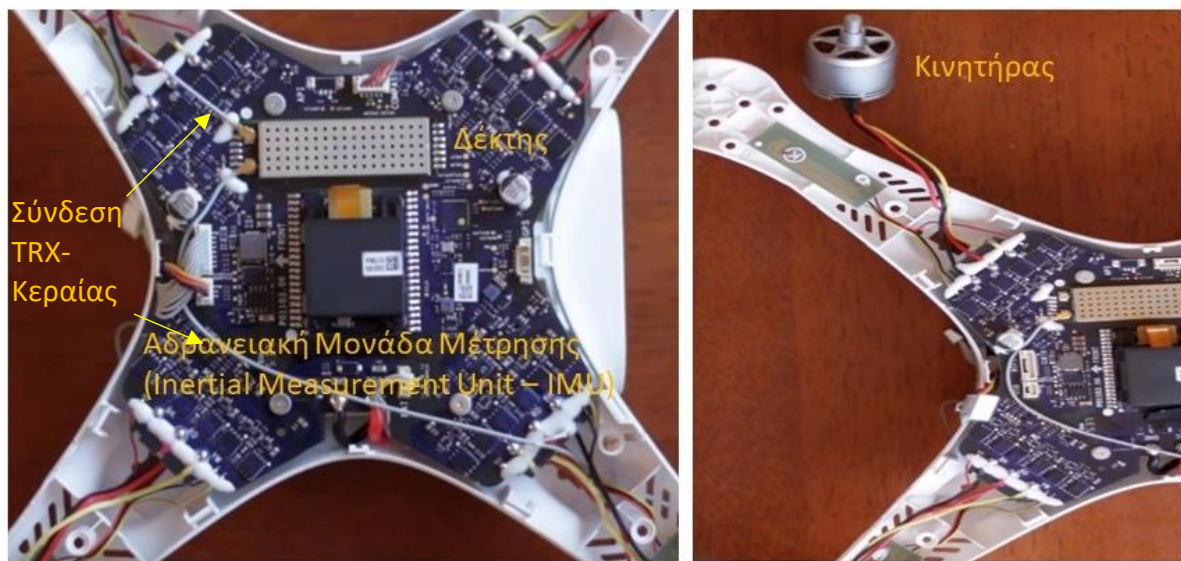
Η διαφορά της θέσης Side2 με τη θέση Head2 αφορά την πόλωση του πεδίου: το ηλεκτρικό πεδίο στη θέση Side2 (Head2) είναι παράλληλο (κάθετο) με τη μεγάλη διάσταση της μπαταρίας, ενώ το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο (παράλληλο) στη μπαταρία. Η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση του Side2 δεν ευνοεί την επαγωγή ρευμάτων εντός της μπαταρίας και αυτό ενδέχεται να αποτελεί μία ερμηνεία. Επίσης, το μαγνητικό πεδίο στην περίπτωση της θέσης Side2 (Head2) είναι κάθετο (παράλληλο) στον πομποδέκτη και ως εκ τούτου επίσης δεν ευνοείται η επαγωγή ρευματικών κατανομών. Συνοψίζοντας, μία υπόθεση, η οποία προς το παρόν δεν μπορεί να αποδειχθεί και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, είναι η εξής: η διαταραχή στην επικοινωνία του πομποδέκτη με το τηλεχειριστήριο μπορεί να οφείλεται είτε σε διαταραχή της τροφοδοσίας που παρέχει η μπαταρία είτε σε διαταραχή του ίδιου πομποδέκτη σε κάποιο σημείο της RF αλυσίδας. Σε κάθε περίπτωση, με ασφάλεια μπορεί να αποκλεισθεί το ενδεχόμενο της front-door παρεμβολής.



Εικόνα 80: Κεραίες και πυξίδα του drone DJI Phantom 3 Standard [54]

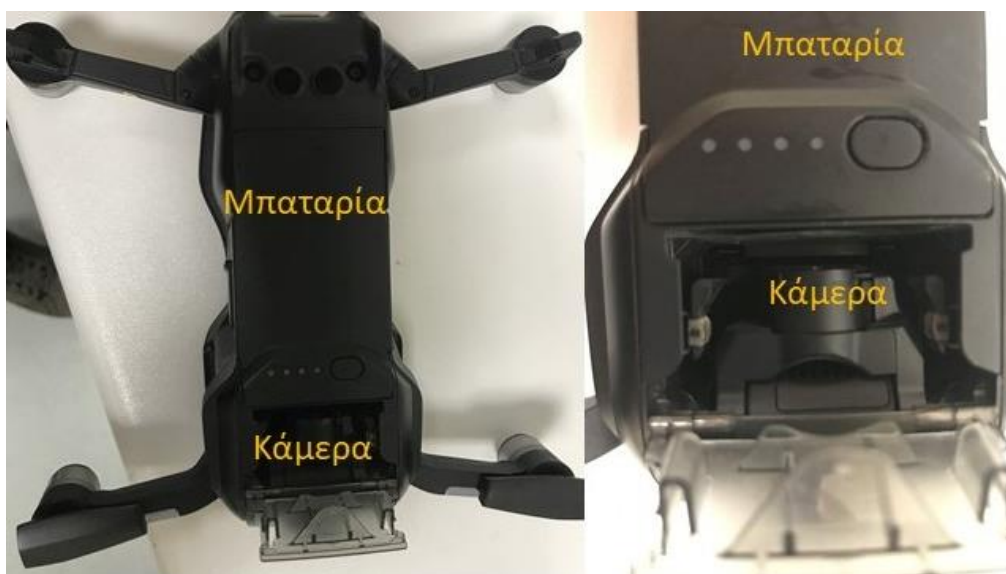
Η καλωδίωση μεταξύ των κινητήρων και της κεντρικής πλακέτας χαρακτηρίζεται από μία διαγώνια διαδρομή και ως εκ τούτου αποτελεί μία εσωτερική τοπολογία χωρίς επιλεκτικότητα ως προς την πόλωση. Υπό αυτήν την έννοια δεν προσφέρεται να ερμηνεύσει τους λόγους για τους οποίους η θέση Side2 παρουσιάζει υψηλά επίπεδα ατρωσίας.

Τέλος, σε ό,τι αφορά τις μη κρίσιμες διαταραχές της πυξίδας, αυτές μπορούν να αποδοθούν: α) είτε στην κατευθείαν σύζευξη με το αισθητήριο όταν το μαγνητικό πεδίο του προσπίπτοντος πεδίου είναι κάθετο στο πλακίδιο που σημειώνεται στην Εικόνα 80, π.χ. θέση Head1 και Bottom1, β) είτε στη σύζευξη του ηλεκτρικού πεδίου με την καλωδίωση (Εικόνα 80) που μεταφέρει τις μετρήσεις τις πυξίδας στο IMU, π.χ. θέση Head1, Head2.



Εικόνα 81: Δέκτης, IMU και κινητήρας του drone DJI Phantom 3 Standard [55]

Η ευαισθησία του DJI Mavic Air στη θέση Head1 μπορεί να ερμηνευθεί με βάση το γεγονός ότι οι επαφές σύνδεσης της μπαταρίας με το σύστημα τροφοδοσίας είναι εκτεθειμένες μέσω του ανοίγματος στο μπροστινό μέρος του drone, για την μετακίνηση της κάμερας (gimbal). Η εμφάνιση αυξημένης τρωτότητας στη θέση αυτή, είναι πιθανόν να οφείλεται είτε σε διαταραχή της τροφοδοσίας που παρέχει η μπαταρία, είτε σε διαταραχή του ίδιου πομποδέκτη σε κάποιο σημείο της RF αλυσίδας, ωστόσο σε κάθε περίπτωση, με ασφάλεια μπορεί να αποκλεισθεί το ενδεχόμενο της front-door παρεμβολής.



Εικόνα 82: Μπαταρία και μπροστινό μέρος του drone DJI Mavic Air

Στη συνέχεια, για το drone DJI Phantom 3 Standard, επιχειρήθηκε η επέκταση των πειραμάτων σε ένα δεύτερο στάδιο, κατά το οποίο, για τις κρίσιμες συχνότητες ενδιαφέροντος που εντοπίστηκαν κατά το πρώτο στάδιο, τροποποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά των παλμών παρεμβολής, όπως πλάτος, διάρκεια και συχνότητα επανάληψης παλμών (pulse repetition frequency - PRF) και επανεξετάστηκε η συμπεριφορά του drone. Σημειώνεται όμως, ότι κατά τη διάρκεια πειραμάτων ανεξάρτητων από τη συγκεκριμένη εργασία, σε φάσμα συχνοτήτων από 1,5 GHz έως 2,5 GHz, το drone υπέστη ανεπανόρθωτη βλάβη στον δέκτη, με αποτέλεσμα να διαταραχθεί η αμφίδρομη επικοινωνία με το τηλεχειριστήριο. Επομένως, για τα πειράματα του

δευτέρου σταδίου που πραγματοποιήθηκαν σε απόσταση 1 m από την κεραία, με ισχύ -1 dBm, διάρκεια παλμού 1 μ sec και PRF 50 KHz (Duty Cycle 5 %), δεν είναι βέβαιο ότι η συμπεριφορά του drone θα ήταν ίδια με εκείνη σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας. Το βασικό στοιχείο διαταραχής που παρατηρήθηκε στα πειράματα του δευτέρου σταδίου σε συγκεκριμένες συχνότητες, με αντίστοιχο πλάτος και συχνότητα επανάληψης παλμών (pulse repetition frequency - PRF), ήταν το σβήσιμο όλων των ενδεικτικών λυχνιών πτήσης (LEDs) του drone, οι οποίες άναβαν ακαριαία, μόλις διακόπτονταν η ακτινοβολία. Η λειτουργία των κινητήρων δεν διαταράχθηκε σε καμία περίπτωση.

Συγκεκριμένα, στη θέση Bottom1, με ισχύ -21 dBm, για συχνότητα 1,2 GHz, παρατηρήθηκε η διαταραχή σβησίματος των ενδεικτικών λυχνιών. Στη συνέχεια, στην ίδια θέση Bottom1, με ισχύ -1 dBm, κατά τη διαδικασία αυτοματοποιημένης παραγωγής κυματομορφών (frequency sweep) από τη γεννήτρια RF κυματομορφών Rohde & Schwarz SMB 100A εντός του εύρους συχνοτήτων 1,0-1,5 GHz, με προκαθορισμένο χρονικό βήμα 10 sec, παρατηρήθηκε η διαταραχή σβησίματος των ενδεικτικών λυχνιών, για όλες τις συχνότητες μεταξύ 1,05 GHz και 1,26 GHz.

Στη θέση Bottom2, με ισχύ -1 dBm, κατά τη διαδικασία αυτοματοποιημένης παραγωγής κυματομορφών (frequency sweep) από τη γεννήτρια RF κυματομορφών Rohde & Schwarz SMB 100A εντός του εύρους συχνοτήτων 1,0-1,5 GHz, με προκαθορισμένο χρονικό βήμα 10 sec, παρατηρήθηκε η διαταραχή σβησίματος των ενδεικτικών λυχνιών με ισχύ -1 dBm, για όλες τις συχνότητες μεταξύ 1,10 GHz και 1,17 GHz. Στην ίδια θέση Bottom2, με ισχύ -1 dBm, κατά τη διαδικασία αυτοματοποιημένης παραγωγής κυματομορφών (frequency sweep) από τη γεννήτρια RF κυματομορφών Rohde & Schwarz SMB 100A εντός του εύρους συχνοτήτων 1,0-1,5 GHz, με προκαθορισμένο χρονικό βήμα 10 sec, παρατηρήθηκε η διαταραχή σβησίματος των ενδεικτικών λυχνιών, για όλες τις συχνότητες μεταξύ 1,26 GHz και 1,35 GHz.

4.5.2 DJI Mavic Air

Το MEEO DJI Mavic Air, εμφανίσθηκε γενικά πιο ανθεκτικό στη σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο πιο μικρό μέγεθος και στην πιο συμπαγή κατασκευή του. Αξίζει να επισημανθεί ότι η τοποθέτηση των υποσυστημάτων του ακολουθεί μία λογική διαδοχικών στρώσεων. Μάλιστα, ο πομποδέκτης τοποθετείται ανάμεσα σε στρώματα και ως εκ τούτου είναι εγγενώς προστατευμένος.

Το DJI Mavic Air εμφάνισε τρωτότητα στις περιοχές συχνοτήτων από 1,0 GHz έως 1,1 GHz και από 1,49 GHz έως 1,50 GHz, ενώ στις συχνότητες 1,09 GHz και 1,19 GHz αντίστοιχα, οι δύο μπαταρίες του υπέστησαν ανεπανόρθωτες βλάβες, λόγω της άμεσης ακτινοβολήσής τους στη θέση Bottom1. Οι βλάβες αυτές είναι πολύ πιθανόν να οφείλονται στο γεγονός ότι η συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου, στη θέση Head1 προσπίπτει άμεσα στη μεγάλη πλευρά της μπαταρίας του drone, με την πόλωσή της παράλληλη προς τη μεγάλη διάσταση της μπαταρίας.

Ενδεικτικά, στην περίπτωση της πρώτης κατακόρυφης πόλωσης, σε απόσταση 1 και 2 m από την κεραία, με ισχύ -1 dBm, διάρκεια παλμού 50 μsec και PRF 1 KHz (Duty Cycle 5 %), για την πιο ενδιαφέρουσα συχνότητα 1,0 GHz, στη θέση Head1, το drone έσβησε σε χρόνο 1 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 212 V/m, ενώ στη θέση Bottom1a δεν έσβησε, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 113 V/m.

Στην περίπτωση της δεύτερης κατακόρυφης πόλωσης, σε απόσταση 1 m από την κεραία, με ισχύ -1 dBm ή -3 dBm, διάρκεια παλμού 50 μsec και PRF 1 KHz (Duty Cycle 5 %), για την πιο ενδιαφέρουσα συχνότητα 1,08 GHz, στη θέση Head1 το drone έσβησε σε χρόνο 1 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 220 V/m, ενώ στη θέση Bottom1b έσβησε σε χρόνο 1 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 171 V/m.

Στην περίπτωση της πρώτης οριζόντιας πόλωσης, σε απόσταση 2 m από την κεραία, με ισχύ -1 dBm, διάρκεια παλμού 50 μsec και PRF 1 KHz (Duty Cycle 5 %), για την μόνη ενδιαφέρουσα συχνότητα 1,49 GHz, στη θέση Bottom1a, το drone έσβησε σε χρόνο 2 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 274 V/m.

Τέλος, στην περίπτωση της δεύτερης οριζόντιας πόλωσης, σε απόσταση 1 m από την κεραία, με ισχύ -3 dBm, διάρκεια παλμού 50 μ sec και PRF 1 KHz (Duty Cycle 5 %), για την πιο ενδιαφέρουσα συχνότητα 1,08 GHz, στη θέση Bottom1b, το drone έσβησε σε χρόνο 1 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 171 V/m.

Συνοψίζοντας, στην περίπτωση του Mavic και της κατακόρυφης πόλωσης υπάρχει μία απαίτηση της τάξης των 200-V/m RMS προκειμένου να προκληθούν διαταραχές. Στην περίπτωση του Head1 (χαμηλή κλίση στόχευσης) υπάρχει μία ενιαία ζώνη συχνοτήτων 1,0 GHz – 1,1 GHz στην οποία μπορούν να προκληθούν διαταραχές με πεδία της τάξης των 200 V/m. Στην περίπτωση της θέσης Bottom1 (υψηλή κλίση στόχευσης) οι απαιτήσεις για την ένταση του πεδίου είναι μεγαλύτερες και ως εκ τούτου τα φαινόμενα των διαταραχών περιορίζονται σε μεμονωμένες συχνότητες. Το ίδιο συμβαίνει και σε υψηλότερες συχνότητες (1,5 GHz) αλλά η απαίτηση για την ένταση του πεδίου είναι ελαφρώς αυξημένη (274 V/m RMS).

Πλην της αυξημένης ατρωσίας που επιδεικνύει το DJI Mavic Air, αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις όπου προκαλούνται παρεμβολές, η απενεργοποίηση των κινητήρων είναι σχεδόν ακαριαία, τουλάχιστον συγκρινόμενη με την περίπτωση του DJI Phantom3 Standard. Το γεγονός αυτό παραπέμπει σε ένα διαφορετικό μηχανισμό πρόκλησης κρίσιμων διαταραχών, ο οποίος πρέπει να σχετίζεται με πιο δομικές λειτουργίες του MEEO. Μία τέτοια υπόθεση δικαιολογεί τις σχετικά υψηλές τιμές της έντασης του πεδίου, οι οποίες απαιτούνται για την πρόκληση παρεμβολών.

Το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων προκλήθηκαν δύο φορές ανεπανόρθωτες βλάβες στην μπαταρία, αποτελεί μία σοβαρή ένδειξη ότι η πρόκληση των κρίσιμων διαταραχών στη λειτουργία του DJI Mavic Air μπορεί να οφείλεται στη διαταραχή της λειτουργίας της μπαταρίας και ως εκ τούτου της τροφοδοσίας του.

4.5.3 Quanam Nova

Το MEEO Quanam Nova, αν και γενικά έχει σχήμα και διαστάσεις παραπλήσιες με αυτές του drone DJI Phantom 3 Standard, εμφανίσθηκε πιο ανθεκτικό στη σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Εμφάνισε τρωτότητα στις περιοχές συχνοτήτων από 1,08 GHz έως 1,19 GHz και από 1,34 GHz έως 1,47 GHz, ωστόσο, για επιτευχθεί σβήσιμο, χρειάστηκε να μειωθεί τόσο η απόσταση του από την κεραία στο 1 ή 2 m, όσο και η ισχύς στα -3 dBm, με διάρκεια παλμού 50 μsec και PRF 1 KHz (Duty Cycle 5 %).

Ενδεικτικά, στην την περίπτωση της κατακόρυφης πόλωσης, για την πιο ενδιαφέρουσα συχνότητα 1,34 GHz, στη θέση Head1 το drone έσβησε σε χρόνο 1 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 126 V/m, στη θέση Head2 έσβησε σε χρόνο 3 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 484 V/m, στη θέση Bottom1 δεν έσβησε με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 219 V/m, ενώ τέλος στη θέση Bottom2 δεν έσβησε με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 232 V/m.

Αντίστοιχα, στην την περίπτωση της οριζόντιας πόλωσης, για την πιο ενδιαφέρουσα συχνότητα 1,08 GHz, στη θέση Side1 έσβησε σε χρόνο 2 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 171 V/m, στη θέση Side2 δεν έσβησε με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 127 V/m, στη θέση Bottom1 δεν έσβησε με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 171 V/m, ενώ τέλος στη θέση Bottom2 έσβησε σε χρόνο 2 sec, με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 189 V/m.

Συνοψίζοντας, το Quantum Nova επιδεικνύει μία συμπεριφορά πλησιέστερη προς αυτήν του DJI Mavic Air. Η απενεργοποίηση των κινητήρων είναι σχεδόν ακαριαία και σύμφωνα με το σκεπτικό που αναπτύχθηκε για την περίπτωση του DJI Mavic Air αυτό μάλλον πρέπει να συσχετισθεί με τη διαταραχή κάποιας δομικής λειτουργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε πειραματικά, εντός ανηχωϊκού θαλάμου, με τη χρήση κατάλληλου μικροκυματικού εξοπλισμού και αντίστοιχων μετρητικών οργάνων, η τρωτότητα τριών διαφορετικών μοντέλων εμπορικών μη επανδρωμένων τετρακόπτερων (quadcopter drones), του DJI Phantom 3 Standard, του DJI Mavic Air και του Quantum Nona σε σκόπιμες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, μέσω υψηλής ισχύος παλμικών μικροκυματικών κυματομορφών, με συχνότητες μεταξύ 1,0 GHz και 1,5 GHz. Έγινε προσπάθεια να εντοπισθούν συγκεκριμένες κρίσιμες συχνότητες «ενδιαφέροντος», αλλά και -κυρίως- περιοχές συχνοτήτων, για τις οποίες προκαλείται όσο το δυνατό μεγαλύτερη διαταραχή της λειτουργίας του drone, στο μικρότερο δυνατό χρόνο και με τη χαμηλότερη δυνατή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Σύμφωνα με τα ερευνητικά αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

Συμπέρασμα 1: *Το επίπεδο ατρωσίας ενός MEEO διαφοροποιείται ανάλογα με τη συχνότητα της ακτινοβολούμενης παλμικής παρεμβολής. Επί της αρχής μπορούν να προκληθούν διαταραχές σε οποιαδήποτε συχνότητα αλλά ανά συχνότητα διαφοροποιείται η ελάχιστη ένταση πεδίου, η οποία δύναται να προκαλέσει κρίσιμες διαταραχές. Η διαφοροποίηση σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη ένταση ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να αποδοθεί κυρίως δύο λόγους: α) στη διαφοροποίηση του συντελεστή σύζευξης μεταξύ του προσπίπτοντος ΗΜ πεδίου και του υποσυστήματος, το οποίο κάθε φορά πλήττεται και β) στη διαφοροποίηση της απόκρισης του υποσυστήματος-στόχου στο πεδίο των συχνοτήτων.*

Συμπέρασμα 2: *Ανάλογα με το MEEO η δυνατότητα πρόκλησης διαταραχών διαφοροποιείται στο πεδίο των συχνοτήτων. Το γεγονός αυτό αποτελεί φυσιολογική συνέχεια του Συμπεράσματος 1, διότι ανάλογα με τον τύπο του MEEO είναι αναμενόμενο*

να διαφοροποιείται κατασκευαστικά τόσο η σύζευξη μεταξύ του προσπίπτοντος πεδίου με τα ευαίσθητα υποσυστήματα αλλά και η απόκριση των τελευταίων.

Συμπέρασμα 3: Το επίπεδο ατρωσίας ενός MEEO επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τη γωνία πρόσπτωσης του προσπίπτοντος πεδίου. Ανάλογα με τη συχνότητα και τη γωνία πρόσπτωσης διαμορφώνονται διαφορετικά επίπεδα ατρωσίας. Για παράδειγμα, σε αρκετές περιπτώσεις με τα διαθέσιμα επίπεδα ισχύος δεν ήταν εφικτό να προκληθούν κρίσιμες διαταραχές σε όλο εύρος συχνοτήτων 1,0 GHz – 1,5 GHz.

Συμπέρασμα 4: Το επίπεδο ατρωσίας ενός MEEO εξαρτάται από την πόλωση του πεδίου. Ανάλογα με τη συχνότητα και τη γωνία πρόσπτωσης διαφοροποιείται η αποτελεσματικότητα της κατακόρυφης και της οριζόντιας πόλωσης. Βεβαίως, υπάρχουν συχνότητες, οι οποίες δεν παρουσιάζουν επιλεκτικότητα ως προς την πόλωση αλλά αυτές οι συχνότητες αποτελούν μεμονωμένες περιπτώσεις. Εν γένει, η περίπτωση της κατακόρυφης πόλωσης φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματική έναντι της οριζόντιας πόλωσης, διότι στο σύνολο των πειραμάτων η κατακόρυφη πόλωση προκαλεί κρίσιμες παρεμβολές σε ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων και σε αρκετές περιπτώσεις με χαμηλότερης έντασης ηλεκτρικά πεδία.

Συμπέρασμα 5: Το συμπέρασμα 3 και 4 έχει μία επίπτωση σε ό,τι αφορά τη γωνία στόχευσης ενός MEEO από ένα επίγειο σταθμό εκπομπής. Ανάλογα με τη συχνότητα εκπομπής και το τύπο του MEEO η πρόκληση των παρεμβολών διευκολύνεται ή δυσχεραίνεται η πρόκληση παρεμβολών ανάλογα με τη γωνία ανύψωσης (*elevation angle*) της κατεύθυνσης σκόπευσης από τον επίγειο σταθμό προς το MEEO.

Τα προαναφερόμενα συμπεράσματα αλλά και η εξαγωγή επιπλέον ειδικών συμπερασμάτων μπορούν να τεκμηριωθούν μέσω της επισκόπησης των πειραματικών αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα υπό μελέτη MEEO, η οποία ακολουθεί.

Το drone DJI Phantom 3 Standard εμφάνισε την πιο αυξημένη τρωτότητα σε πολλές θέσεις, σε αρκετά μεγάλη απόσταση (3,2 m) για τα δεδομένα του πειράματος, από την κεραία, και με πολύ χαμηλή ισχύ (-23 dBm), άρα και πολύ χαμηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και με διαφορετικά χαρακτηριστικά κυματομορφών, όπως πλάτος,

διάρκεια και συχνότητα επανάληψης παλμών (pulse repetition frequency - PRF). Σημαντικό ρόλο στην τρωτότητα του drone, εκτός από την κατασκευαστική πολυπλοκότητα και το μέγεθος του συγκεκριμένου μοντέλου, φάνηκε να διαδραματίζει η διαδρομή σύζευξης που δημιουργείται μεταξύ της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και του MEEO μέσω του εμπρόσθιου άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE).

Ειδικά, η παρατήρηση ότι σε όλες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες προκλήθηκε σβήσιμο των κινητήρων του drone, πριν αυτό συμβεί, μεσολαβούσε ένα σταθερό χρονικό διάστημα διάρκειας 8 sec, κατά το οποίο αναβόσβηναν με χαρακτηριστικό τρόπο οι ενδεικτικές λυχνίες πτήσης (LEDs), οδηγεί στην υπόθεση ότι το λογισμικό ελέγχου του drone, αντιλαμβανόμενο τη διαταραχή από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή συγκεκριμένης συχνότητας, που προκαλείται στο κανάλι επικοινωνίας του με τον επίγεια μονάδα ελέγχου (τηλεχειριστήριο), εκτελεί μια συγκεκριμένη διαδικασία, διάρκειας 8 sec, της οποίας τελικό βήμα αποτελεί η απενεργοποίηση των κινητήρων του. Ο τρόπος με τον οποίο αναβοσβήνουν οι ενδεικτικές λυχνίες πτήσης (LEDs), είναι πιθανόν να υποδηλώνει τον κωδικό σφάλματος για τη συγκεκριμένη διαταραχή. Σημειώνεται ότι αν και η συγκεκριμένη διαταραχή εμφανίζει τα χαρακτηριστικά τυπικής ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (jamming) στην απ' ευθείας επικοινωνία του drone με το τηλεχειριστήριο, είναι πολύ πιο κρίσιμη, καθώς προκαλείται με συχνότητες μεταξύ 1,0 GHz και 1,5 GHz, που απέχουν κατά πολύ από τη συχνότητα λειτουργίας του τηλεχειριστηρίου (2,4 GHz έως 2,483 GHz). Επομένως, η συγκεκριμένη κρίσιμη διαταραχή οφείλεται σε πιθανή διαδρομή σύζευξης που περιλαμβάνει το εμπρόσθιο άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE), του drone, έως το κύκλωμα του δέκτη. Αξίζει να σημειώσουμε εδώ, ότι τα συγκεκριμένα ευρήματα συμβαδίζουν με εκείνα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε από τους Y. Chen, D. Zhang, E. Cheng, και X. Wang [11] και αφορούσε σε δοκιμές της τρωτότητας ενός MEEO σε ακτινοβολία με συνεχείς μικροκυματικές κυματομορφές (CW).

Συμπέρασμα 6: *Ο φυσικός μηχανισμός πρόκλησης των διαταραχών μπορεί να περιλαμβάνει τη άτυπη σύζευξη (back-door coupling) με το υποσύστημα του πομποδέκτη με αποτέλεσμα την απώλεια επικοινωνίας του MEEO με το τηλεχειριστήριο και την απενεργοποίηση των κινητήρων του. Σε ανάλογες περιπτώσεις, όπως τουλάχιστον διαπιστώθηκε στην περίπτωση του DJI Phantom 3 Standard, η ελάχιστη ένταση του πεδίου για να προκληθούν κρίσιμες διαταραχές μπορεί να είναι εξαιρετικά χαμηλή τιμή, π.χ της τάξης των 10 V/m.*

Η συσσώρευση μη κρίσιμων σφάλματων, όπως αυτά αποτυπώνονται στα αρχεία των δεδομένων πτήσης (Log Files), σχετικά με τη λειτουργία της πυξίδας, σε συνδυασμό με ενδείξεις από άλλους αισθητήρες και με την ύπαρξη κρίσιμων σφαλμάτων σε άλλα υποσυστήματα του drone όπως ο δέκτης, είναι πιθανό σε πραγματικές συνθήκες πτήσης, να οδηγήσουν σε ενεργοποίηση της εκτέλεσης διαδικασιών έκτακτης ανάγκης από το λογισμικό ελέγχου του drone και σε λήψη απόφασης για άμεση απενεργοποίηση των κινητήρων του, με αποτέλεσμα την πτώση του. Σημειώνεται ότι σφάλματα στη λειτουργία της πυξίδας καταγράφηκαν και στα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε από τους G. Lubkowski, M. Lanzrath, L. C. Lavau, και M. Suhrke [3], σχετικά με την επίδραση της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής με Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό Υψηλής Ισχύος (High Power Electromagnetics - HPEM) στους αισθητήρες ενός MEEO.

Συμπέρασμα 7: *Πλην των κρίσιμων διαταραχών και ανάλογα με τον τύπο του MEEO μπορούν να προκληθούν μη κρίσιμες σε εργαστηριακό περιβάλλον διαταραχές στις μετρήσεις αισθητηρίων που χρησιμοποιούν τα MEEO, π.χ. στην πυξίδα του DJI Phantom 3 Standard. Η πρόκληση διαταραχών στην πυξίδα, η οποία βασίζεται στη μέτρηση του γεωμαγνητικού πεδίου, είναι μάλλον αναμενόμενη παρουσία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η εξέταση των διαταραχών που προκαλούνται στο εύρος συχνοτήτων 1,0 – 1,5 GHz με ισχύ οδήγησης του ενισχυτή -23 dBm στις διαφορετικές φυσικές τοποθετήσεις του DJI Phantom 3 Standard (Εικόνες 68-71, Πίνακες 19-20) οδηγεί στο ακόλουθο συμπέρασμα:*

Συμπέρασμα 8: *Η συχνότητα 1,19 GHz αναδεικνύεται ως η καλύτερη συχνότητα για την πρόκληση παρεμβολών με εκπομπή σε κατακόρυφη πόλωση, διότι επιδεικνύει υψηλή*

αποτελεσματικότητα ανεξάρτητα από τις γωνίες ανύψωσης και αζιμούθιου στην οποία βρίσκεται το DJI Phantom 3 Standard. Επίσης, η λειτουργία σε ένα εύρος 1,19 GHz – 1,26 GHz μπορεί να προκαλέσει διαταραχές με ίσως μειωμένη, αλλά επαρκή αποτελεσματικότητα.

Συμπέρασμα 9: Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα πειράματα του DJI Phantom 3 Standard έχουν πραγματοποιηθεί σε απόσταση 3.2 m με ισχύ οδήγησης του ενισχυτή -23 dBm μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η εμβέλεια ενός συστήματος με τα χαρακτηριστικά της πειραματικής τοπολογίας θα μπορούσε να επιτύχει μία εμβέλεια απενεργοποίησης του συγκεκριμένου MEEO της τάξης των 30 m.

Το drone DJI Mavic Air εμφανίστηκε γενικά πιο ανθεκτικό στη σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο πιο μικρό μέγεθος και στην πιο συμπαγή κατασκευή του. Για επιτευχθεί σβήσιμο, χρειάστηκε να μειωθεί τόσο η απόσταση του από την κεραία στο 1 ή 2 m, όσο και η αύξηση της ισχύος στα -3 dBm ή -1 dBm. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, οι δύο μπαταρίες του υπέστησαν ανεπανόρθωτες βλάβες, αποτέλεσμα άκρως επιθυμητό, αν και επιβαρυντικό για τη διαδικασία των πειραμάτων. Ειδικότερα, λαμβάνοντας υπόψη μας τα αποτελέσματα των Εικόνων 72-74 και των Πινάκων 21-24 μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

Συμπέρασμα 10: Τουλάχιστον για τα επίπεδα της διαθέσιμης ισχύος (1 kW ισχύς τροφοδοσίας της κεραίας) η πρόκληση κρίσιμων διαταραχών στο DJI Mavic Air επιβάλλει αποκλειστικά τη χρήση κατακόρυφης πόλωσης.

Συμπέρασμα 11: Οι συχνότητες εκπομπής 1,02, 1,08 GHz για την πρόκληση διαταραχών αποτελούν τις καλύτερες επιλογές, με τις συχνότητες πλησίον των 1,5 GHz να αποτελούν εναλλακτικό σενάριο με μειωμένη όμως αποτελεσματικότητα.

Συμπέρασμα 12: Η αυξημένη ατρωσία που επιδεικνύει το DJI Mavic Air δημιουργεί κάποιους περιορισμούς ως προς την αζιμουθιακή γωνία της θέσης του MEEO έναντι του συστήματος εκπομπής.

Συμπέρασμα 13: *Η πλέον πιθανή ερμηνεία για το αίτιο το οποίο οδηγεί το DJI Mavic Air σε απενεργοποίηση των κινητήρων είναι η διαταραχή της λειτουργίας της μπαταρίας του και ως εκ τούτου αρκετών βασικών λειτουργιών του. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στο γεγονός της πρόκληση μη αναστρέψιμης βλάβης στην μπαταρία κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.*

Τέλος, το drone Quantum Nova, αν και γενικά έχει σχήμα και διαστάσεις παραπλήσιες με αυτές του drone DJI Phantom 3 Standard, εμφανίσθηκε πιο ανθεκτικό στη σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και για επιτευχθεί σβήσιμο, χρειάστηκε να μειωθεί τόσο η απόσταση του από την κεραία στο 1 ή 2 m, όσο και να αυξηθεί η ισχύς στα -3 dBm. Ειδικότερα, λαμβάνοντας υπόψη μας τα αποτελέσματα των Εικόνων 75-77 και των Πινάκων 25-26 μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

Συμπέρασμα 14: *Η χρήση της κατακόρυφης πόλωσης σε συχνότητες εκπομπής 1,34 GHz και 1,47 GHz αποτελούν κατά σειρά προτεραιότητας τις πλέον αποτελεσματικές επιλογές για την πρόκληση διαταραχών στο Quantum Nova. Ειδικότερα, η επιλογή των 1,34 GHz παρουσιάζει τους λιγότερους περιορισμούς σε ό,τι αφορά τις γωνίες ανύψωσης και αζιμούθιου του MEEO.*

Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα 8, 11 και 14 και θέτοντας το ερώτημα της ύπαρξης συχνότητας εκπομπής, η οποία να μπορεί να προκαλέσει διαταραχές και στα τρία υπό μελέτη MEEO θα μπορούσε να προκύψει το ακόλουθο συμπέρασμα:

Συμπέρασμα 15: *Λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική διαφορά ανάμεσα στο επίπεδο ατρωσίας του DJI Phantom 3 Standard (10 V/m) συγκριτικά με το DJI Mavic Air και Quantum Nova (200 V/m -400 V/m) μπορούμε να υποθέσουμε ότι σε εντάσεις πεδίου > 200 V/m το DJI Phantom 3 Standard θα απενεργοποιείται σε όλες τις συχνότητες. Επομένως, η επιλογή της κατακόρυφης πόλωσης και συχνοτήτων λειτουργίας, είτε γύρω από τα 1,08 GHz, είτε πλησίον του 1,5 GHz, αποτελεί την καλύτερη δυνατή, για την απενεργοποίηση όλων των MEEO που μελετήθηκαν.*

Οι διαταραχές στη λειτουργία των drones λόγω της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, κυμαίνονταν από ανεπανόρθωτες βλάβες, όπως στην περίπτωση των

μπαταριών του DJI Mavic Air, έως μη κρίσιμες διακυμάνσεις στις στροφές των κινητήρων ή στη φωτεινότητα των ενδεικτικών λυχνιών πτήσης (LEDs), χωρίς σβήσιμο του drone και φαίνεται να είναι ανάλογες με την κατασκευαστική πολυπλοκότητα, το μέγεθος του drone και τον βαθμό έκθεσης στην ακτινοβολία συγκεκριμένης συχνότητας των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων του. Επιπλέον, οι διαταραχές αυτές είναι πιθανόν να ευνοούνται από τη δομή του κελύφους, συνήθως κατασκευασμένου από συνθετικά υλικά, για λόγους ευελιξίας και μείωσης του βάρους, και στην ύπαρξη ανοιγμάτων για εξαερισμό και έκθεση των αισθητήρων και των κεραιών.

Η πιο συνηθισμένη διαταραχή ήταν η πλήρης απενεργοποίηση των κινητήρων, η οποία σε πραγματικές συνθήκες πτήσης αντιστοιχεί σε άμεση κατάρριψη του drone. Στην περίπτωση αυτή, τόσο το drone, όσο και το τηλεχειριστήριο έπρεπε να επανέλθουν σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας (reset) για να συνεχιστούν τα πειράματα.

Συμπέρασμα 16: *Οι κρίσιμες διαταραχές σε ένα MEEO, όπως στην περίπτωση μας συμβαίνει με το DJI Mavic Air, μπορούν να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμες βλάβες όπως η καταστροφή της μπαταρίας. Η απενεργοποίηση των κινητήρων είναι μία κρίσιμη διαταραχή, διότι σε συνθήκες πτήσης θα οδηγήσει σε πτώση και καταστροφή του MEEO αλλά επί της αρχής είναι αναστρέψιμη, εφόσον το MEEO προβεί σε επανεκκίνηση και επανασύνδεση με το τηλεχειριστήριο.*

Ειδικά για την περίπτωση του drone DJI Phantom 3 Standard, στα πειράματα του δεύτερου σταδίου, τα οποία πραγματοποιήθηκαν σε απόσταση 1 m από την κεραία, με ισχύ -1 dBm, διάρκεια παλμού 1 μsec και PRF 50 KHz (Duty Cycle 5 %), η μοναδική διαταραχή που παρατηρήθηκε, ήταν το σβήσιμο όλων των ενδεικτικών λυχνιών πτήσης (LEDs) του drone, οι οποίες άναβαν ακαριαία, μόλις διακόπτονταν η ακτινοβολήση, χωρίς να επηρεάζεται καθόλου λειτουργία των κινητήρων. Τονίζεται ότι τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν μετά την βλάβη του δέκτη του drone, με αποτέλεσμα την μόνιμη απώλεια της επικοινωνίας του με το τηλεχειριστήριο. Αντιθέτως, στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με το ίδιο drone πριν από τη βλάβη, δηλαδή σε συνθήκες πλήρους λειτουργίας του δέκτη και αμφίδρομης επικοινωνίας του με το με το

τηλεχειριστήριο, οι κινητήρες το drone έσβησαν με σχετικά μεγάλη ευκολία σε απόσταση 3,2 m, από την κεραία, με ισχύ ακτινοβολίας -23 dBm, και επομένως με εξαιρετικά χαμηλότερες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Το γεγονός ότι μετά τη βλάβη του δέκτη και την απώλεια της αμφίδρομης επικοινωνίας με το τηλεχειριστήριο το drone εμφανίζει μόνο την μη κρίσιμη διαταραχή του σβησίματος των ενδεικτικών λυχνιών πτήσης (LEDs), χωρίς να επηρεάζεται καθόλου η λειτουργία των κινητήρων, ενισχύει την υπόθεση ότι η τρωτότητά του οφείλεται σε πιθανή διαδρομή της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης που περιλαμβάνει το εμπρόσθιο άκρο του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency front-end – RFFE), του drone μέσω κάποιου δομικού στοιχείου (καλωδίωση, κόλληση, τροφοδοσία κυκλώματος), τουλάχιστον για τις θέσεις Side1, Side2 και Bottom1, Bottom2, για τις οποίες η πόλωση της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετη προς τη διεύθυνση των δύο κεραιών.

Σχετικά με τη χρήση του αισθητήρα Montena SFE3-5G για τις δοκιμαστικές μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και ως μέτρου σύγκρισης για την επιλογή ως κύριου μετρητικού οργάνου του πεδιόμετρου Narda NBM 550, σημειώνεται ότι προέκυψε η αναγκαιότητα χρήσης υψηλότερης από την προτεινόμενη από τον κατασκευαστή ακριβούς τιμής της ενεργής επιφάνειας A_{eq} (0.0022-0.0023 αντί του 0.002). Η διόρθωση αυτή επιτρέπει τη χρήση του συστήματος Montena ως εναλλακτική επιλογή έναντι του πεδιόμετρου Narda NBM 550. Η αύξηση της ενεργής επιφάνειας του αισθητήρα μπορεί να αποδοθεί στη υψηλότερη συχνότητα στην οποία διεξάγονται οι μετρήσεις (1,0 GHz – 1,5 GHz).

Σε κάθε περίπτωση, όπως αποδεικνύεται εκ του αποτελέσματος, η επιλογή της χρήσης ως κύριου μετρητικού οργάνου του πεδιόμετρου Narda NBM 550, με την ιδιότητά του να μετρά RMS τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη πληρότητα στο σύνολο των συνθηκών των πειραμάτων μας.

Τέλος, καθώς κατά τη λειτουργία του ενισχυτή παλμών BONN Elektronik TWAP 0103-1000 παρατηρήθηκε έντονη αστάθεια και υψηλή διακύμανση στην έξοδό του, ειδικότερα στις συχνότητες 1,0 GHz και 1,2 GHz, θα έπρεπε ιδανικά κατά τη διάρκεια των

πειραμάτων να παρακολουθείται διαρκώς η έξοδος του ενισχυτή από έναν κατευθυντικό συζεύκτη (directional coupler) [56], ή εναλλακτικά, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου να καταγράφεται ταυτόχρονα και από τον αισθητήρα Montena SFE3-5G.

5.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά για επέκταση της μελέτης της τρωτότητας των μη επανδρωμένων εναερίων οχημάτων, με τη χρήση των κρίσιμων συχνοτήτων ενδιαφέροντος που εντοπίστηκαν, για το συντονισμό κοιλοτήτων κυματοδηγών (cavities) και τη δημιουργία συμπιεσμένων μικροκυματικών παλμών υψηλής ισχύος (High Power Microwaves – HPM) [57]. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν να επιτευχθούν πολλαπλάσιες τιμές ισχύος τροφοδοσίας της κεραίας, με αποτέλεσμα την πρόκληση πολύ πιο σοβαρών βλαβών στα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, που μπορεί να φτάσουν έως και στην ολοσχερή καταστροφή τους.

Οι μελέτες αυτές, μπορεί επίσης να τροφοδοτήσουν έρευνες για την αποτελεσματική θωράκιση των μη επανδρωμένων εναερίων οχημάτων, έναντι επιθέσεων με σκόπιμες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] F. Sabath, "Threat of Electromagnetic Terrorism - Leassons learned from documented IEMI Attacks," Toulouse : ONERA, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.15488/11701>
- [2] A. H. Michel, "COUNTER-DRONE SYSTEMS," p. 23.
- [3] G. Lubkowski, M. Lanzrath, L. C. Lavau, and M. Suhrke, "Response of the UAV Sensor System to HPEM Attacks," in *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245834.
- [4] "SKYWALL PATROL," *openworksengineering.com*. <https://openworksengineering.com/skywall-patrol/> (accessed Mar. 18, 2022).
- [5] Sjors, "DroneCatcher, Controlled drone Interception," *DroneCatcher*, Aug. 09, 2016. <https://dronecatcher.nl/> (accessed Mar. 18, 2022).
- [6] K. Hartmann and C. Steup, "The vulnerability of UAVs to cyber attacks - An approach to the risk assessment," in *CyCon*, 2013, pp. 1–23.
- [7] W. A. Radasky, C. E. Baum, and M. W. Wik, "Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI)," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 3, pp. 314–321, 2004, doi: 10.1109/TEMC.2004.831899.
- [8] "Savelec project - Home Page." <http://savelec-project.eu/> (accessed Jan. 09, 2022).
- [9] D. Nitsch, M. Camp, F. Sabath, J. L. ter Haseborg, and H. Garbe, "Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 3, pp. 380–389, 2004, doi: 10.1109/TEMC.2004.831842.
- [10] E. Haseloff, "Latch-Up, ESD, and Other Phenomena." 2000.
- [11] Y. Chen, D. Zhang, E. Cheng, and X. Wang, "Investigation on susceptibility of UAV to radiated IEMI," in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, 2018, pp. 718–722. doi: 10.1109/IEMC.2018.8393875.
- [12] L. Torrero, P. Mollo, A. Molino, and A. Perotti, "RF immunity testing of an Unmanned Aerial Vehicle platform under strong EM field conditions," in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2013, pp. 263–267.
- [13] C. Adami, S. Chmel, M. Jöster, T. Pusch, and M. Suhrke, "Definition and test of the electromagnetic immunity of UAS for first responders," *Advances in Radio Science*, vol. 13, pp. 141–147, Nov. 2015, doi: 10.5194/ars-13-141-2015.
- [14] J. L. Esteves, E. Cottais, and C. Kasmi, "Unlocking the Access to the Effects Induced by IEMI on a Civilian UAV," *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pp. 48–52, 2018.
- [15] K. Yu Sakharov, A. V. Sukhov, V. L. Ugolev, and Yu. M. Gurevich, "Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle," in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, 2018, pp. 40–43. doi: 10.1109/EMCEurope.2018.8484992.
- [16] "The Anti-Drone Revolution: 22 Companies Building Killer Drone Tech Today from DronesX," *Drone Defence*, Mar. 09, 2017. <https://www.dronedefence.co.uk/the-anti-drone-revolution-22-companies-building-killer-drone-tech-today-from-dronesx/> (accessed Jan. 06, 2022).
- [17] D. V. Giri and F. M. Tesche, "Classification of intentional electromagnetic environments (IEME)," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 3, pp. 322–328, 2004, doi: 10.1109/TEMC.2004.831819.
- [18] N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, and M. Rubinstein, "Study and Classification of Potential IEMI Sources," *System Design and Assessment Notes, Note 41*, Jan. 2014.

- [19] “IEC 61000-4-36 - Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems | Engineering360.” <https://standards.globalspec.com/std/14219190/IEC%2061000-4-36> (accessed Jan. 07, 2022).
- [20] “IEEE 1642-2015 - IEEE Recommended Practice for Protecting Publicly Accessible Computer Systems from Intentional Electromagnetic Interference (IEMI).” <https://standards.ieee.org/standard/1642-2015.html> (accessed Jan. 07, 2022).
- [21] A. Sokolov, K. Sakharov, O. Mikheev, V. Turkin, and A. Aleshko, *Radiators of Ultrashort Electromagnetic Pulses*. 2006, p. 205. doi: 10.1109/UWBUS.2006.307203.
- [22] K. Sakharov, V. Turkin, O. Mikheev, M. Dobrotvorskii, and A. Sukhov, “A Picosecond Pulsed Electric Field Strength Measuring Transducer,” *Measurement Techniques*, vol. 57, pp. 201–205, May 2014, doi: 10.1007/s11018-014-0431-2.
- [23] V. Efanov and M. Efanov, “A new generation of super power picosecond pulsers based on FID technology,” in *2013 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, 2013, pp. 1–1. doi: 10.1109/PLASMA.2013.6633448.
- [24] “Phantom 3 Standard - Product Information - DJI,” *DJI Official*. <https://www.dji.com/gr/phantom-3-standard/info> (accessed Jan. 09, 2022).
- [25] “Original DJI Phantom 3 Part 75 900M Transmission Remote Controller for DJI Phantom 3 Standard Version FPV RC Quadcopter,” *rcmoment*. <https://www.rcmoment.com/p-rm6115.html> (accessed Mar. 17, 2022).
- [26] “Amazon.com: DJI Mavic Air Quadcopter with Remote Controller - Onyx Black : Toys & Games.” <https://www.amazon.com/DJI-Mavic-Quadcopter-Remote-Controller/dp/B078WQ9SN3> (accessed Mar. 17, 2022).
- [27] “Mavic Air - Product Information - DJI,” *DJI Official*. <https://www.dji.com/gr/mavic-air/info> (accessed Jan. 09, 2022).
- [28] “New APM-powered Phantom clone at HobbyKing,” *diydrone*, May 29, 2014. <https://diydrone.com/profiles/blogs/new-apm-powered-phantom-clone-at-hobbyking> (accessed Mar. 17, 2022).
- [29] “Quanum Nova FPV GPS Waypoint QuadCopter (Mode 2) (Ready to Fly),” *Hobbyking*. https://hobbyking.com/en_us/quanum-nova-fpv-gps-waypoint-quadcopter-mode-2-ready-to-fly-1.html?__store=en_us (accessed Jan. 24, 2022).
- [30] “TWAP Series - BONN Elektronik GmbH.” <https://www.bonn-elektronik.com/en/rf-power-amplifiers/twap-series/> (accessed Feb. 15, 2022).
- [31] A. S. Jr. Gilmour, *Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Cross-Field Amplifiers, and Gyrotrons*, 1st edition. Boston, MA: Artech House Publishers, 2011.
- [32] R. & S. G. & C. KG, “R&S®SMB100A microwave signal generator.” https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/analog-signal-generators/rs-smb100a-microwave-signal-generator_63493-9379.html (accessed Feb. 15, 2022).
- [33] “Agilent 33220A Waveform Generator 20 MHz Function/Arbitrary | TEquipment.” <https://www.tequipment.net/Agilent33220A.asp> (accessed Feb. 15, 2022).
- [34] “Keysight / Agilent 33220A Function / Arbitrary Waveform Generator, 20 MHz.” <https://www.bellnw.com/manufacture/Agilent/33220A.htm> (accessed Mar. 17, 2022).
- [35] “Amplifier Research ATH800M5GA EMC Antennas Re... | ATEC.” <https://www.atecorp.com/products/amplifier-research/ath800m5ga> (accessed Mar. 17, 2022).
- [36] “NBM-550.” <https://www.narda-sts.com/en/wideband-emf/nbm-550/> (accessed Feb. 15, 2022).
- [37] “CHC – Frankonia Group.” <https://frankonia-solutions.com/portfolio/chc/> (accessed Jan. 24, 2022).
- [38] A. J. Martyr and M. A. Plint, “Anechoic Test Cells,” 2012, pp. 483–500. doi: 10.1016/B978-0-08-096949-7.00018-2.

- [39] “Anechoic Chambers - an overview | ScienceDirect Topics.” <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/anechoic-chambers> (accessed Jan. 08, 2022).
- [40] K. Kobayashi, K. Murayama, M. Yasuda, and K. Saegusa, “Basic Study of the Anechoic Chamber for Receiver Evaluation of the Next Generation Wireless Communication Terminal,” *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, vol. 137, pp. 34–45, Jan. 2017, doi: 10.1541/ieejfms.137.34.
- [41] “IEC 61000-4-3:2020 | IEC Webstore.” <https://webstore.iec.ch/publication/59849> (accessed Jan. 24, 2022).
- [42] “What is the Difference Between Near Field and Far Field,” *Compare the Difference Between Similar Terms*, Aug. 05, 2021. <https://www.differencebetween.com/what-is-the-difference-between-near-field-and-far-field/> (accessed Mar. 17, 2022).
- [43] C. A. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design, 4th Edition,” *John Wiley*, 2016.
- [44] “Field sensors - montena technology sa.” <https://www.montena.com/system/measurement-technique-and-tools/field-sensors/> (accessed Feb. 12, 2022).
- [45] “Rohde & Schwarz RTO1044 Digital Oscilloscope – ConRes Test Equipment.” <https://www.conrestestequipment.com/product/rto1044-digital-oscilloscope/> (accessed Feb. 15, 2022).
- [46] “Rohde & Schwarz RTO1044 4 Ch 4 GHz Digital Oscilloscope,” *Testwall - Test & Measurement*. <https://www.testwall.com/product/rohde-schwarz-rto1044/> (accessed Mar. 17, 2022).
- [47] “Data_sheet_BL3-5G_BL10G_baluns.pdf.” Accessed: Mar. 17, 2022. [Online]. Available: https://www.montena.com/fileadmin/technology_tests/documents/data_sheets/Data_sheet_BL3-5G_BL10G_baluns.pdf
- [48] “5225 - Ophir RF | RF Amplifier.” <https://www.everythingrf.com/products/microwave-rf-amplifiers/ophir-rf/567-78-5225> (accessed Mar. 17, 2022).
- [49] “ZVA24 - Rohde & Schwarz Network Analyzers - BRL Test.” https://www.brctest.com/index.php?main_page=product_info&products_id=4012 (accessed Feb. 15, 2022).
- [50] “NBM2016s.pdf.” Accessed: Mar. 17, 2022. [Online]. Available: <https://nardamiteq.com/docs/NBM2016s.pdf>
- [51] “Horn antenna,” *Wikipedia*. Oct. 17, 2021. Accessed: Mar. 17, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Horn_antenna&oldid=1050375403
- [52] “Mavic Air Battery Information & Overview | Aerial Guide.” <https://www.aerial-guide.com/article/mavic-air-battery-information-overview> (accessed Mar. 17, 2022).
- [53] D. R. Clark, C. Meffert, I. Baggili, and F. Breitingner, “DROP (DRone Open source Parser) your drone: Forensic analysis of the DJI Phantom III,” *Digital Investigation*, vol. 22, pp. S3–S14, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.diin.2017.06.013.
- [54] Powerbook Medic, *How to Take Apart the DJI Phantom 3 Drone Quadcopter*, (Nov. 17, 2015). Accessed: Mar. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=IMfj8XBdwuw>
- [55] RadRider33, *Teardown: Taking Apart a New DJI Phantom 3 Standard Drone*, (Jan. 20, 2016). Accessed: Mar. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=3pkNNT3vaoo>
- [56] “The Fundamentals of RF Directional Couplers and How to Use Them Effectively.” <https://www.digikey.gr/en/articles/the-fundamentals-of-rf-directional-couplers-and-how-to-use-them-effectively> (accessed Feb. 15, 2022).
- [57] S. P. Savaidis, Z. C. Ioannidis, N. A. Stathopoulos, S. A. Mitilineos, and C. Tsitouri, “Transmission line modeling of active microwave pulse compression systems,” in *2013 IEEE International*

Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2013), 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/COMCAS.2013.6685242.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - Όρια Πεδίων

f (GHz)	λ (m)	Όρια αντιδρόντος	
		κοντινού πεδίου (m)	Όρια μακρινού πεδίου (m)
1	0.3	0.599755405	2.858245656
1.01	0.297029703	0.602746722	2.886828113
1.02	0.294117647	0.605723267	2.915410569
1.03	0.291262136	0.608685257	2.943993026
1.04	0.288461538	0.611632903	2.972575482
1.05	0.285714286	0.614566411	3.001157939
1.06	0.283018868	0.617485982	3.029740395
1.07	0.280373832	0.620391815	3.058322852
1.08	0.277777778	0.6232841	3.086905308
1.09	0.275229358	0.626163026	3.115487765
1.1	0.272727273	0.629028775	3.144070222
1.11	0.27027027	0.631881528	3.172652678
1.12	0.267857143	0.63472146	3.201235135
1.13	0.265486726	0.637548741	3.229817591
1.14	0.263157895	0.640363539	3.258400048
1.15	0.260869565	0.643166019	3.286982504
1.16	0.25862069	0.64595634	3.315564961
1.17	0.256410256	0.64873466	3.344147418
1.18	0.254237288	0.651501131	3.372729874
1.19	0.25210084	0.654255905	3.401312331
1.2	0.25	0.656999129	3.429894787
1.21	0.247933884	0.659730945	3.458477244
1.22	0.245901639	0.662451497	3.4870597
1.23	0.243902439	0.665160921	3.515642157
1.24	0.241935484	0.667859354	3.544224613
1.25	0.24	0.670546928	3.57280707

1.26	0.238095238	0.673223772	3.601389527
1.27	0.236220472	0.675890016	3.629971983
1.28	0.234375	0.678545782	3.65855444
1.29	0.23255814	0.681191195	3.687136896
1.3	0.230769231	0.683826374	3.715719353
1.31	0.229007634	0.686451437	3.744301809
1.32	0.227272727	0.689066499	3.772884266
1.33	0.22556391	0.691671675	3.801466722
1.34	0.223880597	0.694267075	3.830049179
1.35	0.222222222	0.696852809	3.858631636
1.36	0.220588235	0.699428983	3.887214092
1.37	0.218978102	0.701995704	3.915796549
1.38	0.217391304	0.704553073	3.944379005
1.39	0.215827338	0.707101194	3.972961462
1.4	0.214285714	0.709640165	4.001543918
1.41	0.212765957	0.712170085	4.030126375
1.42	0.211267606	0.714691049	4.058708832
1.43	0.20979021	0.717203152	4.087291288
1.44	0.208333333	0.719706486	4.115873745
1.45	0.206896552	0.722201143	4.144456201
1.46	0.205479452	0.724687213	4.173038658
1.47	0.204081633	0.727164783	4.201621114
1.48	0.202702703	0.729633941	4.230203571
1.49	0.201342282	0.732094771	4.258786027
1.5	0.2	0.734547356	4.287368484

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II.a - Εξασθένιση των καλωδίων σύνδεσης της εξόδου του ενισχυτή με την κεραία

f (GHz)	Attenuation - S31 (dB)
1	1.578695014
1.0075	1.591865976
1.015	1.575368498
1.0225	1.579384199
1.03	1.586099745
1.0375	1.581415225
1.045	1.581986834
1.0525	1.589346311
1.06	1.58894604
1.0675	1.611659393
1.075	1.594939768
1.0825	1.611056415
1.09	1.618168279
1.0975	1.60682101
1.105	1.603420936
1.1125	1.60927611
1.12	1.621471633
1.1275	1.61219587
1.135	1.618784773
1.1425	1.616046871
1.15	1.604948617
1.1575	1.598394259
1.165	1.602198431
1.1725	1.586985209
1.18	1.586896777
1.1875	1.593323718

1.195	1.595732976
1.2025	1.602973356
1.21	1.620380909
1.2175	1.632272503
1.225	1.645211439
1.2325	1.665000264
1.24	1.671090305
1.2475	1.667614973
1.255	1.685583674
1.2625	1.700820469
1.27	1.683430412
1.2775	1.669318647
1.285	1.677078878
1.2925	1.647538228
1.3	1.632072399
1.3075	1.634118402
1.315	1.622301971
1.3225	1.626109115
1.33	1.621616087
1.3375	1.626493789
1.345	1.679238817
1.3525	1.673144175
1.36	1.675577546
1.3675	1.745839331
1.375	1.728493425
1.3825	1.717976266
1.39	1.756497933
1.3975	1.750234916
1.405	1.718012379
1.4125	1.730377702

1.42	1.742313792
1.4275	1.712603931
1.435	1.715279216
1.4425	1.715016321
1.45	1.709331488
1.4575	1.714517431
1.465	1.724076878
1.4725	1.725435678
1.48	1.739870825
1.4875	1.755352786
1.495	1.742376861
1.5025	1.761652609

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II.b - Εξασθένιση ισχύος του πρώτου τμήματος (balun, εξασθενητής, οπτικός πομπός, γραμμή οπτικών ινών και οπτικός δέκτης)

f (GHz)	Attenuation - S31 (dB)
1	11.48822856
1.0075	11.71174809
1.015	11.87253749
1.0225	11.95087086
1.03	11.94240422
1.0375	11.85958551
1.045	11.73692425
1.0525	11.62136656
1.06	11.52556518
1.0675	11.49730144
1.075	11.47323987
1.0825	11.48878873
1.09	11.53481815
1.0975	11.49722194
1.105	11.44658507
1.1125	11.56592729
1.12	11.56528077
1.1275	11.5600284
1.135	11.53540442
1.1425	11.51209191
1.15	11.47557
1.1575	11.37698226
1.165	11.23922481
1.1725	11.11814903
1.18	11.01664125
1.1875	10.96091049

1.195	10.98793294
1.2025	11.02198995
1.21	11.17602556
1.2175	11.40595559
1.225	11.64812583
1.2325	11.74712755
1.24	11.63055565
1.2475	11.32830394
1.255	10.94771073
1.2625	10.633878
1.27	10.45114103
1.2775	10.4451393
1.285	10.63890151
1.2925	11.02034656
1.3	11.4961265
1.3075	11.86911273
1.315	11.9681023
1.3225	11.75509681
1.33	11.31227976
1.3375	10.77208988
1.345	10.31006372
1.3525	10.05804709
1.36	10.13247866
1.3675	10.53030038
1.375	11.11059822
1.3825	11.68599426
1.39	12.0602124
1.3975	12.16050557
1.405	12.00151439
1.4125	11.62662972

1.42	11.18226802
1.4275	10.77460642
1.435	10.58538364
1.4425	10.5576645
1.45	10.78340998
1.4575	11.10477578
1.465	11.41030149
1.4725	11.62159583
1.48	11.71974743
1.4875	11.69721437
1.495	11.61439301
1.5025	11.49240817

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II.c - Τιμές πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

f (MHz)	E (V/m)				
	3 m	2 m	1 m	(2 m)/(3 m)	(1 m)/(3 m)
1000	170.3050283	247.2033631	468.1440644	1.451532967	2.748856385
1050	172.9572186	283.6824369	531.6940153	1.640188476	3.074136017
1100	173.7110586	297.3984414	615.1556242	1.712029412	3.541257703
1150	255.3471553	334.6555499	675.4941219	1.310590476	2.645395133
1200	172.3583462	267.3241277	557.9001598	1.550978723	3.236861877
1250	172.9925395	266.4821247	592.4362343	1.540425532	3.424634588
1300	193.0829041	237.0782057	625.716329	1.227857053	3.240661475
1350	225.4344648	287.7528855	630.8935791	1.276436971	2.798567556
1400	247.3478675	374.5717229	795.6630529	1.51435194	3.216777492
1450	267.0849208	355.7590499	738.6631991	1.332007246	2.765649206
1500	237.6198504	326.799381	668.803553	1.37530337	2.814594622

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.α - Αποτελέσματα Πειραμάτων για το drone DJI Phantom 3 Standard

POWER (dbm) -23
 PW (us) 50
 PRF (kHz) 1
 DC (%) 5
 d (m) 3,2

f (GHz)	t-HEAD1(σiηg)	E-HEAD1(σiηg)	t-BOTT1(σiηg)	E-BOTT1(σiηg)	t-SIDE1(σiηg)	E-SIDE1(σiηg)	t-BOTT2(σiηg)	E-BOTT2(σiηg)	HEAD1	BOTT1	SIDE1	BOTT2	HEAD2	SIDE2	SUM	VERT_POL	HOR_POL
1	0	5,4	0	5,2	0	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,01	0	7	0	4,8	0	3,9	0	0	7,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1,02	0	5,8	0	4,8	0	5,5	0	0	7,2	0	0	0	0	0	0	0	0
1,03	0	5,8	0	4,95	0	6,8	0	0	7,3	0	0	0	0	0	0	0	0
1,04	0	4,5	0	4	0	6	0	0	5,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1,05	0	6	0	5,25	0	6,9	0	0	6,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,06	0	6,9	0	6,5	0	6,9	0	0	8,1	0	0	0	0	0	0	0	0
1,07	0	7,9	0	7,3	0	8,1	0	0	8,1	0	0	0	0	0	0	0	0
1,08	0	8,7	0	7,9	0	6,2	0	0	9,1	0	0	0	0	0	0	0	0
1,09	0	9,3	0	8,5	0	5,2	0	0	9,3	0	0	0	0	0	0	0	0
1,1	0	8,5	0	7,8	0	4,8	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
1,11	0	7	0	6,5	0	4,2	0	0	9,3	0	0	0	0	0	0	0	0
1,112	0	7,1	0	5,3	0	5,3	0	0	8,4	0	0	0	0	0	0	0	0
1,13	0	6,4	0	6,7	0	6,7	0	0	8,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1,14	0	5,8	0	5,3	0	7	0	0	8,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1,15	0	7,8	0	6,1	0	7,7	0	0	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0
1,16	6	9,7	0	8,6	0	8,6	0	0	7,3	0	0	0	0	0	0	0	0
1,17	0	10,5	0	7,4	0	7,1	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,18	4	10,1	0	8,2	0	6,2	0	0	7,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,19	6	11,3	4	8,6	0	5,8	0	0	9,4	0	0	0	0	0	0	0	0
1,2	0	11	0	7,9	0	5	0	0	8,9	0	0	0	0	0	0	0	0
1,21	6	9,9	0	8,2	0	3,8	0	0	9,3	0	0	0	0	0	0	0	0
1,22	0	10,8	5	8,2	4	4,3	0	0	9,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1,23	0	9	0	8,1	0	5,7	0	0	9,4	0	0	0	0	0	0	0	0
1,24	0	10	0	7,2	6	6,3	0	0	9,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1,25	0	9,6	0	6,2	0	4,9	0	0	8,9	0	0	0	0	0	0	0	0
1,26	0	11	6	6	5	5,1	0	0	8,9	0	0	0	0	0	0	0	0
1,27	0	10,8	10	6,4	9	4,6	0	0	9,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,28	0	10,3	6	7,4	0	5,4	0	0	10,5	0	0	0	0	0	0	0	0
1,29	10	9,7	4	7,2	0	5,2	0	0	9,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1,3	0	9,9	0	9	6	5,5	0	0	10,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,31	0	8,4	5	7,7	0	5	0	0	8,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1,32	0	9,6	10	8,6	0	5,4	0	0	9,9	0	0	0	0	0	0	0	0
1,33	0	12,6	0	10,3	0	5	0	0	11,9	0	0	0	0	0	0	0	0
1,34	0	15,3	0	10,3	6	5,9	0	0	11,9	0	0	0	0	0	0	0	0
1,35	0	14,5	0	10,8	5	7	0	0	11,2	0	0	0	0	0	0	0	0
1,36	0	14,9	0	11,2	0	9,9	0	0	12,2	0	0	0	0	0	0	0	0
1,37	0	13,3	0	12,4	7	11,3	0	0	13,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1,38	0	11,2	9	9,9	0	9,4	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0
1,39	0	10,4	9	12	9	10,1	0	0	10,2	0	0	0	0	0	0	0	0
1,4	0	11,9	5	13,7	4	10,3	0	0	11,2	0	0	0	0	0	0	0	0
1,41	0	14	8	13,6	0	8,5	0	0	10,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,42	0	19,6	0	14,8	4	6,8	0	0	11,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,43	0	22,7	0	17,2	0	5,6	0	0	11,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,44	0	27,7	0	16,8	6	8,3	0	0	15,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1,45	7	21,3	0	16,2	8	10,4	0	0	15,2	0	0	0	0	0	0	0	0
1,46	9	18,2	0	13,6	10	12	0	0	14,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1,47	0	12	0	11,5	0	14,7	0	0	12,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,48	0	8,8	0	9,5	0	15,6	0	0	7,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1,49	0	9,41	0	13,6	0	16,3	0	0	6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0	17,1	0	19,1	0	14,7	0	0	8,3	0	0	0	0	0	0	0	0

