



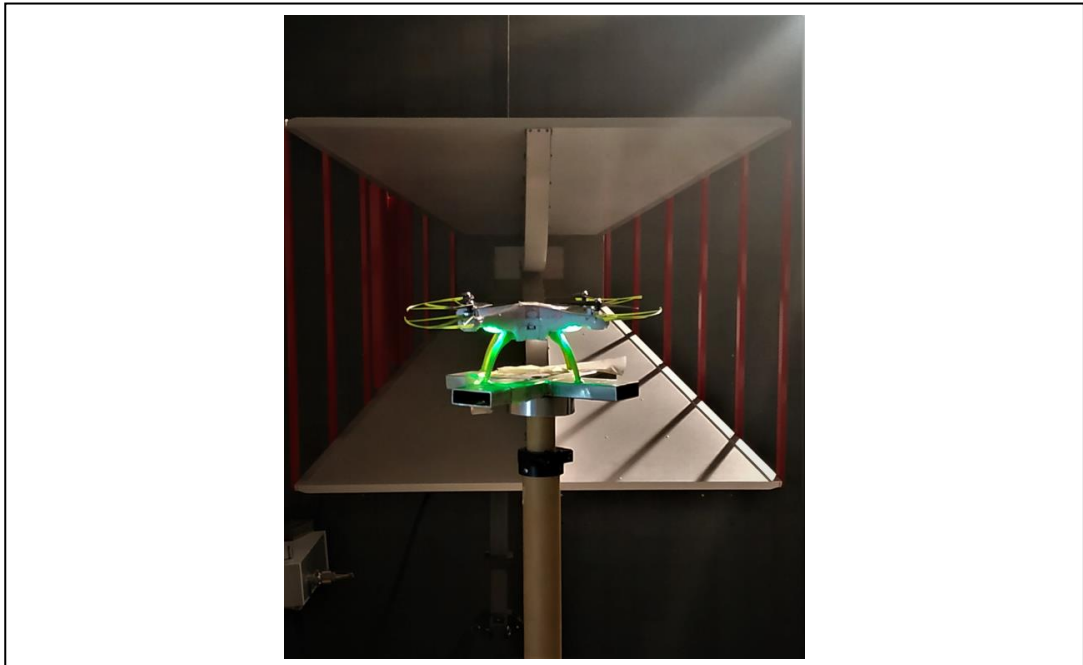
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Πειραματική Μελέτη Ηλεκτρομαγνητικής Ατρωσίας Μη Επανδρωμένων  
Εναέριων Οχημάτων στη Ζώνη Συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz**



**Φοιτητής: Αναγνωστόπουλος Ιωάννης  
ΑΜ: 50347180**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Σαββαΐδης Στυλιανός  
Καθηγητής**

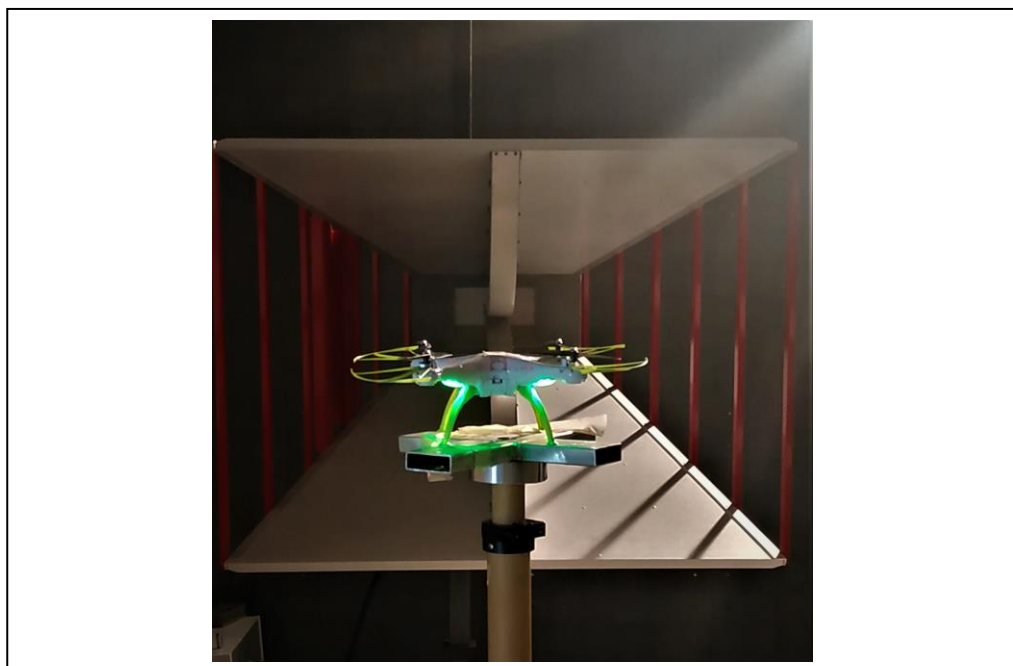
**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

# **Electromagnetic immunity of Unmanned Aerial Vehicle: Experimental Study in the 200 MHz – 1000 MHz frequency band**



**Student: Anagnostopoulos Ioannis**  
**Registration Number: 50347180**

**Supervisor**

**Savvaidis Stylianos**  
**professor**

**ATHENS-EGALEO, MARCH 2022**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Στυλιανός Σαββαΐδης, Καθηγητής	Νικόλαος Σταθόπουλος, Καθηγητής	Στυλιανός Μυτιληναίος, Αναπληρωτής Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Ιωάννης Αναγνωστόπουλος),**

**Μάρτιος, 2022**

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

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, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος .....Ιωάννης Αναγνωστόπουλος..... του...Παναγιώτη..., με αριθμό μητρώου ...50347180... φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

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

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

(Ονοματεπώνυμο φοιτητή)

Ιωάννης Αναγνωστόπουλος

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ioannis Anagnostopoulos', is centered on a light blue background.

(Υπογραφή φοιτητή)

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας (immunity) των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων (MEEO) σε ένα εύρος συχνοτήτων 200-1000 MHz. Τα MEEO κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος στην καθημερινότητα μας, με την χρήση τους για πολυάριθμες εργασίες. Ωστόσο, πολλές φορές συμβαίνει να χρησιμοποιούνται με κακόβουλο τρόπο ή αντίστροφα να γίνονται στόχος κακόβουλων ή μη επιθέσεων μέσω ηλεκτρομαγνητικών (ΗΜ) παρεμβολών. Σε αυτό το πλαίσιο η κατανόηση της ατρωσίας τους έναντι των ΗΜ παρεμβολών αποτελεί προϋπόθεση είτε για να αναπτυχθούν συστήματα ΗΜ παρεμβολών για την αντιμετώπιση της κακόβουλης χρήσης τους είτε για την ανάπτυξη τεχνικών θωράκισής τους προκειμένου να επιδεικνύουν αντοχή έναντι των ΗΜ παρεμβολών.

Η μελέτη της ατρωσίας πραγματοποιήθηκε εντός ανηχοϊκού θαλάμου με τη διεξαγωγή πειραμάτων έκθεσης δύο διαφορετικά εμπορικών MEEO σε ακτινοβολία. Ειδικότερα, τα ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία απασχόλησαν την πειραματική μελέτη αφορούν κυρίως τον εντοπισμό: α) των συχνοτήτων στις οποίες τα MEEO παρουσιάζουν μειωμένη ατρωσία, β) των ειδικών χαρακτηριστικών των παλμικών ΗΜ κυματομορφών (πλάτος, διάρκεια, συχνότητα επανάληψης και αριθμός παλμών), τα οποία αποτελούν προϋπόθεση για την πρόκληση σοβαρών διαταραχών στη λειτουργία των MEEO, γ) της επίδρασης την οποία έχει η κατεύθυνση πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων και η πόλωση τους και τέλος δ) των πιθανών διαδρομών σύζευξης (coupling paths) με κρίσιμα ηλεκτρονικά κυκλώματα, οι οποίες σε τελική ανάλυση ερμηνεύουν τα αίτια της πρόκλησης σοβαρών διαταραχών της φυσιολογικής λειτουργίας των MEEO.

Τα πειραματικά αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας αποδεικνύουν ότι τα υπό εξέταση MEEO επηρεάζονται από την ΗΜ ακτινοβολία σε ένα εύρος συχνοτήτων 200-1000 MHz. Τα δύο MEEO επιδεικνύουν μειωμένη ατρωσία σε συγκεκριμένες συχνότητες του φάσματος. Η πρόκληση διαταραχών θέτει κάποιες ελάχιστες απαιτήσεις σε ότι αφορά το πλάτος, τη διάρκεια, τη συχνότητα επανάληψης και τον αριθμό των ακτινοβολούμενων παλμών. Επίσης, η πρόκληση διαταραχών εξαρτάται με κρίσιμο τρόπο από την κατεύθυνση πρόσπτωσης της ΗΜ ακτινοβολίας καθώς και την πόλωση του προσπίπτοντος κύματος. Τέλος, η διερεύνηση σε ότι αφορά τις διαδρομές σύζευξης καταδεικνύει ότι αυτό συμβαίνει με μη συμβατικό και έμμεσο τρόπο (back door coupling) μέσω της σύζευξης με επιμέρους στοιχεία των MEEO, όπως καλωδιώσεις, πλακέτες κοκ, τα οποία δεν σχετίζονται άμεσα με τα συστήματα ασύρματης εκπομπής/λήψης, π.χ. κεραιές, τα οποία διαθέτουν. Δεδομένου ότι αυτά τα συστήματα υπάρχουν σε όλους τους τύπους των MEEO προκύπτει το συμπέρασμα ότι κατάλληλες μορφές ΗΜ κυματομορφών μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές διαταραχές στη λειτουργία των MEEO και να προκαλέσουν την εξουδετέρωσή τους.

## **Λέξεις – κλειδιά**

Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές, Ηλεκτρομαγνητική Ατρωσία, Μη επανδρωμένο Εναέριο Όχημα, Πειράματα Ακτινοβολίας, Ηλεκτρομαγνητικοί Παλμοί, Ανηχοϊκός Θάλαμος.

## **Abstract**

The key objective of this dissertation is to conduct an experimental study on the electromagnetic immunity of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in the frequency band of 200-1000 MHz. UAVs are becoming increasingly involved in our day to day lives due to their multiple uses and versatility. However, there have been many instances where UAVs have been used with malicious intent, or they've been the target of intentional electromagnetic interference. In such cases, understanding their immunity against the electromagnetic interference, becomes vital in developing new systems of electromagnetic interference to repel said malicious intentions, or even in the creation of new protective methods in order for the UAVs to display an even higher immunity level against electromagnetic interference.

The study on UAV electromagnetic immunity consisted of experiments where two kinds of commercial UAVs were exposed to radiation inside a semi-anechoic chamber. To specify, the goals of the research and of the experimental campaign were focused on tracking down: a) the frequency where UAVs showed reduced immunity levels, b) the specific characteristics of electromagnetic pulse waveforms (peak amplitude, duration, repetition frequency rate, number of Pulses), which determine the capability to cause serious disruption of UAV operation, c) the impact of electromagnetic wave angle of incidence and polarization and lastly d) the possible coupling paths with crucial electronic circuits looking to interpret the reason behind serious disruptions of the normal function of UAVs.

The experimental results of the dissertation showcase that the UAVs under investigation are affected by electromagnetic radiation in the spectrum of 200-1000 MHz. The two UAVs exhibit lower immunity levels in certain frequencies. Causing disruptions sets some minor requirements concerning the amplitude, the pulse duration and repetition frequency and well as the number of radiation pulses. Furthermore, causing such disruptions crucially depends on the angle of incidence of electromagnetic radiation and the polarization of the electromagnetic wave. Finally, the research on the coupling paths shows that back door coupling occurs through different parts of the UAV, cables, boards etc, which are not related directly with the UAV's RF front end.

Taking into account that those systems exist in every kind of UAV it is apparent that, under the right circumstances, certain electromagnetic waveforms can seriously disrupt the normal function of UAVs or even permanently neutralize them.

## **Keywords**

Electromagnetic Interference, Electromagnetic Immunity, Unmanned Aerial Vehicle, Radiation Experiments, Electromagnetic Pulses, Anechoic Chamber



## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων</b> .....	<b>15</b>
<b>Αλφαβητικό Ευρετήριο</b> .....	<b>17</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>18</b>
<b>Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας</b> .....	<b>18</b>
<b>Σκοπός και στόχοι</b> .....	<b>19</b>
<b>Μεθοδολογία</b> .....	<b>20</b>
<b>Καινοτομία</b> .....	<b>20</b>
<b>Δομή</b>	<b>21</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ερευνητικό υπόβαθρο</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1 Δημοσίευση #1: Predicting the Breakdown Behavior of Microcontrollers under EMP/UWB Impact Using a Statistical Analysis [3]</b> .....	<b>22</b>
<b>1.2 Δημοσίευση #2: Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats [4]</b> .....	<b>24</b>
<b>1.3 Δημοσίευση #3: Susceptibility and Vulnerability of Semiconductor Components and Circuits against HPM [5]</b> .....	<b>27</b>
<b>1.4 Δημοσίευση #4: RF Immunity Testing of an Unmanned Aerial Vehicle Platform Under Strong EM Field Conditions [6]</b> .....	<b>28</b>
<b>1.5 Δημοσίευση #5: Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle [7]</b> .....	<b>29</b>
<b>1.6 Δημοσίευση # 6: Susceptibility of IT devices to HPM pulse [8]</b> .....	<b>31</b>
<b>1.7 Δημοσίευση #7: Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves: Summary of Test Experience [9]</b> .....	<b>33</b>
<b>1.8 Δημοσίευση #8: Investigation on Susceptibility of UAV to Radiated IEMI [10]</b> .....	<b>34</b>
<b>1.9 Δημοσίευση #9: Unlocking the Access to the Effects induced by IEMI on a Civilian UAV [11]</b> ....	<b>35</b>
<b>1.10 Δημοσίευση #10: Damage evaluation of microwave anti swarm attack based on scoring method [12]</b>	<b>36</b>
<b>1.11 Δημοσίευση #11: Investigation on Effects of HPM Pulse on UAV’s Datalink [13]</b> .....	<b>37</b>
<b>1.12 Βασικά συμπεράσματα των δημοσιεύσεων</b> .....	<b>41</b>
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πειράματα Ελέγχου Ατρωσίας Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων</b> .....	<b>43</b>
<b>2.1 Εργαστηριακή Τοπολογία</b> .....	<b>43</b>
2.1.1 Ημι-Ανηχοϊκός Θάλαμος.....	43
2.1.2 Καλώδια.....	46
2.1.3 Γεννήτρια .....	47
2.1.4 Ενισχυτής.....	48
2.1.5 Κεραία .....	50
2.1.6 Πεδιόμετρο .....	52
2.1.7 Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου .....	53
2.1.8 Υπό Έλεγχο ΜΕΕΟ .....	53
2.1.9 Δωμάτιο Ελέγχου Εξοπλισμού-Οργάνων Μέτρησης (Control Room).....	57
2.1.10 Πειραματική Τοπολογία.....	58
<b>2.2 Πειραματική Μεθοδολογία</b> .....	<b>61</b>
2.2.1 Διακρίβωση εξοπλισμού .....	61
2.2.2 Εντοπισμός Συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία .....	74
2.2.3 Μεταβολή της απόστασης.....	75
2.2.4 Μελέτη με μεμονωμένο παλμό .....	75
2.2.5 Μελέτη για πολλαπλούς παλμούς .....	76
2.2.6 Αλλαγή προσανατολισμού .....	77
2.2.7 Διερεύνηση Τρωτότητας .....	81

<b>2.3</b>	<b>Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας .....</b>	<b>82</b>
<b>2.4</b>	<b>Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας του Syma X5HW .....</b>	<b>84</b>
<b>2.5</b>	<b>Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας του Nova Pro .....</b>	<b>95</b>
<b>2.6</b>	<b>Πειραματική διαδικασία διερεύνησης τρωτότητας των MEEO .....</b>	<b>103</b>
2.6.1	Τρωτότητα Syma X5HW .....	103
2.6.2	Τρωτότητα Nova Pro.....	112
<b>3</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>115</b>
<b>3.1</b>	<b>Συμπεράσματα πειραματικής διαδικασίας Syma X5HW .....</b>	<b>115</b>
3.1.1	Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $UP_A$ .....	115
3.1.2	Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $DOWN_A$ .....	118
3.1.3	Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $DOWN_B$ .....	118
3.1.4	Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $UP_B$ .....	118
3.1.5	Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $SIDE_A$ και $SIDE_B$ .....	119
<b>3.2</b>	<b>Συμπεράσματα επαναληπτικής πειραματικής διαδικασίας Syma X5HW .....</b>	<b>119</b>
<b>3.3</b>	<b>Συμπεράσματα πειραματικής διαδικασίας Nova Pro .....</b>	<b>121</b>
3.3.1	Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $DOWN_A$ .....	121
3.3.2	Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $SIDE_A$ και $SIDE_B$ .....	122
3.3.3	Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $DOWN_B$ .....	122
<b>3.4</b>	<b>Μελλοντικές Προεκτάσεις.....</b>	<b>123</b>
	<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές .....</b>	<b>124</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά παλμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα [3].

Πίνακας 1.2 Αναλυτικά χαρακτηριστικά των παλμών που χρησιμοποιήθηκαν [4].

Πίνακας 1.3 Η αναγκαία εκπεμπόμενη ισχύς για την επιρροή της εκάστοτε ομάδας συσκευών [4].

Πίνακας 1.4 Οι παράμετροι των UWB και EMP ακτινοβολητών που χρησιμοποιήθηκαν [7].

Πίνακας 1.5 Αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας [7].

Πίνακας 1.6 Η ελάχιστη ισχύς ανά συχνότητα, που προκαλεί παρεμβολή, όπου  $f_u$ = uplink frequency από το χειριστήριο, και  $f_d$ = downlink frequency [10].

Πίνακας 1.7 Η κατάσταση του datalink στις διαφορετικές συχνότητες και στα διαφορετικά επίπεδα ισχύος [10].

Πίνακας 1.8 Αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, συσχετιζόμενα με την ένταση του ακτινοβολούμενου πεδίου [11].

Πίνακας 1.9 Αναλυτικά αποτελέσματα του εκάστοτε πειράματος, μαζί με τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας, ανά πείραμα [13].

Πίνακας 2.1 Αναλυτικές πληροφορίες για την γεννήτρια R&S SMB-B106.

Πίνακας 2.2 Αναλυτικές πληροφορίες για τον ενισχυτή OPHIR<sub>RF</sub> 5225.

Πίνακας 2.3 Αναλυτικές πληροφορίες για την κεραία ETS 3106 B [17][18].

Πίνακας 2.4 Αποτελέσματα μέτρησης της εξόδου του ενισχυτή στις συχνότητες 200 - 450 MHz.

Πίνακας 2.5 Αποτελέσματα μέτρησης της εξόδου του ενισχυτή στις συχνότητες 500 - 750 MHz.

Πίνακας 2.6 Αποτελέσματα μέτρησης της εξόδου του ενισχυτή στις συχνότητες 800 - 1000 MHz.

Πίνακας 2.7.α Μετρήσεις (M) και θεωρητικές εκτιμήσεις (Θ) της έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου στις συχνότητες 800 - 1000 MHz και σε αποστάσεις 1, 2 και 3 μέτρα, με ακτινοβολούμενη ισχύ οδήγησης 0 dBm.

Πίνακας 2.7.β Μετρήσεις (M) και θεωρητικές εκτιμήσεις (Θ) της έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου στις συχνότητες 800 - 1000 MHz και σε αποστάσεις 1, 2 και 3 μέτρα, με ακτινοβολούμενη ισχύ οδήγησης -3 dBm.

Πίνακας 2.7.γ Μετρήσεις (M) και θεωρητικές εκτιμήσεις (Θ) της έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου στις συχνότητες 800 - 1000 MHz και σε αποστάσεις 1, 2 και 3 μέτρα, με ακτινοβολούμενη ισχύ οδήγησης -6 dBm.

Πίνακας 2.8 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 1m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.9 Αποτελέσματα στοχευμένων πειραμάτων: απόσταση 1m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.10 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.11 Αποτελέσματα στοχευμένων πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.12 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένης συχνότητας: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.13 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένης συχνότητας: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.14 Αποτελέσματα ελέγχου της επιρροής του αριθμού των παλμών: απόσταση 3 m – προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.15 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.16 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.17 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.18 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.19 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.20 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.21 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.22 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.23 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.24 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.25 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.26 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.27 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.28 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 1 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.29 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.30 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.31 Αποτελέσματα στοχευμένων πειραμάτων: απόσταση 2 m – προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>

Πίνακας 2.32 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένης συχνότητας (200 MHz-300 MHz): απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.33 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένης συχνότητας (500 MHz-600 MHz): απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.34 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.35 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.36 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.37 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.38 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.39 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.40 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.41 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.42 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.43 Σάρωση συχνοτήτων με την κεραία σε ασύμβατη πόλωση.

Πίνακας 2.44 Σάρωση συχνοτήτων με την καλωδίωση της μπαταρίας σε ασύμβατη πόλωση.

Πίνακας 2.45 Σάρωση συχνοτήτων με την καλωδίωση της πλακέτας τροφοδοσίας σε ασύμβατη πόλωση.

Πίνακας 2.46 Σάρωση συχνοτήτων με την καλωδίωση της πλακέτας τροφοδοσίας σε συμβατή πόλωση.

Πίνακας 2.47 Σάρωση συχνοτήτων με την κεντρική πλακέτα σε προσανατολισμό UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.48 Σάρωση συχνοτήτων με την κεντρική πλακέτα σε προσανατολισμό UP<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.49 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.50 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.51 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.52 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.53 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.54 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.55 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.56 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.57 Σάρωση Συχνότητας με την κεραία GPS σε ασύμβατη πόλωση.

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Σχηματική απεικόνιση των κυματομορφών R1 (αριστερά) και R2 (δεξιά) [7].

Εικόνα 1.2 Η ισχύς του πεδίου στο πεδίο του χρόνου [8].

Εικόνα 1.3 Η ισχύς του πεδίου στο πεδίο της συχνότητας [8].

Εικόνα 1.4 Το πλάτος των παλμών σε συνάρτηση με το χρόνο [13].

Εικόνα 1.5 Πυκνότητας ισχύος και της έντασης του πεδίου, σε συνάρτηση με την απόσταση [13].

Εικόνα 1.6 Γράφημα της εκπεμπόμενης ισχύος, ανάλογα με την συχνότητα εκπομπής [13].

Εικόνα 2.1 Εξωτερική άποψη του θαλάμου.

Εικόνα 2.2 Εσωτερική άποψη του θαλάμου.

Εικόνα 2.3 Πάνελ διασύνδεσης καλωδίων του θαλάμου (εξωτερική άποψη).

Εικόνα 2.4 Το καλώδιο LU7-142-8000.

Εικόνα 2.5 (α) Η γεννήτρια R&S SMB-B106 (β) Το μενού της R&S SMB-B106 στη διαδικασία frequency sweep.

Εικόνα 2.6 Ο ενισχυτής OPHIR<sub>RF</sub> 5225.

Εικόνα 2.7 Η κεραία ETS 3106B.

Εικόνα 2.8 Πλάγια όψη της κεραίας ETS 3106B.

Εικόνα 2.9 Το κέρδος της κεραίας ανάλογα την συχνότητα [18].

Εικόνα 2.10 Το πεδιόμετρο, NBM-550, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

Εικόνα 2.11 Οι τρεις μπαταρίες του Syma.

Εικόνα 2.12 Το drone Syma X5HW.

Εικόνα 2.13 Το χειριστήριο του Syma X5HW.

Εικόνα 2.14 Το drone Nova Pro.

Εικόνα 2.15 Το χειριστήριο του Nova Pro

Εικόνα 2.16 Σχηματικό γενικής τοπολογίας μηχανημάτων κατά την διάρκεια των πειραμάτων

Εικόνα 2.17 Οι δύο οθόνες του υπολογιστή στο Control Room κατά την διάρκεια του πειράματος. Στην αριστερή είναι ανοιγμένο το πρόγραμμα ελέγχου του πεδιομέτρου και στην δεξιά το πρόγραμμα απομακρυσμένου ελέγχου της γεννήτριας.

Εικόνα 2.18 Σύνδεση της γεννήτριας με τον ενισχυτή.

Εικόνα 2.19 Σύνδεση ενισχυτή με την (α) εξωτερική και την (β) εσωτερική πλευρά του πάνελ εισόδων/εξόδων.

Εικόνα 2.20 Η σύνδεση με στην κεραία με καλώδιο 7-16.

Εικόνα 2.21 Το πεδιόμετρο με το drone μπροστά του, τοποθετημένα πάνω στα τρίποδα.

Εικόνα 2.22 Ο εξασθενητής 30 dB ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ενισχυτή.

Εικόνα 2.23 Το εισερχόμενο σήμα στην συχνότητα των 200 MHz και ισχύος 0 dBm εμφανίζει έντονη παραμόρφωση.

Εικόνα 2.24 Το εισερχόμενο σήμα στην συχνότητα των 500 MHz και ισχύος 0 dBm δεν εμφανίζει καθόλου παραμόρφωση.

Εικόνα 2.25 Σχηματική απόδοση, της όψης του MEEO σε προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub> από την οπτική γωνία της κεραίας.

Εικόνα 2.26 Σχηματική απόδοση, της όψης του MEEO σε προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub> από την οπτική γωνία της κεραίας.

Εικόνα 2.27 Σχηματική απόδοση, της όψης του MEEO σε προσανατολισμό UP<sub>A</sub> από την οπτική γωνία της κεραίας.

Εικόνα 2.28 Σχηματική απόδοση, της όψης του drone, σε προσανατολισμό UP<sub>B</sub>, από την οπτική γωνία της κεραίας, ασφαλισμένο στο τρίποδο.

Εικόνα 2.29 Σχηματική απόδοση, της όψης του drone σε προσανατολισμό SIDE<sub>A</sub> από την οπτική γωνία της κεραίας.

Εικόνα 2.30 Σχηματική απόδοση, της όψης του drone, σε προσανατολισμό SIDE<sub>B</sub>, από την οπτική γωνία της κεραίας, ασφαλισμένο στο τρίποδο.

Εικόνα 2.31 Το Syma X5HW έχοντας αφαιρέσει το καπάκι.

Εικόνα 3.1 Το Nova Pro σε λειτουργία



### **Αλφαβητικό Ευρετήριο**

AGC: Automatic Gain Control

CW: Continuous wave

EMP: Electromagnetic Pulse

FOM: Figure of merit

HPM : High Power Microwave

IEMI: Intentional Electromagnetic Interference

MB: Microprocessor Boards

MEEO: Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα

NEMP: Nuclear Electromagnetic Pulse

tfwhm: Full width at half maximum

PRF: Pulse Repetition frequency

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

UWB: Ultra Wideband

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με πειραματική μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας (immunity) Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων (ΜΕΕΟ) σε ένα εύρος συχνοτήτων 200 MHz έως 1000 MHz. Το ΜΕΕΟ είναι ένα ιπτάμενο όχημα, το οποίο ελέγχεται με τηλεχειρισμό από το έδαφος και δεν έχει πιλότο στο εσωτερικό του. Το ΜΕΕΟ δεν είναι μια πρόσφατη τεχνολογική ανακάλυψη, ανακαλύφθηκε στον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο, στην Αγγλία, καθώς δημιουργήθηκε η ανάγκη κατάρριψης των εχθρικών Ζέπελιν, χωρίς να κινδυνεύουν οι πιλότοι της χώρας. Από το 1917 μέχρι σήμερα διαρκώς εξελίσσεται η τεχνολογία των ΜΕΕΟ και χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές.

Τα ΜΕΕΟ χρησιμοποιούνται για κατασκοπευτικούς σκοπούς, για πολεμικούς σκοπούς, για φωτογράφιση τοπίων στα οποία είναι πολύ δύσκολο να φτάσει άνθρωπος, για μεταφορά εμπορευμάτων, για χαρτογράφηση του εδάφους, για αγώνες ταχύτητας καθώς και για λόγους ψυχαγωγίας. Αυτές είναι ορισμένες ενδεικτικές εφαρμογές των ΜΕΕΟ, οι οποίες διαρκώς αυξάνονται, καθώς η τεχνολογία τους εξελίσσεται. Τα ΜΕΕΟ έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης, συγκριτικά με ένα αεροπλάνο ή ελικόπτερο και το σημαντικότερο είναι πως δεν εκθέτουν σε κανένα κίνδυνο τους χειριστές τους. Είναι σαφές ότι τα ΜΕΕΟ με το ένα ή τον άλλο τρόπο είναι κομμάτι της ζωής μας και αναμένεται τα επόμενα χρόνια να ενταχθούν ακόμη περισσότερο στην καθημερινότητα όλων μας.

Ωστόσο τα ΜΕΕΟ λειτουργούν σε ένα περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [1]-[2]. Στο περιβάλλον πτήσης των ΜΕΕΟ λειτουργούν δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, δορυφορικά δίκτυα, δίκτυα επίγειας τηλεόρασης και ραδιοφωνίας, ασύρματα δίκτυα διαδικτύου, κ.α.. Κατανοούμε ότι το περιβάλλον χρήσης τους τα εκθέτει σε ακτινοβολία από ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Εύλογα δημιουργείται το παρακάτω ερώτημα: επηρεάζονται τα ΜΕΕΟ από αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και σε τί βαθμό;

Η διερεύνηση του προαναφερόμενου ερωτήματος μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνικών ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης τους, ώστε να προστατευτούν από τις σκόπιμες ή μη ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ωστόσο, η διερεύνηση του ερωτήματος μπορεί να οδηγήσει και στην ανάπτυξη τεχνικών εξουδετέρωσης τους όταν αυτά χρησιμοποιούνται με κακόβουλο τρόπο. Όπως αναφέρθηκε τα ΜΕΕΟ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κατασκοπεία, για παρακολούθηση και γενικότερα για χρήση σε απαγορευμένους χώρους, όπως για παράδειγμα πάνω από στρατιωτικές εγκαταστάσεις, ευαίσθητες κρατικές δομές ή ακόμη και πάνω από ιδιοκτησίες πολιτών με σκοπό την

παρακολούθηση τους. Επιπρόσθετα, υπάρχουν ΜΕΕΟ, τα οποία έχουν την δυνατότητα να φέρουν οπλισμό., και ως εκ τούτου συνιστούν μια νέα απειλή για την κοινωνία.

Εύλογα προκύπτει το ερώτημα για το πώς θα μπορούσαν να αναχαιτιστούν στις περιπτώσεις που η χρήση τους είναι επιβλαβής, είτε για το κράτος και την κοινωνία, είτε για τους ιδιώτες. Η εύκολη απάντηση είναι με την χρήση συμβατικών όπλων. Όμως, τα συμβατικά οπλικά συστήματα, αν αστοχήσουν, αποτελούν και τα ίδια απειλή για το κοινωνικό σύνολο. Επομένως, τίθεται ένα ερώτημα για το εάν είναι εφικτό με την χρήση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών να επιτευχθεί η ασφαλής εξουδετέρωση ΜΕΕΟ, τα οποία χρησιμοποιούνται με κακόβουλο τρόπο;

### **Σκοπός και στόχοι**

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο να εξετάσει εάν τα ΜΕΕΟ επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και συγκεκριμένα να προσδιορίσει τα ειδικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυματομορφών από τα οποία εξαρτάται η δυνατότητα πρόκλησης σοβαρών διαταραχών σε ΜΕΕΟ.

Τα ειδικά ερωτήματα τα οποία θα απασχολήσουν τη διπλωματική εργασία είναι τα ακόλουθα:

- τί είδους διαταραχές μπορούν να προκληθούν όταν τα ΜΕΕΟ εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία,
- εάν το επίπεδο ατρωσίας εξαρτάται από τη φέρουσα συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και εάν οι συχνότητες μειωμένης ατρωσίας διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του ΜΕΕΟ,
- εάν η πρόκληση διαταραχών εξαρτάται από την πόλωση και τη γωνία πρόσπτωσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου,
- εάν υπάρχει διαφοροποίηση ως προς τη δυνατότητα πρόκλησης διαταραχών ανάμεσα σε εκπομπές συνεχόμενου κύματος (Continuous Wave, CW) και εκπομπές παλμικά διαμορφωμένες,
- εάν η πρόκληση διαταραχών θέτει απαίτηση για μία ελάχιστη ένταση πεδίου
- εάν η πρόκληση διαταραχών, στην περίπτωση των παλμικών ηλεκτρομαγνητικών κυματομορφών, θέτει απαίτηση για μία ελάχιστη διάρκεια παλμού καθώς και για μια ελάχιστη συχνότητα επανάληψης παλμών
- εάν μπορούν να εντοπιστούν τα αίτια, τα οποία προκαλούν σοβαρές διαταραχές, καθώς και οι διαδρομές σύζευξης (coupling paths) των σημάτων παρεμβολής.

## Μεθοδολογία

Προκειμένου να διερευνηθούν τα προαναφερόμενα ερωτήματα αναπτύχθηκε μία συγκεκριμένη πειραματική μεθοδολογία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά εμπορικά MEEΟ, ώστε να διασταυρωθούν τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Επιλέχθηκε να δοκιμαστούν σε παρεμβολές σε ένα εύρος συχνοτήτων 200 MHz-1000 MHz. Η διερεύνηση σε συχνότητες εκτός αυτών στις οποίες λειτουργούν τα MEEΟ (2.4 GHz) εντάσσει την προτεινόμενη έρευνα στην κατηγορία μελέτης των λεγόμενων backdoor παρεμβολών. Η συγκεκριμένη κατηγορία παρεμβολών αφορά τη διαταραχή δομικών μονάδων των MEEΟ, οι οποίες δεν διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του MEEΟ, π.χ. όπως μπορεί να συμβαίνει με τις τεχνολογίες μετάδοσης στα κανάλια επικοινωνιών των MEEΟ. Ως εκ τούτου τα όποια συμπεράσματα προκύπτουν μπορούν να ισχύουν με μεγάλη πιθανότητα σε ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών MEEΟ.

Για την υλοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός και μετρητικά όργανα του Ερευνητικού Εργαστηρίου “Ασύρματων-Οπτικών Διατάξεων και Δικτύων Επικοινωνιών”. Τα πειράματα ακτινοβολίας των MEEΟ πραγματοποιήθηκαν εντός ημι-ανηχοϊκού θαλάμου (semi-anechoic chamber). Στα πλαίσια των πειραμάτων δοκιμάστηκαν CW και παλμικές κυματομορφές με διαφοροποίηση της έντασης του πεδίου, της φέρουσας συχνότητας, της διάρκειας και της συχνότητας επανάληψης παλμών. Επίσης, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων τα MEEΟ τοποθετήθηκαν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς προκειμένου να ελεγχθούν οι διαφορές ανάλογα με την πόλωση και τη γωνία πρόσπτωσης του ΗΜ πεδίου. Τέλος έγινε προσπάθεια εύρεσης του τρόπου εισαγωγής της παρεμβολής στο σύστημα των MEEΟ και των ενδεχόμενων τεχνικών θωράκισής τους.

## Καινοτομία

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία έχουν διεξαχθεί ανάλογες πειραματικές μελέτες τόσο σε ηλεκτρονικές μονάδες και συσκευές γενικής χρήσης όσο και σε MEEΟ [3]-[13]. Αρκετές πειραματικές μελέτες, οι οποίες αφορούν τα MEEΟ, κάνουν χρήση ηλεκτρομαγνητικών παλμών υψηλής ισχύος [6], [11] για τους οποίους η δυνατότητα μεταβολής της διάρκειας και της συχνότητας επανάληψης των παλμών είναι περιορισμένη. Οι μελέτες σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος εστιάζουν είτε σε φαινόμενα front door coupling [8] είτε σε μη κρίσιμα φαινόμενα διαταραχών στους αισθητήρες [5], [9]-[10]. Επίσης, στη διαθέσιμη βιβλιογραφία δεν έχουν εντοπιστεί ερευνητικές εργασίες που να μελετούν συστηματικά τη διαφοροποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας των MEEΟ ανάλογα με την πόλωση και την γωνία πρόσπτωσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει μέτριας ισχύος ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς (περίπου έως και 250 V/m) εστιάζοντας στη λεπτομερή διερεύνηση της επίπτωσης της διάρκειας και της συχνότητας επανάληψης των παλμών. Επίσης, στο πλαίσιο των πειραμάτων της διπλωματικής

εργασίας, εξετάζεται συστηματικά η επίδραση της πόλωσης και της γωνίας πρόσπτωσης του ακτινοβολούμενου πεδίου σε ότι αφορά τη δυνατότητα πρόκλησης παρεμβολών.

## **Δομή**

Η διπλωματική εργασία δομείται σε τρία κύρια κεφάλαια. Το κεφάλαιο 1 έχει τίτλο «Ερευνητικό υπόβαθρο» και έχει ως αντικείμενο την περιγραφή και το σχολιασμό ερευνητικών εργασιών με αντικείμενο παραπλήσιο με αυτό της διπλωματικής εργασίας. Το κεφάλαιο 2 έχει τίτλο « Πειράματα ελέγχου ατρωσίας Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων ». Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η εργαστηριακή τοπολογία, η πειραματική μεθοδολογία και τέλος τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Το τρίτο κεφάλαιο έχει τίτλο «Συμπεράσματα – Μελλοντικές Προεκτάσεις». Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματικής διαδικασία καθώς και ενδεχόμενες μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας έρευνας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ερευνητικό υπόβαθρο

Η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να διερευνήσει το ζήτημα της ατρωσίας μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (MEEO) απέναντι στην έκθεση τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Προκειμένου να σχεδιασθεί με το καλύτερο δυνατό τρόπο η παρούσα πειραματική μελέτη, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική αναζήτηση ερευνητικών εργασιών, οι οποίες σχετίζονται με πειράματα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρονικές συσκευές, σε MEEO, σε αισθητήρες και άλλα σχετικά αντικείμενα. Στόχος της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι να διευρυνθεί το θεωρητικό υπόβαθρο της προτεινόμενης έρευνας, να δοθούν περισσότερες ιδέες για πειράματα και για να εντοπιστούν πιθανά σημεία, τα οποία χρειάζονται εμβάθυνση.

Στο πλαίσιο αυτό, το Κεφάλαιο 1 περιλαμβάνει την περιγραφή των πλέον σημαντικών δημοσιεύσεων, τα οποία εντοπίστηκαν από τη βιβλιογραφική αναζήτηση. Το κεφάλαιο οργανώνεται σε υπό-ενότητες, όπου η κάθε υπό-ενότητα αναφέρεται σε μία δημοσίευση από αυτές, οι οποίες επιλέχθηκαν ως πλέον συναφείς με την πειραματική μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### 1.1 Δημοσίευση #1: Predicting the Breakdown Behavior of Microcontrollers under EMP/UWB Impact Using a Statistical Analysis [3]

Στο δημοσίευμα του Michael Camp [3] γίνεται έλεγχος της επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στους μικροελεγκτές (microcontrollers). Οι μικροελεγκτές είναι ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα που βρίσκεται στις περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές, ακόμα και στα MEEO, για τον έλεγχο διαφόρων λειτουργειών. Στα πειράματα του δημοσιεύματος χρησιμοποιήθηκαν μικροελεγκτές με διαφορετικούς αριθμούς pin (20, 28 και 40 pin.)

Στα πειράματα γίνεται χρήση μονοπολικών παλμών με μικρό χρόνο ανύψωσης (rise time), όπως είναι οι Ηλεκτρομαγνητικοί Παλμοί (Electromagnetic Pulse, EMP) και οι Υπερ-Ευρυζωνικοί (Ultra-Wideband, UWB) παλμοί. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται παλμοί με ελάχιστο χρόνο ανύψωσης 100 ps και μέγιστο πλάτος εκπεμπόμενου κύματος, τα 100 KV/m. Τα χαρακτηριστικά των παλμών, οι οποίοι εξετάστηκαν αναφέρονται στον επόμενο Πίνακα. 1.1

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά παλμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα [3].

Pulse type	Rise time (tr)	Full width half max time (tfwhm)
UWB	100 ps	2.5 ns
EMP (fast)	1.5 ns	80 ns
EMP (medium)	5 ns	300 ns
UWB – slow EMP	500 ps – 10 ns	2.5 ns – 1600 ns
EMP (slow)	>10 ns	500 ns

Οι μικροελεγκτές δοκιμάστηκαν σε ακτινοβολία με συχνότητα από 100 MHz έως 1 GHz και σε αριθμό παλμών από 200 έως 200, ανάλογα με την ένταση του εξωτερικού πεδίου.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων χωρίστηκαν σε πέντε κατηγορίες ανάλογα με το μήκος της γραμμής δεδομένων-χρονισμού-τροφοδοσίας, την κατάσταση θύρας (port state), ανάλογα με το ρυθμό χρονισμού (clock rate) και τέλος ανάλογα με το χρονικό προφίλ του παλμού. Στο δημοσίευμα χρησιμοποιούνται τρεις έννοιες:

- το Breakdown Failure Rate (BFR), το οποίο ορίζεται ως ο ρυθμός εμφάνισης καταστρεπτικών σφαλμάτων.
- το Breakdown Threshold (BT), το οποίο ορίζεται ως η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, στην οποία το Breakdown Failure Rate (BFR) φτάνει το 0.05.
- το Breakdown Bandwidth (BB), το οποίο ορίζεται ως το διάστημα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, στο οποίο το BFR αλλάζει από 0.05 σε 0.95.

Αρχικά θα αναφερθούν τα αποτελέσματα ανάλογα με την κατάσταση θύρας. Η πειραματική διαδικασία έδειξε ότι δεν υπάρχουν διαφορές στα αποτελέσματα ανάλογα με την κατάσταση (high ή low) των θυρών εισόδου / εξόδου (I/O). Συγκεκριμένα, το BFR σε κατάσταση low και high είναι ταυτόσημο για τον ίδιο μικροελεγκτή. Τα αποτελέσματα των BT και BB δεν διαφέρουν ιδιαίτερα μεταξύ συσκευών, οι οποίες κάνουν χρήση του ίδιου μικροελεγκτή. Ωστόσο, διαφέρουν τα αποτελέσματα ανάλογα με τον τύπο του μικροελεγκτή, ο οποίος διαφοροποιείται στον αριθμό των pins που διαθέτει.

Τα αποτελέσματα, τα οποία προκύπτουν ανάλογα με το μήκος της γραμμής, δείχνουν ότι το BT επηρεάστηκε ελαφρά, ενώ αντίθετα το BB δεν επηρεάστηκε. Για το ελάχιστο μήκος κάθε είδους γραμμής το BT λαμβάνει μία τιμή περίπου 6 – 7 kV/m, η οποία μειώνεται καθώς αυξάνει το μήκος της γραμμής. Το BT της γραμμής που αφορά τα δεδομένα μειώθηκε έως 1 kV/m για μήκος γραμμής έως 20 cm. Το BT της γραμμής χρονισμού επηρεάστηκε περισσότερο από το παράγοντα του μήκους συγκριτικά με τη γραμμή δεδομένων. Στην γραμμή χρονισμού το BT μειώθηκε έως 3 kV/m σε μήκος γραμμής έως 20 cm. Το BB στην γραμμή χρονισμού για δύο από τους μικροελεγκτές μειώθηκε από 2 kV/m έως 5 kV/m για μήκος γραμμής έως τα 20 cm αντίστοιχα. Το BT για την γραμμή τροφοδοσίας μειώθηκε κατά 3 kV/m για μήκος γραμμής έως τα 20 cm, ενώ το BB μειώθηκε από 1 kV/m έως 4 kV/m, αντίστοιχα. Το μήκος της γραμμής επαναφοράς (reset) είχε την μεγαλύτερη επίδραση στο BT συγκριτικά με τα 3 προηγούμενα είδη. Συγκεκριμένα, μειώθηκε κατά 5 kV/m για το μήκος γραμμής, από το ελάχιστο έως τα 20 cm. Το BB της γραμμής επαναφοράς μειώθηκε από 4 kV/m έως 8 kV/m για το μήκος γραμμής από το ελάχιστο έως τα 20 cm, αντίστοιχα.

Με την αλλαγή τις τιμής του ρυθμού χρονισμού (clock rate) δεν φάνηκε να επηρεάζει τα Breakdown Threshold και τα Breakdown Bandwidth, τουλάχιστον σε τιμή λειτουργίας έως τα 8 MHz.

Πολύ μεγάλη επίδραση φάνηκε να υπάρχει στα πειράματα που άλλαξε το χρονικό προφίλ και το πλάτος του παλμού. Αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στα είδη των παλμών που χρησιμοποιήθηκαν, π.χ. το ενεργειακό περιεχόμενο ενός EMP παλμού κατανέμεται περισσότερο στις χαμηλότερες συχνότητες, ενώ του UWB παλμού κατανέμεται συγκριτικά με τον EMP παλμό περισσότερο στις υψηλότερες συχνότητες. Σύμφωνα με τα πειράματα, το BT είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση το BT του UWB. Το BB αυξάνεται σε παλμούς, οι οποίοι έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό τον αργό χρόνο ανόδου, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τους EMP παλμούς.

Συνοψίζοντας, από το δημοσίευμα του Michael Camp, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: οι μικροελεγκτές (microcontrollers), επηρεάζονται τόσο από παλμούς UWB όσο και από EMP, καθώς δέχονται επιρροή τα διαφορετικά είδη γραμμών του συστήματος, όμως με διαφορετικά αποτελέσματα στην κάθε περίπτωση. Αντίθετα, τα ρολόγια των ελεγκτών σε τιμή λειτουργίας έως 8 MHz δεν επηρεάστηκαν. Το μήκος των γραμμών του μικροελεγκτή, είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει το σύστημα. Η γραμμή δεδομένων, δεν το επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό, όμως οι γραμμές χρονισμού και τροφοδοσίας, λόγω του μεγαλύτερου μήκους τους, επηρεάζονται πολύ περισσότερο. Επιπρόσθετα, η επίδραση ποικίλει ανάλογα με το είδους το παλμού. Οι παλμοί με μικρό χρόνο ανόδου, όπως οι UWB, έχουν πολύ μεγάλη ενέργεια στο εύρος συχνοτήτων 100 MHz – 1GHz, και για το λόγο αυτό παρατηρούνται τα φαινόμενα Breakdown σε σχετικά μικρότερα πλάτη.

## **1.2 Δημοσίευση #2: Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats [4]**

Στο δημοσίευμα αυτό εξετάζεται η συμπεριφορά πολλαπλών συσκευών, όπως τα δίκτυα υπολογιστών, τα υπολογιστικά συστήματα, οι πλακέτες μικροεπεξεργαστών, οι μικροελεγκτές και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (microchip), κατά την έκθεση τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα στον τομέα των λογικών συσκευών δοκιμάζονται πύλες NAND, inverters, generic array chip, logic devices και shift registers. Στο κομμάτι των μικροελεγκτών εξετάζονται τρία είδη, τα οποία διαθέτουν διαφορετικό αριθμό εισόδων/εξόδων (I/O). Σε ότι αφορά τα υπολογιστικά συστήματα εξετάζονται τμήματα υπολογιστών, όπως η κεντρική πλακέτα (mainboard), ο επεξεργαστής (processor), οι μνήμες RAM και το τροφοδοτικό (power supply).

Όλες αυτές οι ηλεκτρονικές συσκευές δοκιμάστηκαν σε Ηλεκτρομαγνητικούς Παλμούς παρόμοιους με αυτούς, όπως αυτοί που προκύπτουν από πυρηνική έκρηξη (Nuclear EMP, NEMP), Μονοπολικούς και Διπολικούς UWB παλμών καθώς και μικροκυματικών παλμών υψηλής ισχύος (High Power Microwave, HPM). Τα πειράματα καλύπτουν ένα εύρος συχνοτήτων 100 MHz – 3 GHz.



Περισσότερες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των πειραματικών παλμών αναγράφονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2 Αναλυτικά χαρακτηριστικά των παλμών που χρησιμοποιήθηκαν [4].

Είδος παλμού	Παράμετρος 1	Παράμετρος 2	Παράμετρος 3
<b>NEMP</b>	tr=few ns	tfwhm=20 - 400 ns	E <sub>max</sub> =50 kV/m
<b>Unipolar UWB</b>	tr=90 – 250 ps	tfwhm =Few ns	E <sub>max</sub> =1-100 kV/m
<b>Bipolar UWB</b>	tr=50-250 ps	Tr-p=100 – 500 ps	E <sub>max</sub> =1-100 kV/m
<b>HPM</b>	fc=500 MHz – 5GHz	td=50 - 500 ns	E <sub>max</sub> =1-100 kV/m

όπου E<sub>max</sub> – η τιμή κορυφής του ηλεκτρικού πεδίου, **tfwhm**- χρόνος μεταξύ σημείων μισού πλάτους, **tr** χρόνος ανόδου, **tf** χρόνος καθόδου, **td** διάρκεια HPM, **fc** φέρουσα συχνότητα. Το **tfwhm** του UWB είναι 2.5 ns

Από την πειραματική διαδικασία προέκυψε το συμπέρασμα ότι μεταξύ των ξεχωριστών μικροελεγκτών του ίδιου είδους, δεν υπήρξαν διαφορές στα BT (Breakdown Threshold) και BB (Breakdown Bandwidth). Υπήρξαν διαφορές όμως μεταξύ μικροελεγκτών διαφορετικού είδους. Το BT επηρεάστηκε από το μήκος της γραμμής επαναφοράς (reset), από το μήκος της γραμμής χρονισμού-χρονισμού καθώς και από το είδος του μικροελεγκτή αλλά δεν επηρεάστηκε από το ρολόι του μικροελεγκτή(έως τα 8 MHz). Το BB επηρεάστηκε σημαντικά από το είδος του μικροελεγκτή και το μήκος της γραμμής επαναφοράς, ενώ λιγότερο επηρεάστηκε από το μήκος της γραμμής τροφοδοσίας και του ταλαντωτή. Ωστόσο, δεν επηρεάστηκε καθόλου από το μήκος της γραμμής δεδομένων και χρονισμού.

Όσον αφορά τις λογικές συσκευές (logic devices), οι συσκευές τεχνολογίας CMOS έπαθαν αναστρέψιμη βλάβη, η οποία επιδιορθώθηκε κλείνοντας την τροφοδοσία και ανοίγοντας την ξανά. Σε πεδία μεγαλύτερης ισχύος υπήρξαν καταστροφές, λόγω του παρασιτικού θυρίστορ (latch up effect). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το όριο καταστροφής μεταξύ CMOS και TTL-NAND είναι κοινό, αλλά οι συσκευές με TTL-NAND εμφάνισαν μην αναστρέψιμη βλάβη. Σε χαμηλότερης ισχύος πεδία τα TTL- NAND δεν έπαθαν βλάβη, αντίθετα από τα CMOS- NAND.

Τα πειράματα σε συστήματα μικροεπεξεργαστών (Microprocessor Boards, MB), έδειξαν ότι επίδραση των HPM και CW παλμών δεν διαφέρει ιδιαίτερα. Η διάρκεια των παλμών HPM πάνω από ένα κατώτατο όριο δεν διαφοροποιεί την επίδραση στα MB. Η συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse Repetition frequency, PRF) των HPM παλμών επηρεάζει πολύ λίγο τα MB. Το μικρότερο κατώφλι διαταραχής (smallest susceptibility level, SL) είναι 100 V/m, ενώ το υψηλότερο κατώφλι διαταραχής (highest susceptibility level, HL) είναι 1-2 kV/m. Όσο αυξάνεται το PRF του EMP και

του UWB τόσο μειώνεται το κατώφλι επεξεργασίας στους μικροεπεξεργαστές. Η επίδραση των EMP και UWB εξαρτάται κυρίως από το σχήμα του παλμού.

Η δοκιμή HY με έκθεση σε UWB παλμούς με  $t_r = 100$  ps και  $t_{fwhm} = 2.5$  ns καταδεικνύει ότι καμία διεργασία ή υποδιεργασία των υπολογιστών δεν επέφερε αλλαγή στο BT. Το BT μειωνόταν όσο αυξανόταν η γενιά της τεχνολογίας των PC χωρίς να υπάρχει διαφοροποίηση σε διαφορετικούς χρόνους ανόδου και διάρκειες παλμών.

Τα πειράματα του [4] ολοκληρώνονται με την έκθεση δικτύων υπολογιστών σε παλμούς μονοπολικούς UWB, με  $t_r = 100$  ps,  $f_{whm} = 2.5$  ns και πλάτος 100 V/m – 12000 V/m. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι δημιουργούνται bit errors, όταν το πλάτος του επαγόμενου παλμού γίνεται συγκρίσιμο με το πλάτος της τάσης των bits, δηλαδή όταν η ένταση του πεδίου είναι 220 V/m. Επίσης, χάνονται ολόκληρα πακέτα δεδομένων (data frames) όταν ένα σημαντικό κομμάτι του πακέτου καταστρέφεται. Αυτό συμβαίνει όταν το ηλεκτρικό πεδίο έχει ένταση 4 kV/m. Το δίκτυο καταρρέει όταν η επαγόμενη διαταραχή είναι τόσο ισχυρή, ώστε το hardware του δικτύου να μεταβαίνει σε κατάσταση lock ή reset. Αυτό συμβαίνει όταν η ένταση του πεδίου ξεπερνά τα 6 kV/m. Η αντοχή του δικτύου βασίζεται κυρίως στην μόνωση των καλωδίων και της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται.

Συνοψίζοντας, οι παλμοί UWB έχουν αρκετή ενέργεια για να καταστρέψουν δομές με chip. Από τον Πίνακα 1.3, προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο πιο πολύπλοκη είναι μια συσκευή, τόσο μεγαλύτερη ισχύ ακτινοβολούμενου πεδίου απαιτείται για να επηρεαστεί. Στον πίνακα αυτόν, όσο πιο χαμηλά σε κατηγορία πάμε, τόσο πιο πολύπλοκο είναι η υπό έλεγχο συσκευή (Device Under Test, DUT).

Πίνακας 1.3 Η αναγκαία εκπεμπόμενη ισχύς για την επιρροή της εκάστοτε ομάδας συσκευών [4].

EUT	UWB (kV/m)	EMP (kV/m)	HPM (kV/m)
Logic Devices	25	120	-
Microcontrollers	7.5	42	-
Microprocessor Boards	4	25	-
Pc Systems	12	-	0.2
Pc Networks	0.2	0.5	-

### 1.3 Δημοσίευση #3: Susceptibility and Vulnerability of Semiconductor Components and Circuits against HPM [5]

Στη δημοσίευση αυτή μελετάται η έκθεση αναλογικοί και ψηφιακοί μικροελεγκτές (microcontrollers) σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Χρησιμοποιούνται υψηλής ισχύος μικροκύματα (HPM) και παλμοί μικρού χρόνου ανόδου (1 kV/ns).

Για να επηρεαστούν τα αναλογικά συστήματα χρειάζεται μια μεγάλης διάρκειας διέγερση, ώστε να καλυφθούν μερικοί κύκλοι της συχνότητας του σήματος πληροφορίας. Η συχνότητα παραμόρφωσης στο αποδιαμορφωμένο σήμα καθορίζεται από την συχνότητα διαμόρφωσης ή από το συχνότητα επανάληψης παλμών, όπου κυρίως επηρεάζει την συχνότητα του σήματος πληροφορίας στα χαμηλής συχνότητας αναλογικά ηλεκτρονικά.

Όσον αφορά τα ψηφιακά συστήματα και ειδικά στους μικροελεγκτές, το σύστημα εισόδου είναι γρήγορο, με χρόνους της τάξης των ns ή χαμηλότερα, και ως εκ τούτου ανταποκρίνονται απευθείας σε υψηλές συχνότητες. Γι' αυτό χρειάζονται μικροί – σύντομης διάρκειας παλμοί, καθώς μπορούν να επηρεάσουν το ψηφιακό σύστημα στην περίπτωση που ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο κατώφλι τάσης. Κινδυνεύουν επίσης και κυκλώματα reset, και το latch up στα CMOS εξαρτήματα. Τα πειράματα επέφεραν στις συσκευές τόσο καταστροφικά όσο και μη καταστροφικά αποτελέσματα.

Τα μη καταστροφικά αποτελέσματα δείχνουν ότι στα χαμηλής συχνότητας αναλογικά ηλεκτρονικά και στα κυκλώματα αυτομάτου ελέγχου κέρδους (Automatic Gain Control, AGC) το μέγεθος της επίδρασης φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Frequency, PRF). Σε ζωνοπερατά (Band pass) αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, το μέγεθος της επίδρασης είναι μέγιστο όταν το PRF είναι ίσο με την κεντρική συχνότητα της ζώνης διέλευσης. Πολύ μεγάλα PRF, δηλ. μεγαλύτερα από την συχνότητα του σήματος πληροφορίας, επιφέρουν συμπίεση του σήματος πληροφορίας, είτε δημιουργώντας ένα σημαντικό offset shift, είτε οδηγώντας τον controller σε κορεσμό. Στα ψηφιακά κυκλώματα LSI-74, πάνω από μια τιμή έντασης πεδίου, ο κάθε εισερχόμενος παλμός επιφέρει μια αλλαγή κατάστασης (state). Στα MSI clocked κυκλώματα η πιθανότητα για ένα HPM παλμό να αλλάξει state αυξάνεται μαζί με το πλάτος της έντασης του πεδίου. Στη πλακέτα του μικροελεγκτή, τα πρώτα σφάλματα που δημιουργήθηκαν από την HPM ακτινοβολία είναι resets: το master-clear-reset (MCLR), το οποίο είναι παρόμοιο με το κουμπί reset στους υπολογιστές και το power-on-reset, το οποίο συμβαίνει όταν η τάση του τροφοδοτικού πέφτει κάτω από μια τιμή. Εάν αυξηθεί η τιμή του πεδίου η μνήμη χάνει τα προσωρινά (volatile) δεδομένα. Στα MSI (medium scale integrated) κυκλώματα ένας μεμονωμένος παλμός οδηγεί τον ημιαγωγό σε κατάσταση self-holding short-circuit μεταξύ της τάσης 3.3 V και της γείωσης.

Τα καταστροφικά αποτελέσματα των πειραμάτων σχετίζονται με φαινόμενα διάτρησης διηλεκτρικού (dielectric breakdown) σε όσο εξαρτήματα είναι φτιαγμένα από υλικά όπως τα οξείδια του πυριτίου και τα νιτρίδια. Συγκεκριμένα, η διάτρηση διηλεκτρικού συμβαίνει όταν το πεδίο έχει ένταση μεγαλύτερη από  $5 \times 10^5$  V/cm. Αν το κανάλι έχει πλάτος 1  $\mu\text{m}$  έως 10  $\mu\text{m}$ , τότε η τάση για να συμβεί διάτρηση κυμαίνεται μεταξύ 50 V και 500 V. Ωστόσο, μπορούν να εμφανιστούν και φαινόμενα διάσπασης επαφής (junction breakdown). Για να συμβεί αυτό θα πρέπει η τάση να είναι 10-40 V.

Συμπεραίνοντας, η επιρροή των HPM και UWB παλμών στα ηλεκτρονικά συστήματα είναι διπλή. Η παρεμβολές υψηλών συχνοτήτων και η επαγόμενη τάση χαμηλής συχνότητας, η οποία οφείλεται σε μη-γραμμικά φαινόμενα μπορεί να δημιουργήσει σοβαρές διαταραχές. Σε υψηλότερες τιμές πεδίου με παλμούς HPM και UWB, δημιουργείται τόσο μεγάλη τάση μέσα στο κύκλωμα, ώστε τα εξαρτήματά του καταστρέφονται.

#### **1.4 Δημοσίευση #4: RF Immunity Testing of an Unmanned Aerial Vehicle Platform Under Strong EM Field Conditions [6]**

Το δημοσίευμα αυτό αφορά την πειραματική εξέταση της αξιοπιστίας των χαμηλού κόστους MEEO, εξετάζοντας τα σαν πλήρη συστήματα. Στα πειράματα γίνεται χρήση πεδίου συνεχούς κύματος (Continuous Wave, CW) με ένταση πεδίου 10 V/m, σε οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση. Τα πειράματα γίνονται στο τηλεοπτικό και ISM φάσμα (470-862 MHz, 1.4-2.7 GHz).

Στο εύρος συχνοτήτων 470 – 862 MHz επιλέχθηκε ένας σταθερός ρυθμός μετάδοσης μηνυμάτων τηλεμετρίας ώστε να είναι εφικτό να υπολογιστεί ο λόγος μεταξύ του αριθμού των σημάτων που διαβάζονται προς τον αναμενόμενο αριθμό. Για κάποιες εκπομπές η τιμή του λόγου ήταν πάνω από 1. Γι' αυτό ευθύνεται μία μικρή ολίσθηση μεταξύ της δειγματοληψίας δεδομένων και του ρυθμού δημιουργίας τους, γεγονός που δημιουργεί περισσότερα εισερχόμενα μηνύματα από τα αναμενόμενα.

Στο εύρος συχνοτήτων 1.4 – 2.7 GHz, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μέσος όρος λαθών στις εσωτερικές σειριακές διεπαφές αυξήθηκαν από 27 στο 31 κατά την διάρκεια του τεστ. Αυτή η συμπεριφορά είναι λογική, και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα logic boards του MEEO δεν επηρεάστηκαν από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Κατά τη διάρκεια των τεστ για με οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση ο αριθμός των σφαλμάτων αυξήθηκε από 39 σε 41, κάτι που επίσης δείχνει την ατρωσία στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το pitch angle, όπως και για το roll angle δεν επηρεάζονται από την συχνότητα και την πόλωση. Παρόμοια συμπεριφέρεται και το accelerometer. Η πλακέτα του GPS σταμάτησε να λειτουργεί στο διάστημα 1.4-2.7 GHz, όπου το σήμα χάθηκε, λόγω της παρεμβολής. Το HM σήμα ήταν τόσο ισχυρό που

ακόμα και αν η παρεμβολή δεν ταίριαζε επακριβώς με την συχνότητα του GPS, ο δέκτης σταμάτησε να λειτουργεί.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα αποτελέσματα είναι, πως τα MEEO μπορεί να ελεγχθεί ακόμα και με παρουσία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με ένταση έως και 10 V/m με εξαίρεση τις εκπομπές στη ζώνη συχνοτήτων 1.4-2.7 GHz, όπου χάνεται το GPS σήμα.

## 1.5 Δημοσίευση #5: Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle [7]

Το αντικείμενο της δημοσίευσης είναι η εξέταση της ατρωσίας δύο MEEO στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα MEEO δοκιμάζονται πειραματικά σε EMP και UWB παλμούς. Χρησιμοποιείται ένας παλμός με μεγάλο πλάτος και σχετικά μικρή συχνότητα επανάληψης (1KHz) και ένας με μικρότερο πλάτος και μεγάλο repetition rate (1 MHz).

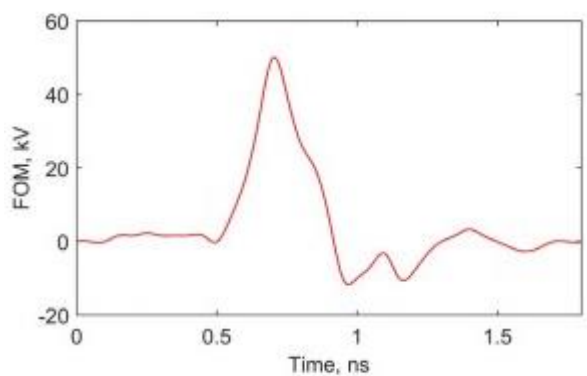


Fig. 2. Radiator R-1 typical waveform and its spectrum

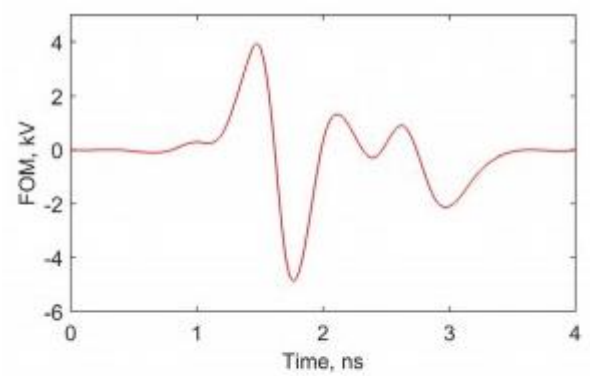


Fig. 3. Radiator R-2 typical waveform and its spectrum

Εικόνα 1.1 Σχηματική απεικόνιση των κυματομορφών R1 (αριστερά) και R2 (δεξιά) [7].

Η Εικόνα 1.1 απεικονίζει τις δύο κυματομορφές που χρησιμοποιούνται. Η αριστερή κυματομορφή ορίζεται ως R1 και η δεξιά ως R2. Και οι δύο κυματομορφές στα 2 GHz φασματικά είναι περίπου ίδιες, παρόλο που η αριστερή είναι μονοπολική με πλάτος κορυφής στο 1 m είναι 50 kV ( $E \times r = \text{FOM}$ ) ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ιωάννης Αναγνωστόπουλος

και η δεξιά είναι διπολική με πλάτος κορυφής στο 1 m είναι 4 kV ( $E \times r = FOM$ ). Η διαφορά είναι ότι το φασματικό περιεχόμενο της R1 ξεκινάει απ' το μηδέν και κατανέμει την ενέργεια της σε πολλές συχνότητες, ενώ η R2 έχει μικρότερο πλάτος αλλά είναι κεντραρισμένη σε υψηλή συχνότητα και το φάσμα της καταφέρνει με λιγότερο πλάτος στο πεδίο του χρόνου να έχει παραπλήσια φασματική πυκνότητα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Πίνακας 1.4 Οι παράμετροι των UWB και EMP ακτινοβολητών που χρησιμοποιήθηκαν [7].

Parameter	Value	
	R1	R2
Figure of merit ( $FOM = E \times r$ ), kV	49.5	3.5
Pulse full width half max (FWHM), ps	270	200
Repetition Rate, KHz	1	300
Antenna Type	4 TEM-horns (2x2)	4 TEM-horns (4x1)

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας κωδικοποιούνται με δύο ονομασίες την type A και την type B:

- ως type A ορίζεται, το αποτέλεσμα όπου το σήμα απ' το χειριστήριο χάνεται, δεν υπάρχει ανταπόκριση στις εντολές απ' το χειριστήριο, δεν έρχεται εικόνα στο χειριστήριο, το MEEO οδηγείται σε αναγκαστική προσγείωση, η κατάσταση δεν είναι αναστρέψιμη μετά το πέρας της ακτινοβολίας- απαιτείται χειροκίνητη επαναφορά του χειριστηρίου. Δημιουργείται από ακτινοβολητή με μικρό repetition rate.
- ως type B ορίζεται, το αποτέλεσμα όπου το MEEO αποσυνδέεται, δεν υπάρχει ανταπόκριση στις εντολές απ' το χειριστήριο, δεν έρχεται εικόνα στο χειριστήριο, το UAV εκτελεί την τελευταία εντολή που δέχθηκε απ' το χειριστήριο(π.χ. μπροστά), η κατάσταση είναι αναστρέψιμη μετά το πέρας της ακτινοβολίας, καθώς το UAV λειτουργεί και πάλι κανονικά. Δημιουργείται από ακτινοβολητή με υψηλό repetition rate.

Πίνακας 1.5 Αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας [7].

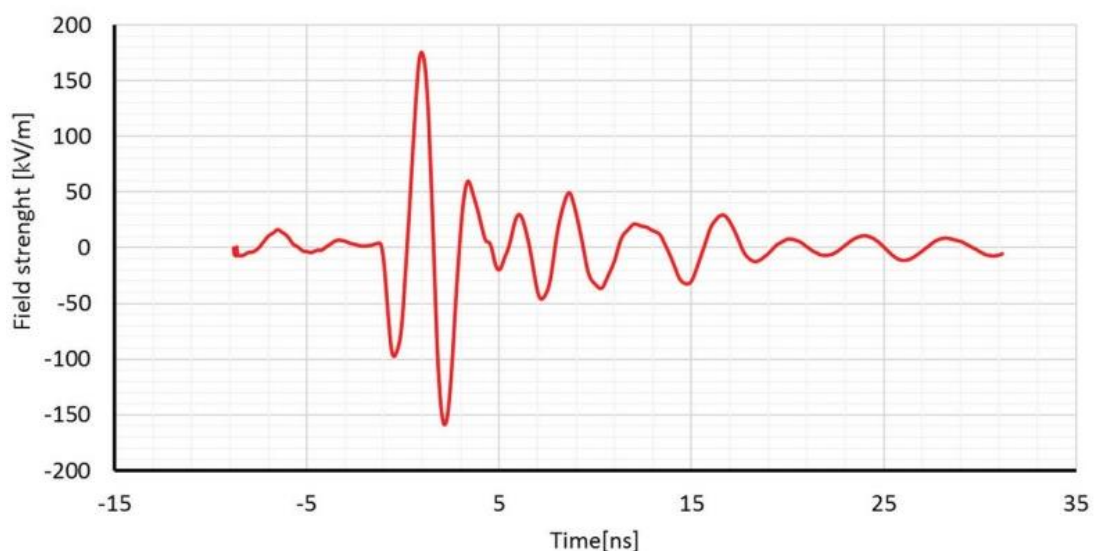
Radiator	Critical distance R, m	E, kV/m	Malfunction type
R-1	35	1.4	A
R-2	50	0.07	B

Από τον Πίνακα 2.4 αποδεικνύεται ότι με χρήση του R1 σε απόσταση 35m, και ένταση πεδίου 1400 V/m προκαλείται βλάβη τύπου A. Με χρήση του R2 σε απόσταση 50m και ένταση 70 V/m προκαλείται βλάβη τύπου B.

Τα τελικά συμπεράσματα του δημοσιεύματος αυτού είναι ότι οι ακτινοβολητές με παλμούς με μεγάλη συχνότητα επανάληψης παλμών προκαλούν πρόβλημα στην επικοινωνία τηλεχειριστηρίου-MEEO (πρόβλημα Type B). Σ αυτή την περίπτωση, το MEEO επανέρχεται μόλις η ακτινοβολία σταματήσει. Εμφανίζονται άλλοτε προβλήματα τύπου A και άλλοτε τύπου B. Το πρόβλημα τύπου B, εξαρτάται μόνο από την ένταση του πεδίου E (50-70 kV/m), αλλά όχι από τη συχνότητα επανάληψης παλμών ( 300 kHz και 1MHz repetition rate προκαλούν το ίδιο αποτέλεσμα(B) άρα δεν εξαρτάται από αυτό). Το πρόβλημα τύπου A δεν μπορεί να αντιστραφεί, προκαλείται από παλμό με χαμηλή συχνότητα επανάληψης παλμών και οδηγεί το MEEO σε αναγκαστική προσγείωση, και μετά θα πρέπει να γίνει χειροκίνητα reset στο σύστημα ώστε να λειτουργήσει ξανά.

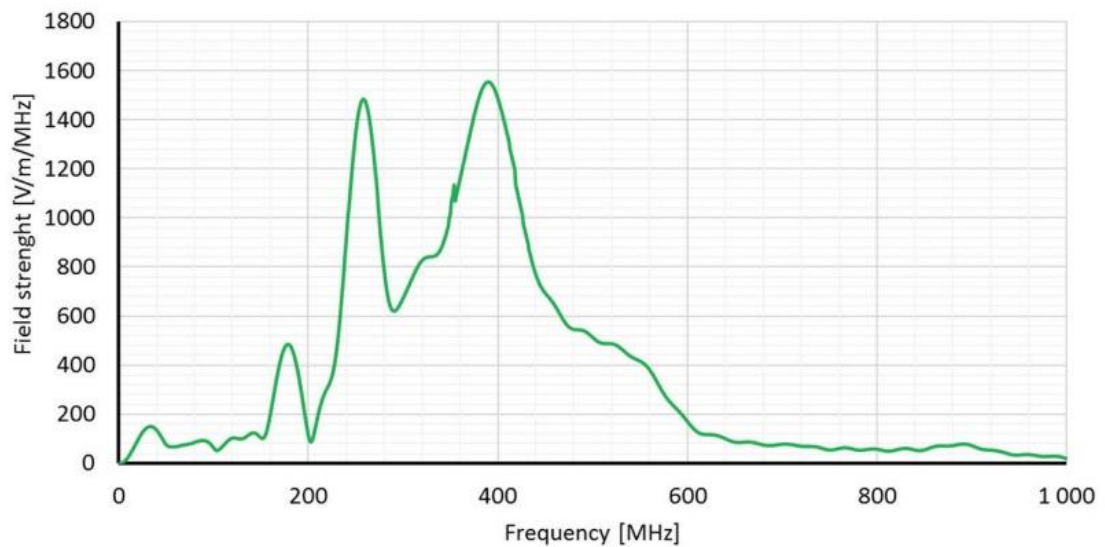
## 1.6 Δημοσίευση # 6: Susceptibility of IT devices to HPM pulse [8]

Αντικείμενο του paper αυτού είναι ο έλεγχος ατρωσίας συσκευών IT ( Information Technology). Συγκεκριμένα ελέγχονται PC, notebook, HDD, SD card, MMC card, Wi-Fi-routers και flash memory ( USB discs). Οι συσκευές αυτές δοκιμάζονται, ως προς την ατρωσία τους, απέναντι σε HPM (High Power Electromagnetic Microwave) παλμούς, με πολύ μικρή διάρκεια, αλλά συγχρόνως με υψηλή ισχύ, η οποία φτάνει και τα 320 kV/m.



Εικόνα 1.2 Η ισχύς του πεδίου στο πεδίο του χρόνου [8].





Εικόνα 1.3 Η ισχύς του πεδίου στο πεδίο της συχνότητας [8].

Ο HPM παλμός δημιουργείται από την γεννήτρια Diehl DS 110 και η κάθε συσκευή εκτίθεται σε έναν και σε δέκα παλμούς ανά δευτερόλεπτο, προκειμένου να εξεταστεί αν το πλήθος των παλμών επιφέρει διαφορετική επιρροή.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα έδειξαν ότι τα αποτελέσματα στην έκθεση των συσκευών σ' ένα HPM παλμό ανά δευτερόλεπτο και σε 10 είναι κοινά, καθώς και ότι, δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα ο αριθμός των παλμών, αλλά το πλάτος της ισχύος τους διαταράσσει/καταστρέφει τις συσκευές. Τα περισσότερα προβλήματα τα είχαν τα Wi-Fi routers, portable devices (tablets), notebooks και τα hard disks. Ενώ τα λιγότερα τα είχαν οι SD memory cards, και οι tempest computers(προδιαγραφές NATO).

Πιο συγκεκριμένα η τρωτότητα (καταστροφή) της κάθε συσκευής εντοπίστηκε στις ακόλουθες τιμές κατωφλίου για την ένταση του πεδίου:

- για SD και MMC memory cards – πάνω από 320 kV/m
- για TEMPEST computers – 320 kV/m,
- για flash memory (USB flash drive) – 250 kV/m,
- για notebook computers – 180 kV/m,
- για hard disk's – 170 kV/m,
- για tablets – 120 kV/m,
- για Wi-Fi routers – 30 kV/m



Εξάχθηκε ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα, ότι όσο πιο καινούργια σε τεχνολογία είναι η συσκευή (μεγαλύτερη χωρητικότητα, μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας του επεξεργαστή), τόσο πιο δύσκολα επηρεάστηκαν από τον HPM παλμό. Επιπρόσθετα, η εκπομπή ενός HPM παλμού, στην ζώνη λειτουργίας των συσκευών πληροφορίας (IT), μπορεί να κάψει τα εσωτερικά κυκλώματα, και να τα καταστήσει ανίκανα για περαιτέρω λειτουργία.

## 1.7 Δημοσίευση #7: Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves: Summary of Test Experience [9]

Το δημοσίευμα αυτό ελέγχει την επιρροή της ακτινοβολίας σε συστήματα, όπως συστήματα ραδιοεπικοινωνιών, αυτοκίνητα, υπολογιστές, σταθμοί τηλεπικοινωνιών κ.ο.κ. Τα αντικείμενα αυτά εκτίθενται σε ακτινοβολία, με την χρήση παλμών HPM με ισχύ 140 MW στην S band. Έχουν PRF 300 Hz και μήκος παλμού 0.4 μs και εκπέμπονται σε ομάδες παλμών (burst) διάρκειας 10 sec.

Τα κύρια αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης αφορούν τα φαινόμενα άτυπης σύζευξης (Back door coupling) σε μη προστατευμένα ηλεκτρονικά. Τα αποτελέσματα των παρεμβολών είναι πιο έντονα στις χαμηλότερες συχνότητες (L και S ζώνη συχνοτήτων) σε σύγκριση με τις υψηλότερες. Ακόμα, διαταραχές αρχίζουν να συμβαίνουν στις L και S ζώνες, όταν η ισχύς του εκπεμπόμενου πεδίου είναι κοντά στα εκατοντάδες volt/meter, ενώ μόνιμη ζημιά προκαλείται σε τιμές έντασης πεδίου στο διάστημα 15-25 kV/m. Μεγάλο ενδιαφέρον έχει το ότι εμφανίζεται μόνιμη ζημιά ακόμη και αν το σύστημα είναι απενεργοποιημένο. Ως πιο γενικό αποτέλεσμα, που ισχύει για ένα μεγαλύτερο εύρος συσκευών είναι το ότι η εμφάνιση μόνιμης ζημιάς, δεν έχει βρεθεί να συνδέεται με το PRF.

Οι δοκιμές σε PC, πραγματοποιήθηκαν σε συχνότητες από 1 – 4 GHz και σε ένταση πεδίου 100 V/m. Χρησιμοποιήθηκαν τρία είδη διαμόρφωσης : συνεχούς κύματος (CW), διαμόρφωσης πλάτους ( AM, 80 %, 1 kHz), παλμική με PRF 217 Hz, 50 % duty cycle. Τα τεστ αυτά έδειξαν ότι ανωμαλίες συνέβησαν μονάχα σε συγκεκριμένες επαναλαμβανόμενες συχνότητες και ότι οι ανωμαλίες εμφανίστηκαν μόνο σε συγκεκριμένες πολώσεις. Μετά από την επανεκκίνηση του υπολογιστή, το σύστημα επανερχόταν στην κανονική λειτουργία του. Υπολογιστές οι οποίοι είναι πιο νέας τεχνολογίας, σε σχέση με τους υπόλοιπους, έχουν μεγαλύτερη ατρωσία στους HPM. Ωστόσο, μόνιμη ζημιά παρουσιάστηκε στους υπολογιστές, σε επίπεδα ισχύος, 15-20 kV/m. Εξαιρέση στο φαινόμενο αυτό αποτελεί το PC με την επίπεδη οθόνη, που άντεξε ως τα 100 V/m σε PRF 1kHz και συχνότητα 140 MHz, duty cycle 50 %, διάρκεια παλμού 0.5 ms. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα εκτιμάται ότι για να γίνει σαμποτάζ σε τέτοιες συσκευές, η μέγιστη απόσταση είναι σχεδόν 1 Km.

## 1.8 Δημόσνευση #8: Investigation on Susceptibility of UAV to Radiated IEMI [10]

Στο δημοσίευμα αυτό δοκιμάζεται ένα MEEO και συγκεκριμένα μελετάται εάν επηρεάζεται μέσω της κεραίας του συστήματος (front door coupling). Στα πειράματα γίνεται χρήση κυματομορφών CW με συχνότητες από 10 MHz έως 18 GHz και με ισχύ ηλεκτρικού πεδίου χαμηλότερη από 200 V/m. Η απόσταση στα πειράματα, προσομοιώνεται με μια σειρά εξασθενητών στο σήμα του τηλεχειριστηρίου. Η παρεμβολή εκτέμπεται και στην συχνότητα του downlink, καθώς το MEEO έχει διαφορετικές συχνότητες ανάλογα την κατεύθυνση εκπομπής.

Στα MEEO υπάρχουν δύο υποσυστήματα, τα οποία είναι πιθανόν να επηρεαστούν από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Intentional Electromagnetic Interference, IEMI). Το ένα περιέχει όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου (computing unit, aviation electric unit) και το δεύτερο είναι το σύστημα επικοινωνίας. Η επιρροή στο κανάλι επικοινωνίας εξαρτάται από την απόσταση του MEEO με το και τον επίγειο σταθμό ελέγχου του. Όταν το MEEO είναι κοντά στο επίγειο σταθμό ελέγχου, το σήμα είναι πολύ ισχυρό για να παρεμβληθεί. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις το σύστημα επικοινωνιών είναι πιο ευάλωτο. Έτσι, το MEEO δοκιμάστηκε σε δύο κατηγορίες πειραμάτων, για να εξεταστούν και οι δύο πιθανοί τρόποι.

Στην πρώτη κατηγορία πειραμάτων εντοπίζεται η ελάχιστη ισχύς, του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, για την δημιουργία παρεμβολής στο κανάλι επικοινωνίας του MEEO. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Πίνακα 1.6, όπου για διαφορετικές συχνότητες κοντά η μακριά απ' τη συχνότητα του uplink και στην συχνότητα του downlink, σημειώνεται η ελάχιστη τιμή έντασης πεδίου που δημιουργεί παρεμβολή.

Πίνακας 1.6 Η ελάχιστη ισχύς ανά συχνότητα, που προκαλεί παρεμβολή, όπου  $f_u$ = uplink frequency από το χειριστήριο, και  $f_d$ = downlink frequency [10].

f	f1	f2	f3	f4	f5	f6
Relation	$f_1=f_u$	$2f_2=f_u$	$3f_3=f_u$	$4f_4=f_u$	$5f_5=f_u$	$f_d$
Radiated electric field	0.94	2.79	15.12	16.21	28.17	2.48

Στη δεύτερη κατηγορία πειραμάτων μελετάται η κατάσταση της ζεύξης επικοινωνίας όταν ο διπλέκτης ακτινοβολείται από συνεχές κύμα. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής αναγράφονται στον Πίνακα 1.7.

Πίνακας 1.7 Η κατάσταση του datalink στις διαφορετικές συχνότητες και στα διαφορετικά επίπεδα ισχύος [10].

f	f1	f2	f3	f4	f5	f6
Level Value (dBm)	-130	-34	-21	-15	-13	-13
Situation of data link	unlock	unlock	unlock	unlock	lock	lock
Automatic Control Gain (V)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.69	0.69

Από τον πίνακα εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- όταν το εκπεμπόμενο συνεχές σήμα παρεμβολής έχει την ίδια συχνότητα με το σήμα από το χειριστήριο τότε επηρεάζεται το κανάλι επικοινωνίας ακόμα και με σήμα χαμηλής ισχύος - 130 dBm.
- όταν το σήμα παρεμβολής είναι αδύναμο ή όταν η συχνότητα είναι μακριά από την συχνότητα λειτουργίας του MEEO η ζεύξη επικοινωνίας δεν μπορεί να επηρεαστεί.
- εάν το σήμα παρεμβολής έχει συχνότητα κοντά στην συχνότητα λειτουργίας, τότε μπορεί να περάσει από την κεραία και τον διπλέκτη του MEEO και θα επηρεάσει η ζεύξη επικοινωνίας.

Τα πειράματα έδειξαν ότι σε συνθήκες front door coupling τα MEEO είναι δυνατή η παρεμβολή στο σύστημα επικοινωνιών τους. Συνεχές εκπεμπόμενο σήμα με συγκεκριμένη συχνότητα επηρεάζει το σήμα από το χειριστήριο και αυξάνει το bit error rate. Το σύστημα λήψης του MEEO δεν είναι αρκετά καλό για να ξεχωρίσει την παρεμβολή, όταν η συχνότητα της είναι ίδια ή κοντινή στην συχνότητα λειτουργίας του. Το φαινόμενο, όπου το MEEO παρεμβάλλεται ακόμα και όταν η συχνότητα παρεμβολής είναι εκτός συχνότητας λειτουργίας αποδίδεται στο RF πομποδέκτη, γιατί δεν απομονώνει την εκπομπή και τη λήψη καλά (παρεμβάλλεται και όταν δεν κάνει receive).

### 1.9 Δημοσίευση #9: Unlocking the Access to the Effects induced by IEMI on a Civilian UAV [11]

Στο δημοσίευμα αυτό δοκιμάζεται η επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στους διάφορους επιμέρους αισθητήρες ενός MEEO. Οι πειραματικές κυματομορφές είναι είτε CW συχνότητας 100 MHz-2 GHz είτε παλμικές με συχνότητα επανάληψης 1 Hz – 20 KHz.

Η έκθεση στην ακτινοβολία δημιούργησε πρόβλημα στον αισθητήρα θερμοκρασίας της μπαταρίας, καθώς εμφανίστηκε απόκλιση 10 βαθμών όταν το πεδίο είχε ένταση 75-95 V/m. Επιπρόσθετα ο

αισθητήρας της κατακόρυφης ταχύτητας παρείχε λανθασμένες μετρήσεις κάτι που μπορεί να επηρεάσει την τιμή της μέτρησης του υψόμετρο του MEEO. Περισσότερα σφάλματα περιγράφονται στον Πίνακα 1.8.

Πίνακας 1.8 Αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, συσχετιζόμενα με την ένταση του ακτινοβολούμενου πεδίου [11].

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

Συνοψίζοντας, παρατηρήθηκε επίδραση σε πολλούς αισθητήρες, οι οποίοι είναι σημαντικοί για να μπορεί να πετάξει σωστά το MEEO. Βέβαια επειδή το πείραμα έγινε σε κλωβό Faraday, το σήμα του GPS δεν ήταν δυνατόν να φτάσει στην συσκευή, και ίσως η συσκευή να διόρθωνε τα λάθη μέσω του σήματος αυτού. Το MEEO τελικά δεν σβήνει απ' την ακτινοβολία αλλά οι αισθητήρες που επηρεάστηκαν θα μπορούσαν να το οδηγήσουν σε σύγκρουση.

### 1.10 Δημοσίευση #10: Damage evaluation of microwave anti swarm attack based on scoring method [12]

Στο δημοσίευμα αυτό ερευνάτε η συμπεριφορά των πολλαπλών αισθητήρων ενός MEEO με την έκθεση τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, δοκιμάζεται αισθητήρας IMU (επιταχυνσιόμετρο/γυροσκόπια/μαγνητόμετρο), ο αισθητήρας πίεσης και το βαρόμετρο, ο αισθητήρας GPS και ο αισθητήρας αποφυγής εμποδίων.

Οι ηλεκτρονικοί αυτοί αισθητήρες δοκιμάστηκαν σε υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό (High Power Electromagnetic, HPEM), συχνότητας από 100 MHz έως 3.4 GHz. Ο παραγόμενος παλμός είναι CW και παλμικός με διάρκεια 1  $\mu$ s και συχνότητα επανάληψης παλμών 1 kHz.

Οι HPEM κυματομορφές μπορούν να επιδράσουν καταστρέφοντας εξαρτήματα από το hardware των MEEO. Ο άλλος τρόπος είναι να επηρεάσουν την λογική του συστήματος, δημιουργώντας σφάλματα στους αισθητήρες του συστήματος και να οδηγήσουν του MEEO σε πτώση.

Παρατηρήθηκε ότι σε ένταση πεδίου έως 10 V/m και σε συχνότητες 470-862 MHz και 1.4-2.7 GHz, οι αισθητήρες και τα υποσυστήματα του MEEO δεν επηρεάζονται σοβαρά. Με ένταση πεδίου έως

30 V/m και σε συχνότητες 80MHz-9.375 GHz πάλι δεν παρατηρήθηκε κάποια ιδιαίτερη επιρροή. Για ένταση πεδίου 100 V/m και σε συχνότητες 100 MHz - 2 GHz, παρουσιάστηκαν προβλήματα στον αισθητήρα θερμοκρασίας της μπαταρίας αλλά και στον αισθητήρα κατακόρυφης ταχύτητας, ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν οδήγησε σε απενεργοποίηση της συσκευής.

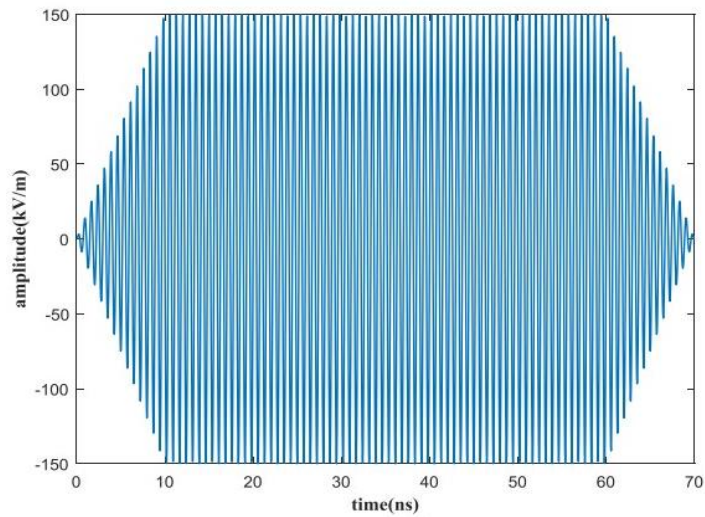
Τα αποτελέσματα των τεστ έδειξαν ότι ο μόνος αισθητήρας που επηρεάστηκε από το HPEM ήταν το μαγνητόμετρο. Οι μετρήσεις από τους άλλους αισθητήρες συμπεριλαμβανόμενων του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου δεν επηρεάστηκαν από την ακτινοβολία αλλά παρατηρήθηκαν απότομες αλλαγές στην ταχύτητα των κινητήρων του UAV. Αυτές οφείλονται οφείλεται σε διαταραχές του παλμικά διαμορφωμένο (PPM) σήμα ελέγχου των κινητήρων. Το PPM σήμα χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ των κινητήρων και του κυκλώματος ελέγχου πτήσης στο UAV. Το σήμα αυτό ελέγχει τους δύο απ' τους τέσσερις κινητήρες του UAV.

Το σήμα αυτό, για τους μπροστινούς κινητήρες επηρεάστηκε πολύ από τον HPEM pulse. Αντίθετα στους πίσω δεν υπήρξε κάποια επίδραση. Συνοψίζοντας, το κύριο αποτέλεσμα που παρατηρήθηκε είναι η επίδραση στο σήμα ελέγχου των κινητήρων. Αυτό οδηγεί σε απότομες αλλαγές των στροφών των κινητήρων που προκαλούν κραδασμούς, οι οποίοι με την σειρά τους επηρεάζουν το επιταχυνσιόμετρο και τις μετρήσεις του γυροσκοπίου. Ακόμα, η HPEM ακτινοβολία επηρεάζει άμεσα τις μετρήσεις του μαγνητόμετρου, όχι όμως το βαρόμετρο και τον αισθητήρα αποφυγής εμποδίων.

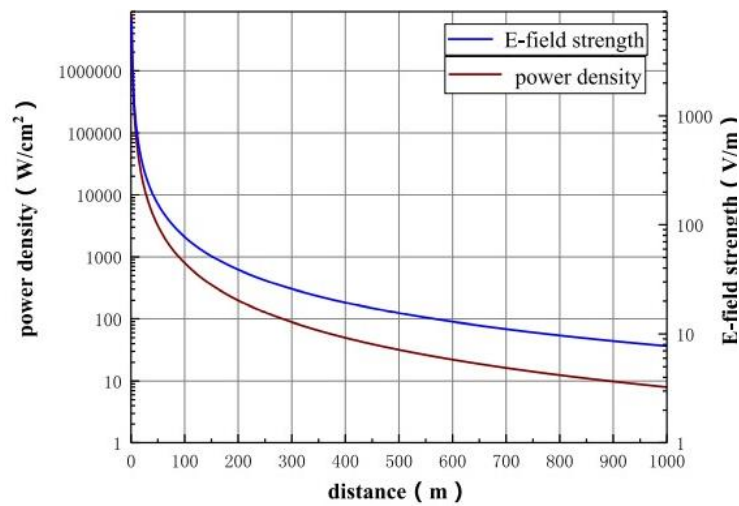
### **1.11 Δημοσίευση #11: Investigation on Effects of HPM Pulse on UAV's Datalink [13]**

Στο δημοσίευμα αυτό εξετάζεται η επίδραση της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στη ζεύξη δεδομένων ενός MEEO, το οποίο έχει ως χαρακτηριστικό την διαρκή αλλαγή της συχνότητας επικοινωνίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την τεχνική frequency hopping, με περίοδο 300 μs.

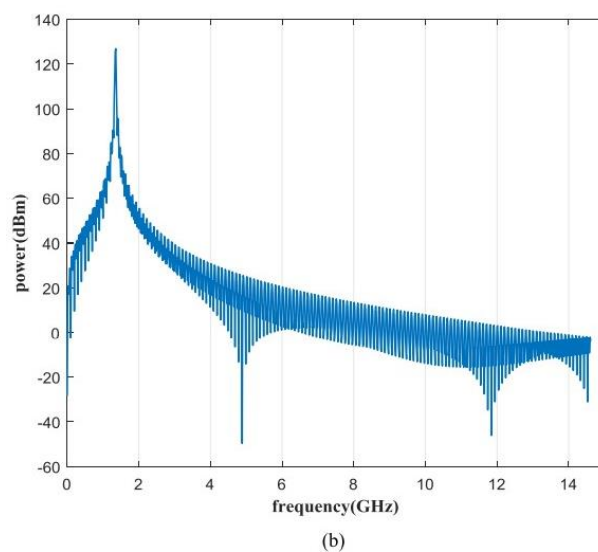
Στα πειράματα χρησιμοποιούνται High Power Microwave (HPM) παλμοί, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μικρό εύρος ζώνης, πολύ μικρό χρόνο ανόδου και υψηλή ισχύ κορυφής με συχνότητα φέροντος 1.35 GHz. Χρησιμοποιείται μονός παλμός με μέγιστη ένταση πεδίου, 150 kV/m. Η διάρκεια του παλμού είναι 50 ns, το PRF είναι 10 Hz έως 1 KHz και χρόνος ανόδου-καθόδου είναι ίσος με 10 ns. Ο εκάστοτε παλμός στέλνεται ανά 20 μs και η εκπεμπόμενη ισχύς είναι 10 GW.



Εικόνα 1.4 Το πλάτος των παλμών σε συνάρτηση με το χρόνο [13].



Εικόνα 1.5 Πυκνότητας ισχύος και της έντασης του πεδίου, σε συνάρτηση με την απόσταση [13].



Εικόνα 1.6 Γράφημα της εκπεμπόμενης ισχύος, ανάλογα με την συχνότητα εκπομπής [13].

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων, έδειξαν ότι η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί εύκολα να εισέλθει στον δέκτη του MEEO ως front door παρεμβολή όταν η συχνότητα του φέροντος του HPM συμπίπτει με την συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης δεδομένων. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη ζημία. Ωστόσο όταν η συχνότητα του φέροντος του HPM διαφέρει από την συχνότητα της ζεύξης δεδομένων, η παρεμβολή εισέρχεται από την μερικώς θωρακισμένη γραμμή τροφοδοσίας ως backdoor coupling και δημιουργεί υψηλής τάσεως σήμα στη θύρα τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χάνεται η σύνδεση ή να μην μπορεί να λειτουργήσει το datalink καθώς δέχεται μη αναμενόμενη παροχή ισχύος. Πιο αναλυτικά φαίνονται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 1.9.

Πίνακας 1.9 Αναλυτικά αποτελέσματα του εκάστοτε πειράματος, μαζί με τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας, ανά πείραμα [13].

<b>Bands</b>	<b>Power Density (W/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>PRF (Hz)</b>	<b>Duration (s)</b>	<b>Pulse width (ns)</b>	<b>Effects</b>
C-band	100	50	3	200	None
S-band	100	50	3	200	None
L-band	5	1	1	100	Transient lost-link
	10	1	1	100	Transient lost-link
	20	1	1	100	Transient lost-link
	30	1	1	100	Transient lost-link
	30	1	1	200	Transient lost-link
	30	10	1	200	Transient lost-link
	30	10	3	100	Transient lost-link for a longer time
	40	1	1	100	Transient lost-link
	50	1	1	100	Transient lost-link
	50	10	1	100	Lost link and cannot be recovered until the UAV's datalink is re-powered
Όπου, S band >2 GHz, C band 5-6 GHz, L band 1- 2 GHz.					

Συγκριμένα, οι παλμοί HPM στις μάντες C και S με πυκνότητα ισχύος 100 W/cm<sup>2</sup> δεν μπορούν να επηρεάσουν την κανονική λειτουργία της ζεύξης δεδομένων, ακόμη και όταν το PRF αυξηθεί στα 50 Hz, δηλαδή σε 50 παλμούς το δευτερόλεπτο με διάρκεια ακτινοβολίας στα 3 sec.

Ο μονός παλμός HPM με πλάτος 100 ns στην L ζώνη συχνοτήτων και πυκνότητα ισχύος 5 έως 30 W/cm<sup>2</sup>, δημιουργεί περιστασιακή απώλεια σύνδεσης. Η αύξηση του PRF και του πλάτους του παλμού δεν φέρνει κάποιο διαφορετικό αποτέλεσμα. Όμως η αύξηση της διάρκειας των παλμών, αυξάνει το χρόνο που δεν υπάρχει σύνδεση. Όταν ο παλμός σταματήσει, η επικοινωνία επανέρχεται.

Όταν η πυκνότητα ισχύος φτάσει τα 50 W/cm<sup>2</sup> και το PRF είναι 10 Hz, ενώ η ακτινοβολία έχει διάρκεια 3 sec, τότε η ζεύξη παύει να λειτουργεί και επανέρχεται μόνο με επανεκκίνηση του συστήματος.

Η επίδραση που προέκυψε, προέρχεται από το γεγονός ότι η backdoor παρεμβολή στο τροφοδοτικό του πομπού του MEEO οδηγεί σε απώλεια του καναλιού επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, έγινε η υπόθεση ότι η θύρα τροφοδοσίας εισάγει την ακτινοβολία, καθώς είναι κακά θωρακισμένη και δεν είναι καλά γειωμένη. Γι' αυτό θωρακίσθηκε η θύρα τροφοδοσίας και προέκυψε ότι μετά από την προσθήκη της προστασίας δεν υπήρξε ξανά απώλεια της ζεύξης, οπότε εκτιμήθηκε ότι ευθυνόταν η θύρα τροφοδοσίας.

Το βασικό συμπέρασμα που εξάχθηκε με την πειραματική διαδικασία είναι ότι η ζεύξη δεδομένων του MEEO είναι ευάλωτο σε HPM παλμούς. Επίσης, όταν η φέρουσα συχνότητα του HPM παλμού είναι μακριά από την συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης του MEEO, τότε η σύζευξη είναι backdoor. Εκτιμάται ότι η γραμμή τροφοδοσίας εισάγει την παρεμβολή στο MEEO, προκαλώντας μη φυσιολογική παροχή ενέργειας στην μονάδα επικοινωνίας και προκαλώντας διακοπή της σύνδεσης επικοινωνίας. Ακόμα, μπορεί να υπάρξει λειτουργική βλάβη στο data link όταν το UAV βομβαρδίζεται από πολλαπλούς παλμούς HPM και για να επανέλθει, χρειάζεται επανεκκίνηση.

Στην περίπτωση που η φέρουσα συχνότητα συμπίπτει με την συχνότητα λειτουργίας του καναλιού επικοινωνίας, η υψηλή τάση ή το υψηλό ρεύμα που δημιουργούνται οδηγούν το RF δέκτη σε υπέρταση. Αν η επίδραση αυτή είναι συσσωρευμένη και διαρκής, τότε οι ημιαγωγοί φτάνουν σε σημείο τήξης και το σύστημα επικοινωνίας καταστρέφεται ή παθαίνει ζημία.



## 1.12 Βασικά συμπεράσματα των δημοσιεύσεων

Στην υπό-ενότητα αυτή αναγράφονται, συγκεντρωμένα, τα πιο βασικά συμπεράσματα των δημοσιεύσεων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο . Τα συμπεράσματα αυτά που επιλέχθηκαν να αναγραφούν, έχουν την πιο άμεση σχέση με το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- Οι μικροελεγκτές (microcontrollers), επηρεάζονται από UWB και EMP παλμούς, καθώς επηρεάζονται τα διαφορετικά είδη γραμμών, στο εσωτερικό τους, εμφανίζοντας ωστόσο διαφορετικά σφάλματα, ανάλογα με το είδος. Επιπρόσθετα και το μήκος των γραμμών, είναι παράγοντας που επηρεάζει το είδος σφάλματος που προκύπτει. Οι γραμμές χρονισμού δεν εμφάνισαν διαταραχές. Η επίδραση ποικίλει ανάλογα και με το είδος του παλμού, καθώς οι παλμοί UWB έχουν μεγάλη ενέργεια στις συχνότητες 100 MHz-1GHz και για αυτό παρατηρούνται φαινόμενα σοβαρών διαταραχών.
- Οι UWB παλμοί έχουν αρκετή ενέργεια για να καταστρέψουν chip. Όσο πιο πολύπλοκη είναι μια συσκευή, τόσο περισσότερη ισχύς ακτινοβολούμενου πεδίου χρειάζεται για να επηρεαστεί.
- Η υψηλών συχνοτήτων παρεμβολή σε συνδυασμό με την υψηλή τάση που δημιουργείται στα καλώδια από παλμούς HPM και UWB επιφέρει μη γραμμικές συμπεριφορές. Προκαλούνται έτσι παρεμβολές στα χρήσιμα και λειτουργικά αναγκαία σήματα στο εσωτερικό της συσκευής, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση του συστήματος. Σε πιο μεγάλες τιμές πεδίου οι παραπάνω παλμοί είναι ικανοί να δημιουργήσουν τόσο μεγάλη τάση στα κυκλώματα που καταστρέφονται τα εξαρτήματα τους.
- Ένα MEEO που δοκιμάστηκε, στις τηλεοπτικές και ISM συχνότητες 470-862 MHz, 1.4-2.7 GHz με ένταση CW πεδίου 10 V/m, μπορούσε να συνεχίσει να πετάει και να ελέγχεται κανονικά. Το μόνο σύστημα που επηρεάστηκε είναι το GPS, στο φάσμα 1.4 GHz έως 2.7 GHz, όπου χανόταν το σήμα του GPS και έτσι δεν ήταν δυνατή η αυτόνομη πτήση του.
- Οι ακτινοβολίες με παλμούς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή συχνότητα επανάληψης, προκαλούν προβλήματα στην επικοινωνία τηλεχειριστηρίου-MEEO. Το σήμα απ' το χειριστήριο χάνεται ή δεν υπάρχει ανταπόκριση στις εντολές απ' το χειριστήριο ή δεν έρχεται εικόνα στο χειριστήριο και το MEEO οδηγείται σε αναγκαστική προσγείωση. Η κατάσταση δεν είναι αναστρέψιμη μετά το πέρας της ακτινοβολίας- απαιτείται χειροκίνητη επαναφορά του χειριστηρίου.
- Σε άλλες περιπτώσεις έκθεσης σε ακτινοβολία , δεχόμενο παλμούς με μεγάλη συχνότητα επανάληψης παλμών, το MEEO αποσυνδέεται αλλά η κατάσταση είναι αναστρέψιμη μετά το πέρας της ακτινοβολίας, καθώς το UAV λειτουργεί και πάλι κανονικά..

- Όσο μεγαλύτερη χωρητικότητα και συχνότητα λειτουργίας έχει ο επεξεργαστής μια συσκευής τόσο πιο δύσκολα επηρεάζεται από παλμούς HPM. Ακόμα, η εκπομπή τέτοιου παλμού, στην ζώνη λειτουργίας μια συσκευής, μπορεί κάψει τα εσωτερικά κυκλώματα, και να τα καταστήσει ανίκανα για περαιτέρω λειτουργία.
- Οι υπολογιστές, όσο νεότερης τεχνολογίας είναι τόσο μεγαλύτερη ατρωσία έχουν απέναντι σε ακτινοβολούμενους HPM παλμούς, στις συχνότητες 1-4 GHz. Τα σφάλματα που εμφανίστηκαν, μετά από επανεκκίνηση χάνονταν, ωστόσο με ισχύ πεδίου 15-20 kV/m παρουσιάστηκαν μόνιμες βλάβες.
- Σε μια παρεμβολή όταν το εκπεμπόμενο συνεχές σήμα παρεμβολής έχει την ίδια συχνότητα με το σήμα εκπεμπόμενο από το χειριστήριο του UAV, τότε ακόμα και το σήμα χαμηλής ισχύος -130 dBm, επηρεάζει το ζεύξη επικοινωνίας του MEE0. Άρα όταν το σήμα παρεμβολής είναι αδύναμο, ή όταν η συχνότητα είναι μακριά από την συχνότητα λειτουργίας του MEE0, δεν μπορεί να επηρεαστεί η ζεύξη επικοινωνίας.
- Ένα MEE0 που δοκιμάστηκε σε CW ακτινοβολία σε συχνότητες 100 MHz-2 GHz και παλμικές κυματομορφές, με συχνότητες επανάληψης 1 Hz – 20 KHz, εμφάνισε επιρροή σε πολλαπλούς αισθητήρες, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την σωστή πτήση τους.
- MEE0 δοκιμάστηκε σε υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό (HPEM), συχνότητας από 100 MHz έως 3.4 GHz και παρατηρήθηκε σημαντική επίδραση στο σήμα ελέγχου των κινητήρων, κάτι που δημιούργησε απότομες αυξομειώσεις στροφές τους, δημιουργώντας έτσι κραδασμούς στο MEE0. Οι κραδασμοί αυτοί επηρέασαν τις μετρήσεις πολλών αισθητήρων τους.
- Σε πειράματα που έγινε χρήση High Power Microwave (HPM) παλμών, με συχνότητα φέροντος 1.35 GHz, για την ακτινοβολία MEE0. Προέκυψε το συμπέρασμα ότι η ζεύξη επικοινωνίας του MEE0 είναι ευάλωτο σε τέτοιους παλμούς. Όταν η φέρουσα συχνότητα του HPM παλμού είναι μακριά από την συχνότητα λειτουργίας, τότε η γραμμή τροφοδοσίας αποτελεί σημείο σύζευξης των παρεμβολών. Μπορεί να υπάρξει λειτουργική βλάβη στη ζεύξη επικοινωνίας και για να επανέλθει, χρειάζεται επανεκκίνηση.

## **2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πειράματα Ελέγχου Ατρωσίας Μη Επανδρωμένων**

### **Εναέριων Οχημάτων**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν σε Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (MEEO) προκειμένου να ελεγχθεί η ατρωσία τους έναντι ακτινοβολούμενων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Πρόκειται για πειράματα εκπομπής ακτινοβολίας προς τα MEEO, χρησιμοποιώντας παλμικές κυματομορφές με φέρουσες συχνότητες από 200 MHz έως 1000 MHz. Οι κύριες υποενότητες του παρόντος κεφαλαίου είναι οι εξής: η υποενότητα 3.1, όπου περιγράφονται τα όργανα μέτρησης και εξοπλισμός, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων, η μεταξύ τους συνδέσεις καθώς και η τοπολογία των πειραμάτων. Στην συνέχεια, η υποενότητα 3.2 περιγράφει την γενική μεθοδολογία, η οποία υιοθετήθηκε στα πειράματα καθώς και οι διαδικασίες διακρίβωσης, οι οποίες εφαρμόστηκαν. Τέλος, στην υποενότητα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από τα πειράματα, ενώ στην υποενότητα 3.4 περιγράφονται σύντομα τα συμπεράσματα από τον πειραματικό έλεγχο των MEEO.

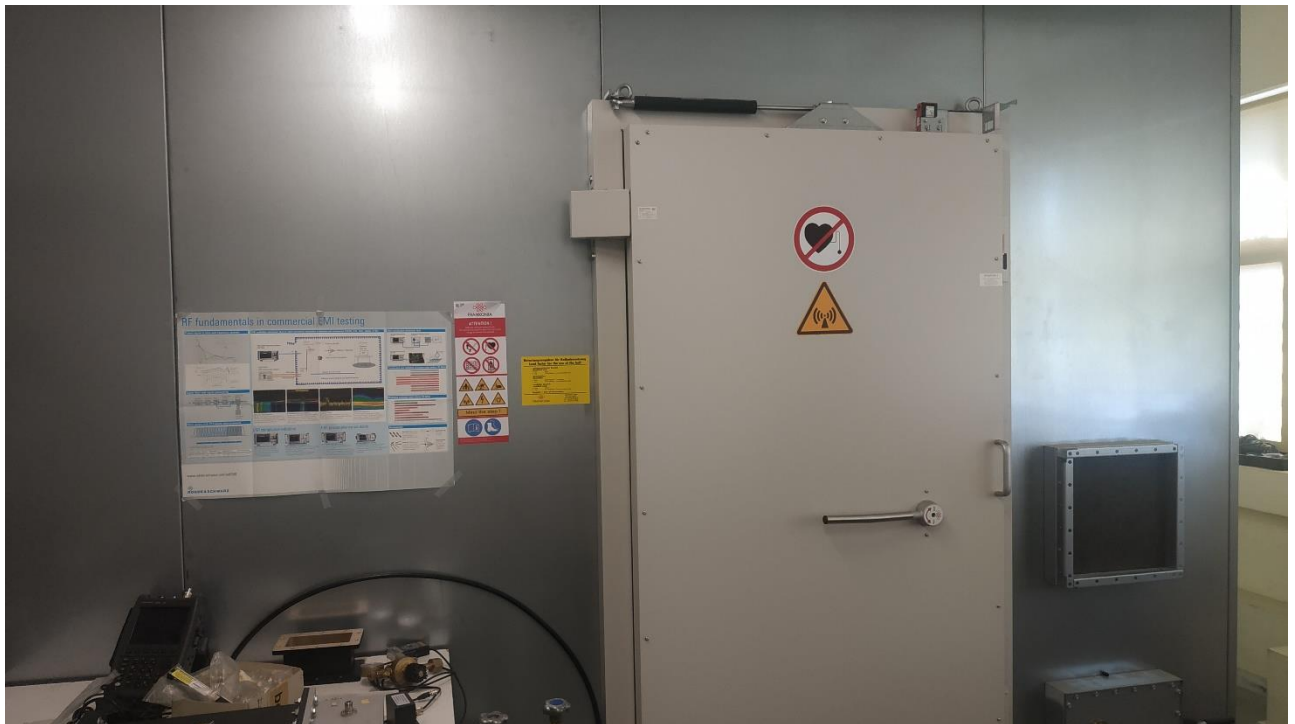
#### **2.1 Εργαστηριακή Τοπολογία**

Για την υλοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός και μετρητικά όργανα του Ερευνητικού Εργαστηρίου “Ασύρματων-Οπτικών Διατάξεων και Δικτύων Επικοινωνιών”. Τα πειράματα ακτινοβολίας των MEEO πραγματοποιήθηκαν εντός ημι-ανηχοϊκού θαλάμου (semi-anechoic chamber). Σε ότι αφορά τον εξοπλισμό χρησιμοποιήθηκε μία RF γεννήτρια χαμηλής ισχύος, ένας ενισχυτής υψηλής ισχύος, μία χοανοκεραία, δύο διαφορετικά εμπορικά MEEO καθώς και τα απαραίτητα ομοαξονικά καλώδια για τις διασυνδέσεις των επιμέρους συσκευών. Σε ότι αφορά τα μετρητικά όργανα χρησιμοποιήθηκε ένα πεδιόμετρο ένα πεδιόμετρο καθώς και ένας διανυσματικός αναλυτής δικτύου (Vector Network Analyzer, VNA). Λεπτομέρειες για τα ειδικά χαρακτηριστικά των υποδομών, των οργάνων μέτρησης και του εξοπλισμού παρατίθενται στις ακόλουθες υποενότητες.

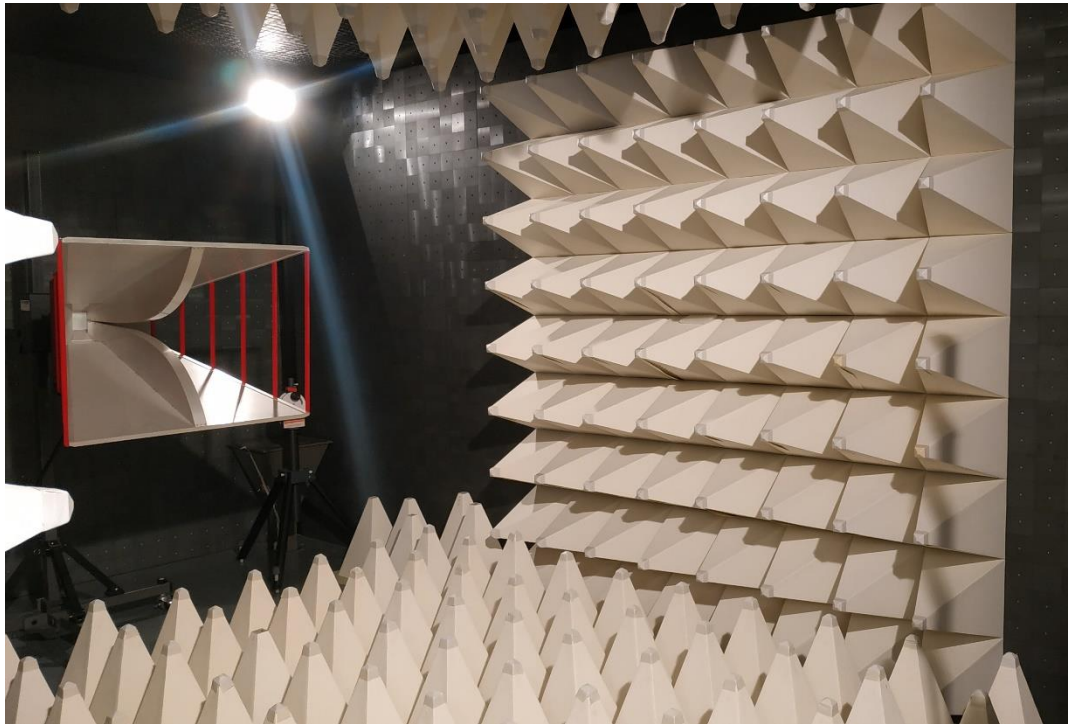
##### **2.1.1 Ημι-Ανηχοϊκός Θάλαμος**

Τα πειράματα έγιναν εντός ημι-ανηχοϊκού θαλάμου, ο οποίος βρίσκεται στο κτήριο ZB του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠΑΔΑ), στην Πανεπιστημιούπολη 2 και στην αίθουσα ZB003. Ο θάλαμος είναι της εταιρείας FRANKONIA και κατασκευάστηκε το 2015. Έχει διαστάσεις ( Μήκος x Πλάτος x Ύψος) 7.3m x 3.7m x 3.2m και είναι πιστοποιημένος για λειτουργία σε ένα εύρος συχνοτήτων από 30 MHz έως 18 GHz. Ο ανηχοϊκός

Ο θάλαμος έχει σχεδιαστεί αφενός έτσι ώστε να απορροφά πλήρως τις ανακλάσεις των ακτινοβολούμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή προσομοιώνει τον ελεύθερο χώρο, και αφετέρου έτσι ώστε να μην επιτρέπει στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα από το εξωτερικό περιβάλλον να διεισδύσουν εντός του. Η απομόνωση από το εξωτερικό περιβάλλον κατά κύριο λόγο επιτυγχάνεται μέσω μεταλλικής επένδυσης ικανού πάχους σε όλες τις εξωτερικές πλευρές του. Σε ότι αφορά τον εσωτερικό χώρο και την προσπάθεια μείωσης των ανακλάσεων υπάρχει επένδυση με φερριτικά πλακίδια των τοίχων και σε ένα μέρος του πατώματος, τα οποία έχουν την ιδιότητα να απορροφούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η πόρτα του θαλάμου έχει επένδυση από αυτά τα πλακίδια, και σφραγίζει πολύ καλά, με την χρήση ειδικού μοχλού. Επιπρόσθετα, για την περαιτέρω απορρόφηση των κυμάτων και την καλύτερη προσομοίωση του ελευθέρου χώρου, όλες οι επιφάνειες του θαλάμου μπροστά από την κεραία, είναι επενδυμένες με κώνους, οι οποίοι έχουν συγκεκριμένη κλίση στις πλευρές τους για να μην επιτρέπουν στο κύμα να ανακλάται κατευθυντικά (specular reflection). Οι κώνοι αυτοί υπάρχουν και στο δάπεδο, όμως η θέση τους μπορεί να αλλάξει, ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος. Ο θάλαμος διαθέτει δύο πάνελ εισόδων/ εξόδων, τα οποία χρησιμοποιούνται για να περνάνε καλώδια από το εσωτερικό στο εξωτερικό του θαλάμου και αντίστροφα, χωρίς να χάνει ο θάλαμος την αηχοϊκή ικανότητα του. Στο πάνελ αυτό βρίσκονται συνδετήρες N-type και BNC αλλά μπορεί και ο χρήστης να τοποθετήσει κάποιον δικό του με χρήση κατάλληλου προσαρμογέα. Στις Εικόνες 2.1 – 2.3 παρουσιάζονται ορισμένες λεπτομέρειες από την εξωτερική και την εσωτερική άποψη του θαλάμου.



Εικόνα 2.1 Εξωτερική άποψη του θαλάμου.



Εικόνα 2.2 Εσωτερική άποψη του θαλάμου.



Εικόνα 2.3 Πάνελ διασύνδεσης καλωδίων του θαλάμου (εξωτερική άποψη).

### 2.1.2 Καλώδια

Στα πειράματα για την μετάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος από την γεννήτρια, στον ενισχυτή, και στην συνέχεια στην κεραία εντός του ημι-ανηχοϊκού χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ομοαξονικά καλώδια. Για τις παραπάνω συνδέσεις χρησιμοποιήθηκαν ομοαξονικά καλώδια τύπου N-type της Rosenberger (LU7-142-8000), τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν σε συχνότητες έως 12 GHz [14]. Τα καλώδια, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν έχουν μήκος επτά μέτρων και διαμέτρου κεντρικού αγωγού 1.4 mm, ενώ εμφανίζουν εμπέδηση 50 Ohm σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Στην Εικόνα 2.4 απεικονίζεται ένα από τα καλώδια, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Εικόνα 2.4 Το καλώδιο LU7-142-8000.

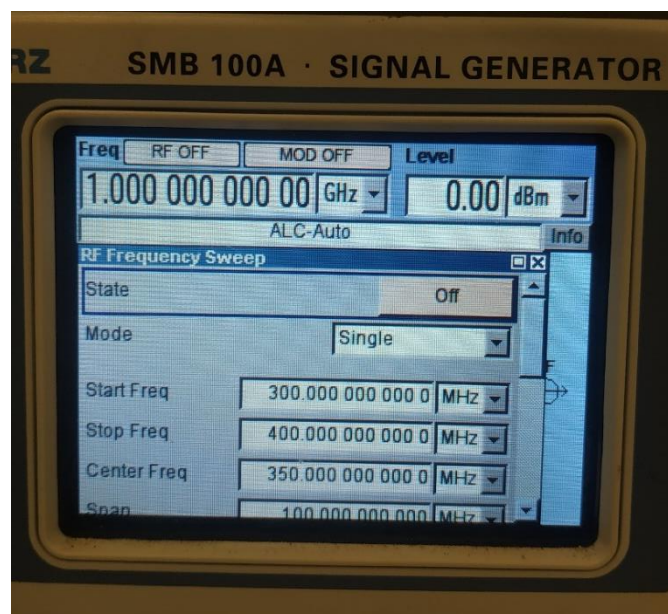
### 2.1.3 Γεννήτρια

Η γεννήτρια του εργαστηρίου, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα είναι της εταιρείας ROHDE&SCHWARZ, της σειράς R&S®SMB100A και συγκεκριμένα το μοντέλο R&S SMB-B106 [15]. Πρόκειται για μια αναλογική γεννήτρια RF σήματος, με ένα κανάλι εξόδου, η οποία μπορεί να εξάγει σήμα σε συχνότητες από 9 kHz έως 6 GHz. Εξάγει σήμα ισχύος από – 145 dBm έως 30 dBm. Μπορεί να κάνει διαμόρφωση πλάτους (AM), διαμόρφωση συχνότητας(FM), παλμική διαμόρφωση (PM) και διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM). Ακόμα, διαθέτει λειτουργία frequency sweep, όπου ο χρήστης εισάγει την αρχική, την τελική συχνότητα, το βήμα και το χρόνο παραμονής σε κάθε συχνότητα, και η γεννήτρια εκπέμπει στο επιλεγμένο φάσμα συχνοτήτων, χωρίς να χρειάζεται ο χρήστης να επιλέγει την κάθε μεμονωμένη συχνότητα. Η γεννήτρια έχει την δυνατότητα ελέγχου εξ αποστάσεως, μέσω του διαδικτύου. Ένα εργαλείο πολύ χρήσιμο, καθώς προστατεύει τον χρήστη από ανεπιθύμητη επαφή με ακτινοβολία. Πιο αναλυτικές πληροφορίες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας δίνονται στον Πίνακα 3.1. Στην Εικόνα 3.5 (α) απεικονίζεται η γεννήτρια, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική μελέτη, ενώ στην Εικόνα 3.5 (β) παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό στιγμιότυπο από το μενού χειρισμού της.

Πίνακας 2.1 Αναλυτικές πληροφορίες για την γεννήτρια R&S SMB-B106.

<b>R&amp;S SMB-B106</b>	
<b>Είδος</b>	Αναλογική γεννήτρια σήματος, RF signal source
<b>Τύπος εξοπλισμού</b>	Benchtop
<b>Χειρισμός</b>	Μπροστινός πίνακας χειρισμού με πλήκτρα
<b>Συχνότητα</b>	9 kHz - 6 GHz
<b>Ισχύς εξόδου</b>	-145 dBm to 30 dBm
<b>Αριθμός καναλιών</b>	1 κανάλι
<b>Phase noise</b>	10 MHz
<b>Interval frequency</b>	< 2.5 ms
<b>Frequency setting time</b>	< 2.5 ms
<b>Setting time</b>	10 MHz
<b>Output Reference Frequency</b>	90 V to 264 V, 45 Hz to 66 Hz, 380 Hz to 440 Hz, 1.4 A (100 V) to 0.6 A (240 V)





Εικόνα 2.5 (α) Η γεννήτρια R&S SMB-B106 (β) Το μενού της R&S SMB-B106 στη διαδικασία frequency sweep.

#### 2.1.4 Ενισχυτής

Για την ενίσχυση του σήματος, το οποίο εξάγεται από την γεννήτρια RF χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής ισχύος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο RF ενισχυτής ισχύος της εταιρείας OPHIR και ειδικότερα το μοντέλο 5225 [16]. Ο ενισχυτής χαρακτηρίζεται από ελάχιστη ισχύ εξόδου 200 Watt σε ένα εύρος συχνοτήτων 80 MHz - 1 GHz. Οι βασικές τεχνικές προδιαγραφές του ενισχυτή παρατίθενται στον Πίνακα 2.2.



Πίνακας 2.2 Αναλυτικές πληροφορίες για τον ενισχυτή OPHIR<sub>RF</sub> 5225.

OPHIR <sub>RF</sub> 5225	
Frequency Ronger	80 – 1000 MHz
Saturated Output Power	200 Watts typical
Power at P1dB	120 Watts Minimum
Small signal gain	+54 dB Minimum
Gain flatness	± 2.5 dB Maximum
IP3	+ 59 dBm typical
Input VSWR	2:1 max
Input / Output impedance	500 Ohms nominal
AC input	100 – 240 VAC, single phase
RF input	0 dBm max
RF input signal format	CW, AM, FM , PM, Pulse
Class of Operation	Class A
Dimensions	48.26 cm x 13.33 cm x 53.54cm
RF Connectors	N-type
Cooling	Internal Forced Air



Εικόνα 2.6 Ο ενισχυτής OPHIR<sub>RF</sub> 5225.

### 2.1.5 Κεραία

Για την εκπομπή του σήματος χρησιμοποιήθηκε η κεραία της εταιρείας ETS- Lindgren, το μοντέλο 3106 B [17], [18]. Πρόκειται για μια κατευθυντική κεραία, η οποία έχει τη δυνατότητα χειρισμού σημάτων εισόδου σχετικά μεγάλης ισχύος και κατ' επέκταση έχει τη δυνατότητα εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδία υψηλής έντασης. Δεδομένου ότι η χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας τοποθετείται στα 200 MHz έχει σχετικά μεγάλο μέγεθος, καθώς έχει 93.3 cm μήκος, αλλά το βάρος της είναι 11.8 kg. Είναι πολύ ανθεκτική στις καιρικές συνθήκες, καθώς είναι φτιαγμένη από αλουμίνιο, και άλλωστε για αυτόν το λόγο είναι τόσο ελαφριά. Μπορεί να αντέξει στιγμιαία ισχύ 1 MW και συνεχή ισχύ 800 W. Στη θύρα εισόδου έχει ένα 7-16 θηλυκό συνδετήρα, ο οποίος ενδείκνυται για το χειρισμό σημάτων υψηλής ισχύος. Οι βασικές τεχνικές προδιαγραφές της κεραίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3. Στις Εικόνες 2.7 και 2.8 απεικονίζεται η κεραία, η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, ενώ στην Εικόνα 2.9 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα κέρδους για τον συγκεκριμένο τύπο κεραίας.

Πίνακας 2.3 Αναλυτικές πληροφορίες για την κεραία ETS 3106 B [17],[18].

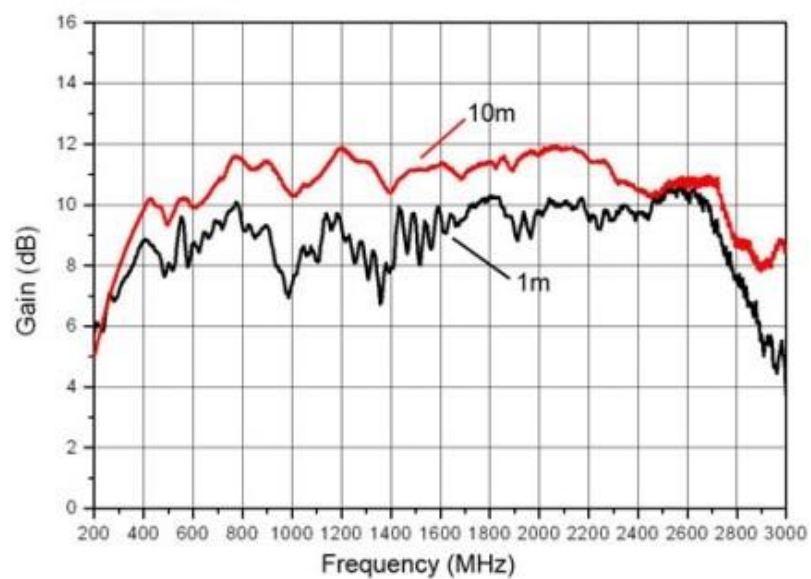
ETS- Lindgren 3106 B	
<b>Minimum Frequency</b>	200 MHz
<b>Maximum Frequency</b>	2.5 GHz
<b>Impedance</b>	50 Ω
<b>VSWR</b>	< 1.6:1
<b>Polarization</b>	Linear
<b>Power Rating</b>	< 300 MHz → 1.6 kW , 300 MHz to 1 GHz → 800W, 1 GHz to 2.5 GHz → 500 W



Εικόνα 2.7 Η κεραία ETS 3106B.



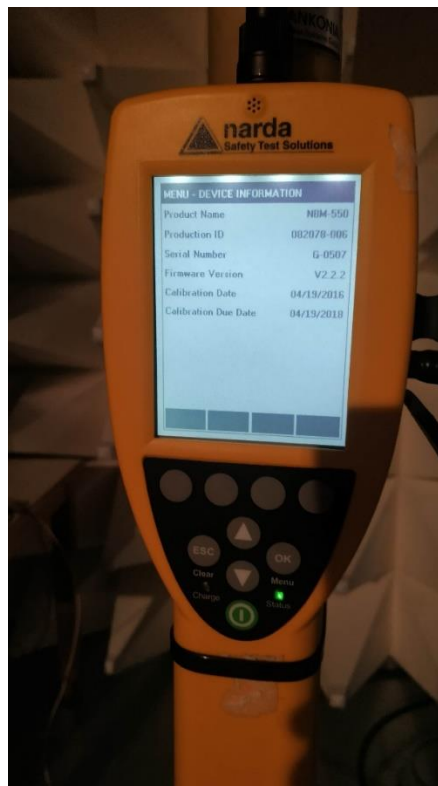
Εικόνα 2.8 Πλάγια όψη της κεραίας ETS 3106B.



Εικόνα 2.9 Το κέρδος της κεραίας ανάλογα την συχνότητα [18].

### 2.1.6 Πεδιόμετρο

Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε πεδιόμετρο, ώστε να γίνεται μέτρηση της τιμής του εκπεμπόμενου πεδίου, το οποίο προσπίπτει στα υπό έλεγχο MEEO. Επίσης, η χρήση του πεδιομέτρου χρησιμοποιήθηκε και για να ελέγχεται αν η κεραία εκπομπής έχει πάψει να εκπέμπει, ώστε να εισέλθει το προσωπικό στο θάλαμο με ασφάλεια. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το πεδιόμετρο της εταιρείας Narda και συγκεκριμένα το μοντέλο NBM-550 [19]. Είναι εξοπλισμένο με 9V επαναφορτιζόμενη μπαταρία και μπορεί να συκρατήσει στην μνήμη έως και 5000 μετρήσεις. Ακόμη οι μετρήσεις του μπορούν να αποτυπώνονται σε ζωντανό χρόνο, σε υπολογιστή, με σύνδεση του πεδιομέτρου στον υπολογιστή με οπτική ίνα και χρήση του προγράμματος NMB-TS της κατασκευάστριας εταιρείας. Ως κεραία λήψης στο πεδιόμετρο έχει συνδεθεί ο αισθητήρας (probe) EF1891 [20], το οποίο είναι ικανό να μετρήσει: από 3 MHz έως 18 GHz πεδία με ένταση ηλεκτρικού πεδίου από 0.6 έως 1000 V/m για συνεχές κύμα και από 0.6 έως 35 V/m μετρώντας σε επίπεδο RMS τιμών. Τέλος, έχει δυναμικό εύρος 64 dB. Στην Εικόνα 2.10 απεικονίζεται το πεδιόμετρο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Εικόνα 2.10 Το πεδιόμετρο, NBM-550, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

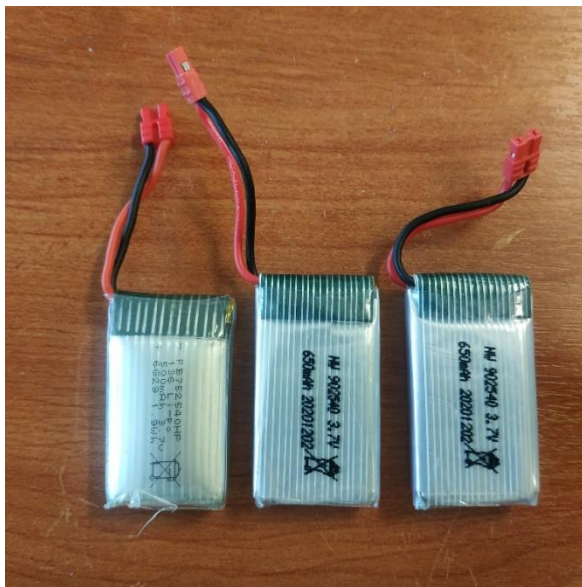
### 2.1.7 Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου

Ο διανυσματικός αναλυτής δικτύου ή στα αγγλικά vector network analyzer (VNA), είναι μια συσκευή η οποία εκπέμπει ένα σήμα με χαρακτηριστικά που γνωρίζει και μετράει το πλάτος και την φάση της του σήματος αυτού, χρησιμοποιώντας s-παραμέτρους, αφού έχει περάσει από τα διάφορα στοιχεία του δικτύου, κάνοντας έτσι την σύγκριση του εκπεμπόμενου με το λαμβανόμενο σήμα. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο VNA της εταιρείας ROHDE&SCHWARZ και συγκεκριμένα το μοντέλο R&S ZVA24 [21]. Ο συγκεκριμένος μπορεί να μετρήσει σε συχνότητες από 10 MHz έως 24 GHz, με ακρίβεια μικρότερη του 1 dB σε συχνότητες από 50 MHz έως 13 GHz. Έχει δυναμικό εύρος για συχνότητες 10 MHz-13 GHz, από -30 dBm έως 13 dBm.

### 2.1.8 Υπό Έλεγχο MEEO

Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα, προκειμένου να εξαχθούν περισσότερα αποτελέσματα και να βρεθούν κοινά σημεία αν υπάρχουν, μεταξύ διαφορετικών οχημάτων. Σ' αυτή την υποενότητα θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των δύο MEEO τα οποία ελέγχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το πρώτο MEEO, τα οποίο χρησιμοποιήθηκε στα τεστ είναι το Syma X5HW [22], [23] , το οποίο είναι το πλέον οικονομικό από τα δύο MEEO καθώς κοστίζει 80 €. Πρόκειται για ένα MEEO φιλικό προς τον χρήστη, καθώς είναι εύκολο στην χρήση και προτείνεται για αρχάριους. Το SYMA έρχεται από το εργοστάσιο με μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία Li-Po στα 3.7 V με χωρητικότητα 600mAh. Το Syma με αυτή την μπαταρία μπορεί να λειτουργήσει στον αέρα 16 λεπτά. Δεδομένου ότι ο χρόνος αυτός δεν είναι αρκετός για εκτενή πειράματα, υπήρξε προμήθεια δύο επιπλέον μπαταριών Li-Po 3.7 V, με χωρητικότητα όμως 1200 mAh, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες των πειραμάτων (Εικόνα 3.11). Οι μπαταρίες Li-Po έχουν ως θετικό ότι μπορούν να αποδώσουν τον αποθηκευμένο φορτίο τους καλύτερα από τις μπαταρίες Li-Ion, καθώς έχουν μικρότερη εσωτερική αντίσταση. Το MEEO διαθέτει διακόπτη ON - OFF για τον έλεγχο λειτουργίας του.



Εικόνα 2.11 Οι τρεις μπαταρίες του Syma.

Το X5HW ελέγχεται με το χειριστήριο, το οποίο περιέχεται στην συσκευασία, ενώ η εικόνα που βιντεοσκοπεί η κάμερα του Syma στέλνεται ασύρματα στο κινητό του χρήστη, εφόσον το συνδέσει με την συσκευή. Ωστόσο, δεν εξετάστηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων αυτή η λειτουργία. Ουσιαστικά, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν ενεργό μόνο το χειριστήριο για τον έλεγχο της πτήσης του MEEO.

Το χειριστήριο τροφοδοτείται με τέσσερις μπαταρίες 1.5 V AA και εκπέμπει και λαμβάνει στα 2.4 GHz, με δυνατότητα λειτουργίας σε ένα εύρος ζώνης 27-72 MHz γύρω από την κεντρική συχνότητα των 2.4 GHz. Η μέγιστη απόσταση επικοινωνίας του χειριστηρίου χωρίς να χαθεί η επαφή είναι τα 30 με 50 μέτρα. Είναι φτιαγμένο εξολοκλήρου από πλαστικό. Το Syma και το χειριστήριο για να συνδεθούν χρειάζεται να πραγματοποιήσει ο χρήστης μια διαδικασία διασύνδεσης ( pairing ).

Το Syma είναι επίσης φτιαγμένο αποκλειστικά από πλαστικό και έχει μικρές διαστάσεις. Οι διαστάσεις του είναι 33x33x11 cm. Ο συνδυασμός αυτός το κάνει εξαιρετικά ελαφρύ, έχει βάρος 703 γραμμάρια. Διαθέτει τέσσερα LED φωτάκια στο κάτω μέρος του, δύο πράσινα στους πρόσθιους βραχίονες και δύο κόκκινα στους πίσω μέρος, ώστε να βοηθάει τον χρήστη να κατανοεί την κατεύθυνση κίνησης του MEEO. Το MEEO διαθέτει αισθητήρα υψομέτρου και γυροσκόπιο. Έχει την δυνατότητα του Headless Mode, δηλαδή να μένει οριζόντιο όσο πετάει, χωρίς να απαιτεί εντολές από τον χρήστη. Επίσης, μπορεί να κλειδώσει ένα υψόμετρο και να πετάει μόνο σ' αυτό, μετά από εντολή του χρήστη. Το Syma MEEO και το χειριστήριό του απεικονίζονται στις Εικόνες 2.12 και 2.13, αντίστοιχα.





Εικόνα 2.12 Το drone Syma X5HW.



Εικόνα 2.13 Το χειριστήριο του Syma X5HW

Το δεύτερο ΜΕΕΟ, το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το Nova Pro [24], της εταιρείας Quantum. Είναι πιο ακριβό από το Syma, καθώς κοστίζει 308 €, χωρίς να περιλαμβάνονται οι μπαταρίες στην συσκευασία. Η μπαταρία που χρειάζεται είναι 11.1 V Li-Po, με χωρητικότητα 5200 mAh. Σαφώς

ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ιωάννης Αναγνωστόπουλος

χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από το Syma, καθώς είναι μεγαλύτερο σε διαστάσεις και σε βάρος. Το Nova Pro έχει βάρος 875 γραμμάρια και διαστάσεις 30x30x20 cm. Ωστόσο, δεδομένου ότι η μπαταρία του drone αυτού είχε φθαρεί, χρησιμοποιήθηκε εξωτερική τροφοδοσία με χρήση τροφοδοτικού 12 V, 1.5 A. Με τον τρόπο αυτό επιλύθηκε το πρόβλημα αξιοπιστίας της μπαταρίας και το ζήτημα του χρόνου λειτουργίας της, καθώς η καινούργια η εργοστασιακή μπαταρία του Nova Pro αντέχει μονάχα 25 λεπτά λειτουργίας. Το Nova Pro δεν διαθέτει διακόπτη λειτουργίας ON – OFF και εκκινεί τη λειτουργία του με τη σύνδεση της πηγής τροφοδοσίας.

Το Nova Pro διαθέτει τέσσερα LED φώτα, στο κάτω μέρος του, δύο πράσινα στους πρόσθιους βραχίονες και δύο κόκκινα στους πίσω, έτσι ώστε να γίνεται πιο εύκολα ορατό. Ακόμα έχει άλλα δύο LED στην μία πλευρά του, που δίνουν πληροφορίες για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το MEEO.

Το συγκεκριμένο MEEO διαθέτει σύστημα γεωγραφικού εντοπισμού ( GPS ), γεγονός το οποίο του δίνει πολλές δυνατότητες, όπως είναι το Headless Mode, δηλ. δυνατότητα να παραμένει στο ίδιο επίπεδο κατά την διάρκεια της πτήσης, καθώς αποθηκεύει το προσανατολισμό με τον οποίο απογειώθηκε. Ακόμα, μπορεί να μείνει σταθερό σε ένα σημείο στον αέρα, και να πετάει σε σταθερό υψόμετρο. Επιπλέον, αν χάσει την επαφή με το χειριστήριο μπορεί να γυρίσει στο σημείο απ' όπου ξεκίνησε. Επιπροσθέτως, έχει και αισθητήρα υψομέτρου, γυροσκόπιο, και πυξίδα.



Εικόνα 2.14 Το drone Nova Pro





Εικόνα 2.15 Το χειριστήριο του Nova Pro

Το χειριστήριο του χρειάζεται τέσσερις μπαταρίες AA του 1.5 V για να λειτουργήσει, και στέλνει και λαμβάνει σήμα στην συχνότητα των 2.4 GHz. Το χειριστήριο και το MEEO δεν συνδέονται αυτόματα. Απαιτείται από τον χρήστη να κάνει pairing μεταξύ τους, πραγματοποιώντας ένα προκαθορισμένο αλγόριθμο κινήσεων στο χειριστήριο. Το Nova Pro MEEO και το χειριστήριό του απεικονίζονται στις Εικόνες 2.14 και 2.15, αντίστοιχα.

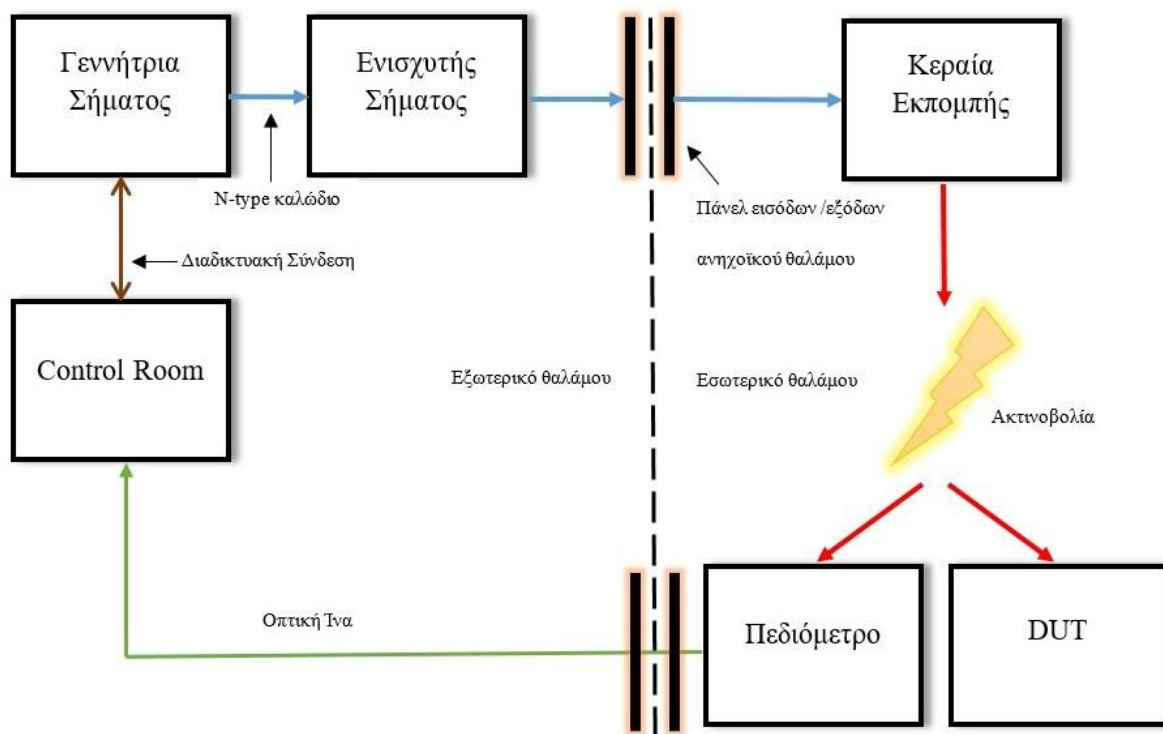
### 2.1.9 Δωμάτιο Ελέγχου Εξοπλισμού-Οργάνων Μέτρησης (Control Room)

Τα πειράματα για τον έλεγχο της ατρωσίας των MEEO πραγματοποιήθηκαν με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, εντός του ημι-ανηχοϊκού θαλάμου. Εντούτοις, ο εξοπλισμός παραγωγής σημάτων υψηλής ισχύος είναι εγκαταστημένος εκτός του θαλάμου. Για λόγους ασφάλειας έγινε χρήση της δυνατότητας ελέγχου της γεννήτριας από απόσταση, μέσω διαδικτύου. Συγκεκριμένα, η αίθουσα ZB005 του κτηρίου ZB, της Πανεπιστημιούπολης 2 του ΠΑΔΑ, χρησιμοποιήθηκε ως κέντρο ελέγχου του εξοπλισμού και των οργάνων μέτρησης. Η αίθουσα διαθέτει σταθερό ηλεκτρονικό υπολογιστή και σύνδεση στο διαδίκτυο. Εισάχθηκε στον ηλεκτρονικό υπολογιστή της αίθουσας, η IP της γεννήτριας σήματος καθώς και ο κωδικός εισόδου της και έτσι έγινε δυνατός ο απομακρυσμένος έλεγχος της, από ασφαλής απόσταση, χωρίς να απαιτείται φυσική παρουσία του προσωπικού στην αίθουσα που βρίσκονται ο εξοπλισμός του πειράματος .

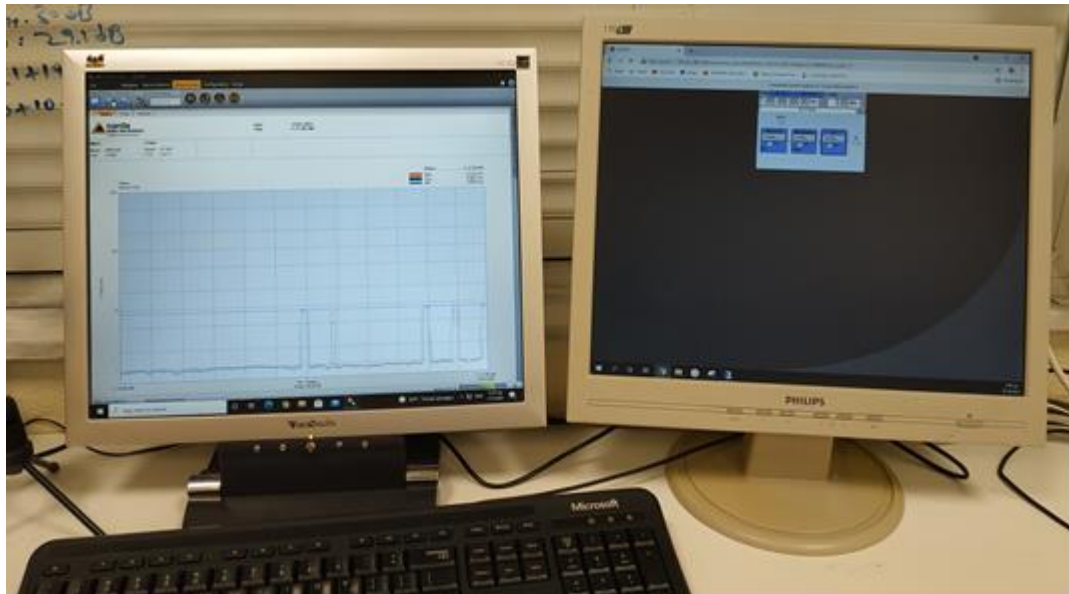
### 2.1.10 Πειραματική Τοπολογία

Συνοψίζοντας, κατά την διάρκεια των πειραμάτων για τον έλεγχο της ατρωσίας των ΜΕΕΟ χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός: η γεννήτρια σήματος R&S SMB-B106, ο ενισχυτής ισχύος σήματος OPHIR<sub>RF</sub> 5225, η κεραία ETS- Lindgren 3106 B, και το πεδίομετρο Narda NBM-550. Η πειραματική τοπολογία απεικονίζεται στην Εικόνα 2.16.

Το προσωπικό κατά την διάρκεια των πειραματικού ελέγχου της ατρωσίας των ΜΕΕΟ βρισκόταν στο Δωμάτιο Ελέγχου (Control Room). Το Δωμάτιο Ελέγχου έχει έναν υπολογιστή με δύο οθόνες (Εικόνα 3.19). Ο υπολογιστής συνδέεται μέσω διαδικτύου με την Γεννήτρια Σήματος, η οποία βρίσκεται στην αίθουσα του ανηχοϊκού θαλάμου. Μέσω του υπολογιστή ελέγχονται τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας του κάθε πειράματος, όπως η συχνότητα, η ισχύς, η διαμόρφωση κ.α.. Η διεπαφή ελέγχου της γεννήτριας απεικονίζεται στην μία από τις οθόνες του υπολογιστή στο Δωμάτιο Ελέγχου.



Εικόνα 2.16 Σχηματικό γενικής τοπολογίας μηχανημάτων κατά την διάρκεια των πειραμάτων.



Εικόνα 2.17 Οι δύο οθόνες του υπολογιστή στο Control Room κατά την διάρκεια του πειράματος. Στην αριστερή είναι ανοιγμένο το πρόγραμμα ελέγχου του πεδιομέτρου και στην δεξιά το πρόγραμμα απομακρυσμένου ελέγχου της γεννήτριας.

Το εκάστοτε επιλεγμένο σήμα μεταδίδεται από την RF θύρα εξόδου της γεννήτριας προς τη θύρα εισόδου (RF-in) του Ενισχυτή Σήματος, μέσω ομοαξονικού καλωδίου N-type (Εικόνα 2.18). Το σήμα ενισχύεται και από τη θύρα εξόδου (RF-out port) του ενισχυτή και μέσω N-type καλωδίου συνδέεται στο πάνελ εισόδων/εξόδων, σε υποδοχή ίδιου τύπου, στην πλευρά που βρίσκεται στο εξωτερικό του θαλάμου (Εικόνα 2.18).



Εικόνα 2.18 Σύνδεση της γεννήτριας με τον ενισχυτή.

Οι υποδοχές του εξωτερικού πάνελ καθρεπτίζονται στο εσωτερικό και τα ζευγάρια υποδοχών συνδέονται μεταξύ τους. Έτσι το σήμα από την υποδοχή N-type, η οποία βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά του πάνελ, συνδέεται με τη χρήση προσαρμογέα N-type σε 7-16 με καλώδιο με συνδετήρες 7-16 στην Κεραία Εκπομπής (Εικόνα 2.19 και Εικόνα 2.20).



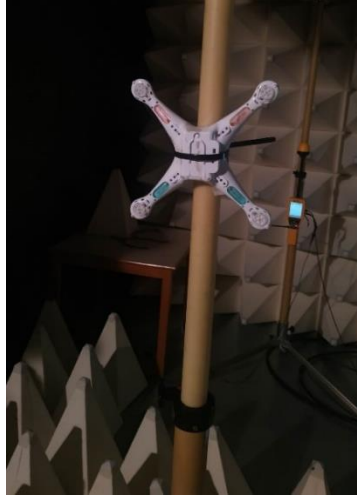
Εικόνα 2.19 Σύνδεση ενισχυτή με την (α) εξωτερική και την (β) εσωτερική πλευρά του πάνελ εισόδων/εξόδων.



Εικόνα 2.20 Η σύνδεση με την κεραία με καλώδιο 7-16.

Το σήμα ακτινοβολείται από την κεραία και προσπίπτει στα υπό έλεγχο MEEO (Device Under Test, DUT) τα οποία ανάλογα με το πείραμα τοποθετούνται σε απόσταση 1, 2 ή 3 μέτρα. Πλησίον του DUT τοποθετείται το πεδιόμετρο προκειμένου να καταγράφεται τιμή της έντασης του προσπίπτοντος

ηλεκτρικού πεδίου. Τόσο το MEEO όσο και το πεδιόμετρο είναι τοποθετημένα πάνω σε δύο ξεχωριστά πλαστικούς τρίποδες, των οποίων το ύψος και η αζιμουθιακή θέση ρυθμίζονται έτσι ώστε να συμπίπτει με την κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας της κεραίας (Εικόνα 2.21). Το χειριστήριο τοποθετείται πίσω από την κεραία, ώστε να μην επηρεάζεται από την ακτινοβολία, καθώς κέντρο και στόχος των πειραμάτων είναι αποκλειστικά το MEEO.



Εικόνα 2.21 Το πεδιόμετρο με το drone μπροστά του, τοποθετημένα πάνω στα τρίποδα.

Πριν την έναρξη του κάθε πειράματος ενεργοποιούνται χειριστήριο και MEEO και συνδέονται μεταξύ τους. Ο χώρος του δαπέδου από τη κεραία μέχρι το MEEO και το πεδιόμετρο, αλλά και γύρω και πίσω τους, είναι καλυμμένος με τους ειδικούς κώνους του θαλάμου. Οι μετρήσεις του πεδιομέτρου μεταδίδονται, μέσω οπτικής ίνας και του δεύτερου πάνελ εισόδων/εξόδων, σε ΗΥ εκτός θαλάμου. Στη συνέχεια, με απομακρυσμένη σύνδεση του ΗΥ από το δωμάτιο ελέγχου στον ΗΥ στον οποίο καταγράφονται πρωτογενώς οι μετρήσεις του πεδιομέτρου είναι δυνατή η απεικόνιση των μετρήσεων σε μία από τις δύο οθόνες του Δωματίου Ελέγχου (Εικόνα 2.17).

## 2.2 Πειραματική Μεθοδολογία

Τα πειράματα ελέγχου της ατρωσίας των MEEO πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας μια προκαθορισμένη μεθοδολογία, ώστε, να υπάρχει καλύτερος έλεγχος επί των αποτελεσμάτων και να μην υπάρξουν παραλήψεις. Αναλυτικές πληροφορίες για τη μεθοδολογία που υιοθετήθηκε δίνονται στις επόμενες υπό-ενότητες.

### 2.2.1 Διακρίβωση εξοπλισμού

Προκειμένου να γνωρίζουμε την πραγματική τιμή ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος, το οποίο τελικά εκπέμπεται από την κεραία, προχωρήσαμε στην διακρίβωση του εξοπλισμού. Στην υπό-ενότητα αυτή περιγράφεται αρχικά η διαδικασία διακρίβωσης του ενισχυτή ισχύος.

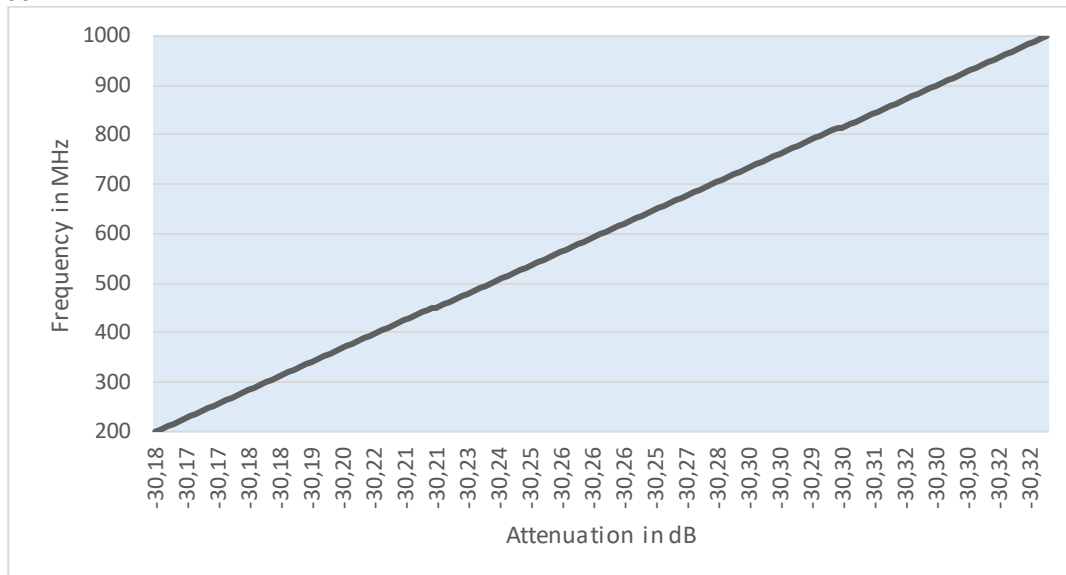


Εν συντομία η διαδικασία διακρίβωσης του ενισχυτή ισχύος είναι η μέτρηση της τιμής ισχύος του σήματος, μετά την έξοδο του από τον ενισχυτή και η εύρεση της απόκλισης της από την θεωρητική τιμή, ώστε να γνωρίζουμε την πραγματική τιμή της. Πιο αναλυτικά, ο ενισχυτής συνδέεται στην είσοδό του, με την γεννήτρια σήματος μέσω N-type καλωδίου. Στην συνέχεια η έξοδος του ενισχυτή συνδέεται με ένα εξασθενητή σήματος, της τάξης των 30 dB (Εικόνα 2.24), ώστε η ισχύς του σήματος να βρίσκεται στα αποδεκτά όρια του παλμογράφου. Στη συνέχεια, ο εξασθενητής συνδέεται με την είσοδο του παλμογράφου, όπου τελικά αποτυπώνεται το σήμα και μετριέται η τιμή της τάσης εξόδου του ενισχυτή. Στην τιμή της μέτρησης έχει προστεθεί μέσω του λογισμικού του παλμογράφου η τιμή του εξασθενητή, ώστε μέσω υπολογισμού να καταγράφεται η πραγματική τιμή της τάσης εξόδου, δηλ. χωρίς την εξασθένιση. Ωστόσο για να υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παραπάνω διαδικασία θα πρέπει να μετρηθεί και ο εξασθενητής για να βρεθεί η πραγματική του εξασθένιση και να προστεθεί στο λογισμικό του παλμογράφου .

Για την μέτρηση του εξασθενητή, χρησιμοποιούμε το Διανυσματικό Αναλυτή Δικτύου (Vector Network Analyzer, VNA). Αρχικά πραγματοποιούμε διακρίβωση στον ίδιο τον VNA. Ορίζουμε τον VNA, να σαρώσει το φάσμα 200 MHz-1GHz, στις πόρτες 1 και 3. Ελέγχουμε τη σύνδεση των δύο θυρών σε καταστάσεις Open, Short, Match και Through έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη τα καλώδια διασύνδεσης και να «μεταφερθεί» η διεπαφή μέτρησης του VNA στα άκρα των καλωδίων και κατ' επέκταση στην είσοδο και την έξοδο του εξασθενητή. Τώρα πλέον μπορούμε να μετρήσουμε την πραγματική εξασθένιση του εξασθενητή ανά συχνότητα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται στο διάγραμμα 2.1.



Εικόνα 2.22 Ο εξασθενητής 30 dB ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ενισχυτή.



Διάγραμμα 2.1 : Εξασθένηση (dB) στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz για τον εξασθενητή της Εικόνας 2.22.

Οι τιμές των μετρήσεων της τάσης εξόδου του ενισχυτή καταγράφονται στους Πίνακες 2.4-2.6, ενώ στο Διάγραμμα 2.1 απεικονίζονται γραφικά στο εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος (200 MHz – 1000 MHz).

Πίνακας 2.4 Αποτελέσματα μέτρησης της εξόδου του ενισχυτή στις συχνότητες 200 - 450 MHz.

<b>Frequency</b> 200 MHz	<i>Generator Output Measured (dBm) Voltage (V)</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<b>Vmax (+)</b>	118.948	116.58	93.925	56.638
	<b>Vmax (-)</b>	-157.5	-158.115	-127.436	-79.765
	<b>Vp-p</b>	276.448	274.695	221.925	136.403
<b>Frequency</b> 250 MHz	<i>Generator Output Measured (dBm) Voltage (V)</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<b>Vmax (+)</b>	109.075	100.612	99.201	75.694
	<b>Vmax (-)</b>	-149.037	-143.866	-131.172	-89.799
	<b>Vp-p</b>	258.112	244.478	230.373	165.493
<b>Frequency</b> 300 MHz	<i>Generator Output Measured (dBm) Voltage (V)</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<b>Vmax (+)</b>	123.179	119.418	115.187	83.687
	<b>Vmax (-)</b>	-151.388	-144.806	-129.291	-85.567
	<b>Vp-p</b>	274.567	264.224	244.478	169.254

<b>Frequency</b>  350 MHz	<i>Generator Output Measured (dBm) Voltage (V)</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<b>Vmax (+)</b>	127.41	117.067	95.44	63.351
	<b>Vmax (-)</b>	-150.448	-140.575	-119.418	-78.515
	<b>Vp-p</b>	277.858	257.642	214.858	143.866
<b>Frequency</b>  400 MHz	<i>Generator Output Measured (dBm) Voltage (V)</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<b>Vmax (+)</b>	137.284	123.179	94.03	60.179
	<b>Vmax (-)</b>	-143.396	-125.06	-96.851	-61.119
	<b>Vp-p</b>	280.68	248.239	190.881	121.298
<b>Frequency</b>  450 MHz	<i>Generator Output Measured (dBm) Voltage (V)</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<b>Vmax (+)</b>	142.455	129.761	102.493	68.172
	<b>Vmax (-)</b>	-142.455	-125.53	-99.672	-65.821
	<b>Vp-p</b>	284.91	255.291	202.165	133.993

Πίνακας 2.5 Αποτελέσματα μέτρησης της εξόδου του ενισχυτή στις συχνότητες 500 - 750 MHz.

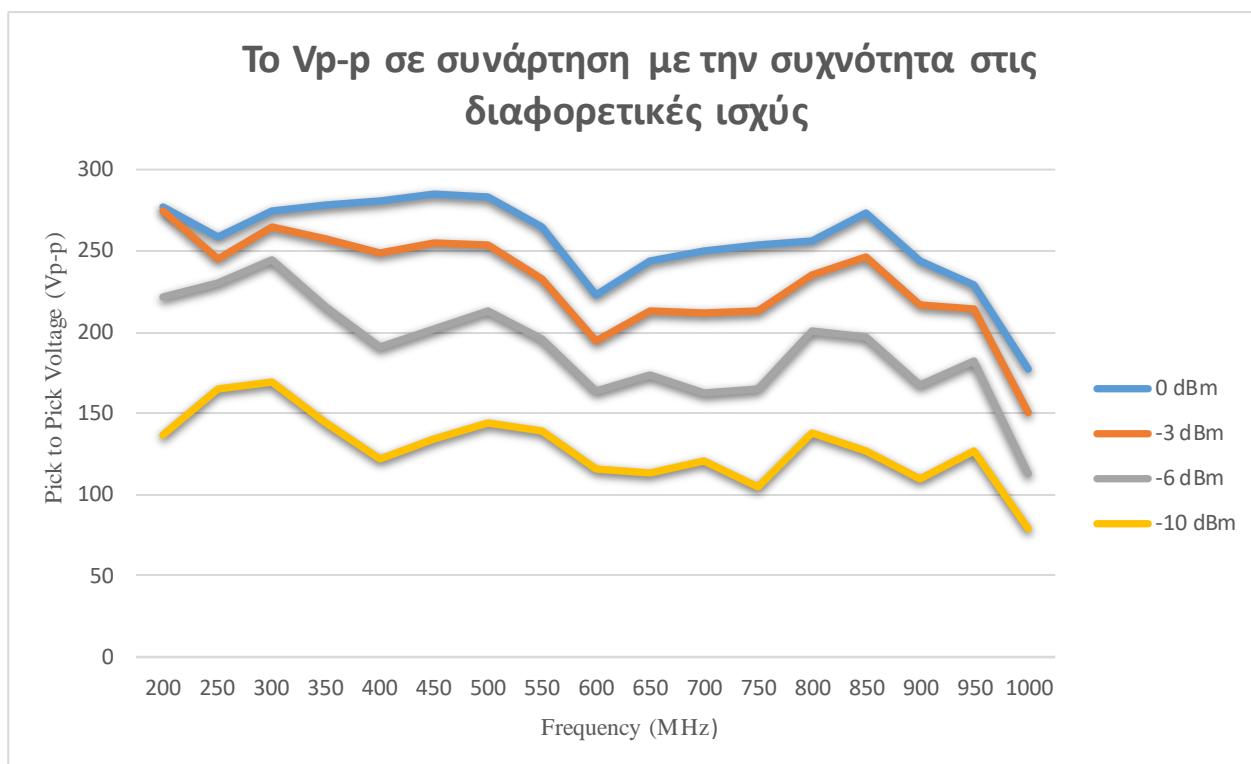
<b>Frequency</b>  500 MHz	<i>Generator Output Measured (dBm) Voltage (V)</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<b>Vmax (+)</b>	143.866	129.761	108.134	74.284
	<b>Vmax (-)</b>	-139.634	-123.649	-104.373	-70.052
	<b>Vp-p</b>	283.5	253.41	212.507	144.336
<b>Frequency</b>  550 MHz	<i>Generator Output Measured (dBm) Voltage (V)</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<b>Vmax (+)</b>	129.761	112.366	94.03	69.112
	<b>Vmax (-)</b>	-134.933	-120.828	-101.552	-70.052
	<b>Vp-p</b>	264.694	233.194	195.582	139.164



<b>Frequency</b>  600 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	108.134	94.97	79.925	58.769
	<b>Vmax (-)</b>	-114.246	-100.142	-83.687	-57.358
	<b>Vp-p</b>	222.38	195.112	163.612	116.127
<b>Frequency</b>  650 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	119.888	103.433	86.037	56.418
	<b>Vmax (-)</b>	-124.119	-109.075	-87.918	-57.358
	<b>Vp-p</b>	244.007	212.508	173.955	113.776
<b>Frequency</b>  700 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	117.067	98.261	75.224	47.485
	<b>Vmax (-)</b>	-132.582	-113.306	-86.978	-55.007
	<b>Vp-p</b>	249.649	211.567	162.202	102.492
<b>Frequency</b>  750 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	125.06	103.903	81.336	50.776
	<b>Vmax (-)</b>	-128.351	-108.604	-84.157	-53.597
	<b>Vp-p</b>	253.411	212.507	165.493	104.373

Πίνακας 2.6 Αποτελέσματα μέτρησης της εξόδου του ενισχυτή στις συχνότητες 800 - 1000 MHz.

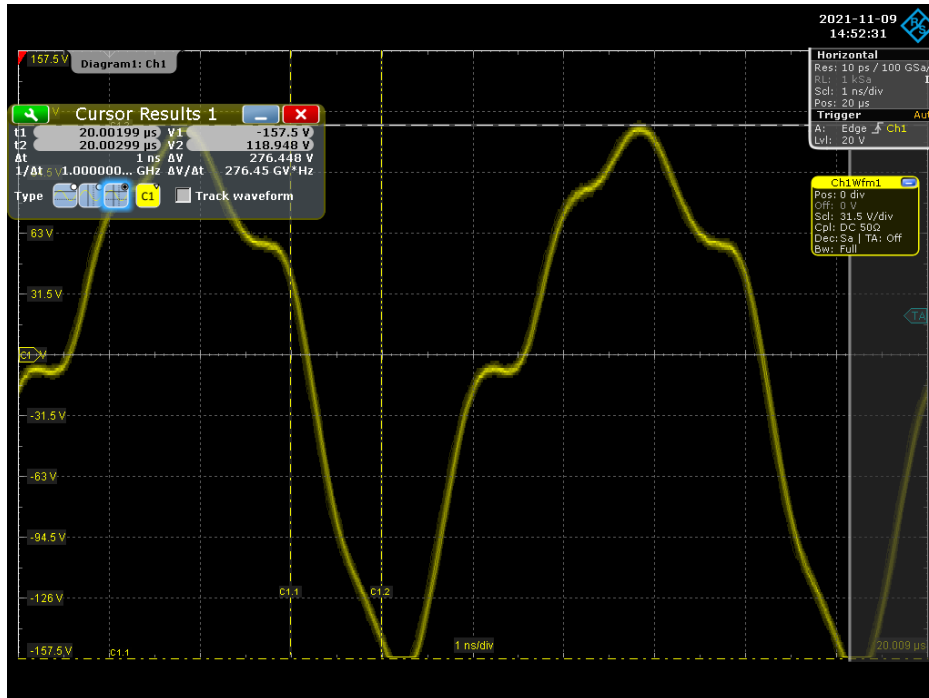
<b>Frequency</b> 800 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	128.351	117.537	101.082	67.701
	<b>Vmax (-)</b>	-127.41	-117.067	-99.201	-66.761
	<b>Vp-p</b>	255.761	234.604	200.283	137.462
<hr/>					
<b>Frequency</b> 850 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	136.813	123.179	38.731	63.94
	<b>Vmax (-)</b>	-135.873	-122.709	-98.731	-63
	<b>Vp-p</b>	272.686	245.888	197.462	126.94
<hr/>					
<b>Frequency</b> 900 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	121.769	107.194	83.687	55.007
	<b>Vmax (-)</b>	-121.769	-109.075	-83.687	-55.007
	<b>Vp-p</b>	243.538	216.296	167.374	110.014
<hr/>					
<b>Frequency</b> 950 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	114.246	105.784	89.799	61.119
	<b>Vmax (-)</b>	-115.187	-108.604	-92.619	-65.351
	<b>Vp-p</b>	229.433	214.388	182.418	126.47
<hr/>					
<b>Frequency</b> 1000 MHz	<i>Generator</i>	<b>0 dBm</b>	<b>-3 dBm</b>	<b>-6 dBm</b>	<b>-10 dBm</b>
	<i>Output Measured (dBm)</i>				
	<i>Voltage (V)</i>				
	<b>Vmax (+)</b>	86.507	72.873	55.007	38.082
	<b>Vmax (-)</b>	-90.739	-77.575	-55.828	-40.903
	<b>Vp-p</b>	177.246	150.448	112.835	78.985
<hr/>					



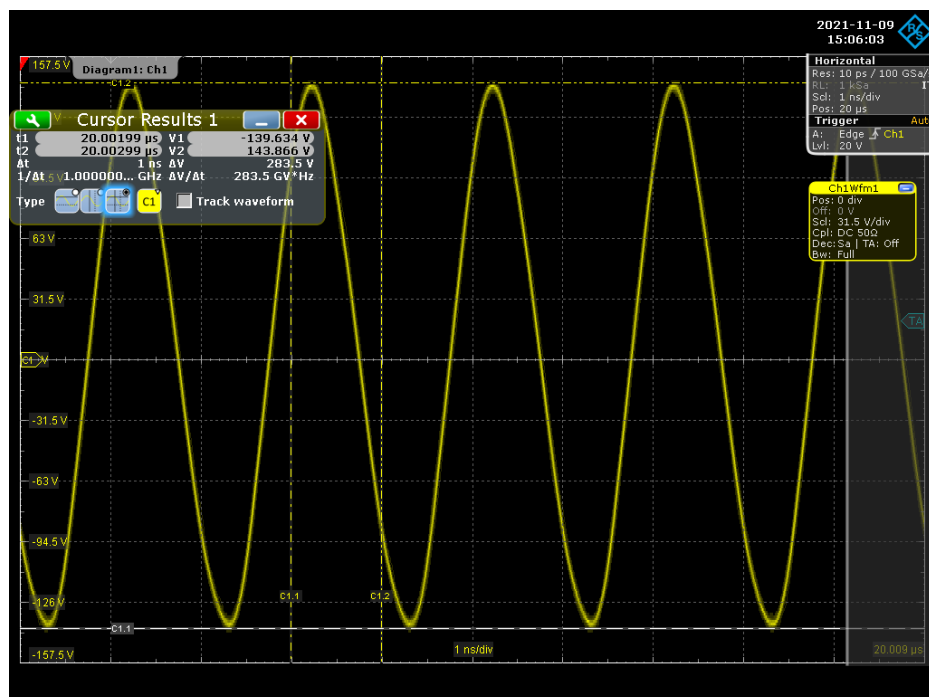
Διάγραμμα 2.2 : Οι τιμές του Vp-p, σε συνάρτηση με την συχνότητα και διαφορετικές τιμές ισχύος οδήγησης.

Τόσο από τους πίνακες, όσο και διάγραμμα 2.2 φαίνεται ότι η τιμή του Vp-p διαφοροποιείται, όπως είναι αναμενόμενο ανάλογα με την ισχύ εισόδου αλλά και ανάλογα με τη συχνότητα. Σε ένα εύρος συχνοτήτων 450 MHz – 500 MHz, ο ενισχυτής μεγιστοποιεί την ισχύ εξόδου του παρουσιάζοντας μία σταδιακή μείωση προς τις δύο ακραίες συχνότητες των 200 MHz και των 1000 MHz με τις υψηλότερες συχνότητες να είναι πιο επιβαρυνμένες.

Στην αποτύπωση του σήματος, που εξέρχεται από την ενισχυτή και εισάγεται στον παλμογράφο παρατηρήθηκε ένα μη αναμενόμενο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, το εισερχόμενο σήμα εμφανίζει μια παραμόρφωση στην θετική ημι-περίοδο, η οποία είναι πολύ έντονη στις χαμηλές συχνότητες, δηλαδή στις συχνότητες από 200 MHz έως 400 MHz. Όσο αυξάνεται η συχνότητα η παραμόρφωση εξαλείφεται. Η παραμόρφωση και η εξάλειψή της στις υψηλότερες συχνότητες αποτυπώνεται στις Εικόνες 2.23 και 2.24. Η συγκεκριμένη παραμόρφωση εκτιμάται ότι μετατοπίζει φασματικά σε χαμηλότερες συχνότητες και για αυτόν το λόγο ενδέχεται η ακτινοβολία να είναι λιγότερο ισχυρή έναντι του αναμενομένου.

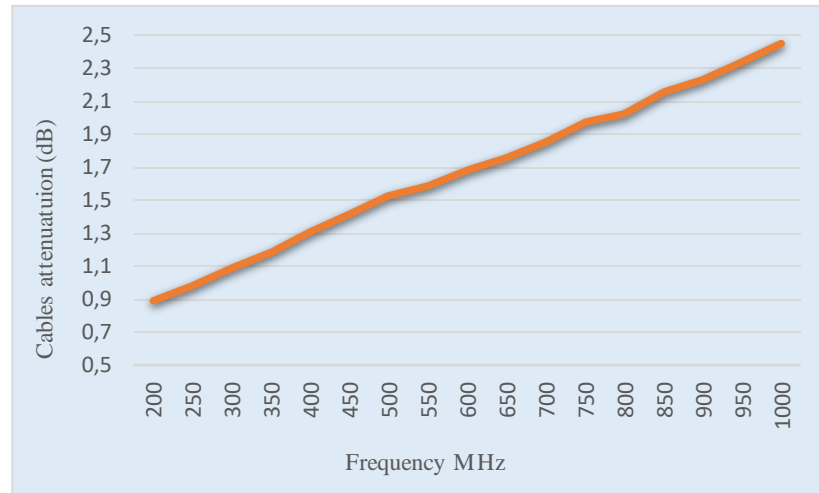


Εικόνα 2.23 Το εισερχόμενο σήμα στην συχνότητα των 200 MHz και ισχύος 0 dBm εμφανίζει έντονη παραμόρφωση.



Εικόνα 2.24 Το εισερχόμενο σήμα στην συχνότητα των 500 MHz και ισχύος 0 dBm δεν εμφανίζει καθόλου παραμόρφωση.

Το επόμενο βήμα σε ότι αφορά τη διακρίβωση είναι η μέτρηση των καλωδίων N-type και 7-16, τα οποία συνδέουν τον ενισχυτή με την κεραία, καθώς εισάγουν και αυτά μια επιπρόσθετη εξασθένηση. Τα καλώδια αυτά μετρήθηκαν σε σειρά συνδεδεμένα με την χρήση του VNA, επαναλαμβάνοντας την διαδικασία που προαναφέρθηκε για την μέτρηση του εξασθενητή. Η εξασθένηση των καλωδίων που μετρήθηκαν απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2.3.

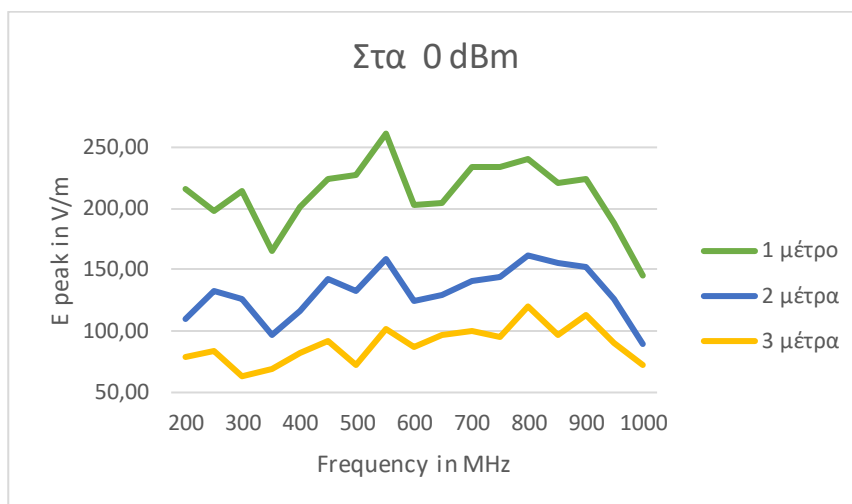


Διάγραμμα 2.3 : Οι τιμές εξασθένησης των καλωδίων διασύνδεσης ενισχυτή και κεραίας.

Έχοντας πλέον μετρήσει την έξοδο του ενισχυτή καθώς και την εξασθένηση, η οποία εισάγεται μεταξύ ενισχυτή και κεραίας, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την τιμή ισχύος που φτάνει στην κεραία για να εκπεμφθεί και κατ' επέκταση να εκτιμήσουμε θεωρητικά την ένταση του ακτινοβολούμενου πεδίου στις διάφορες πειραματικές αποστάσεις (1, 2 και 3 μέτρα). Οι θεωρητικές μετρήσεις αλλά και οι αντίστοιχες μετρήσεις από το πεδίομετρο απεικονίζονται στον Πίνακα 2.7 και στο Διάγραμμα

Πίνακας 2.7.α Μετρήσεις (M) και θεωρητικές εκτιμήσεις (Θ) της έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου στις συχνότητες 800 - 1000 MHz και σε αποστάσεις 1, 2 και 3 μέτρα, με ακτινοβολούμενη ισχύ οδήγησης 0 dBm.

Συχνότητα (MHz)	1m		2 m		3 m	
	Θ (V/m)	M (V/m)	Θ (V/m)	M (V/m)	Θ (V/m)	M (V/m)
200	192,87	215,98	91,04	110,00	60,70	79,77
250	188,79	197,60	99,99	133,52	66,66	83,59
300	210,04	214,57	112,53	126,73	75,02	63,22
350	238,50	165,63	115,20	96,89	76,80	69,59
400	254,61	200,71	127,30	116,55	84,87	81,47
450	233,01	224,05	116,50	142,15	77,67	92,64
500	231,59	227,58	140,83	133,10	93,88	72,28
550	223,63	261,24	140,77	158,84	93,84	101,27
600	188,91	203,68	112,26	124,89	74,84	87,55
650	208,00	204,24	129,43	128,85	86,29	96,75
700	220,29	233,38	137,08	140,88	91,38	100,42
750	225,68	234,79	147,05	144,27	98,03	95,33
800	221,31	239,75	140,92	161,81	93,95	120,23
850	232,45	221,07	151,46	154,88	100,97	96,61
900	205,70	223,48	102,85	152,76	68,57	113,44
950	166,65	188,26	116,36	126,59	77,57	90,10
1000	118,64	145,40	86,74	89,53	57,83	72,70

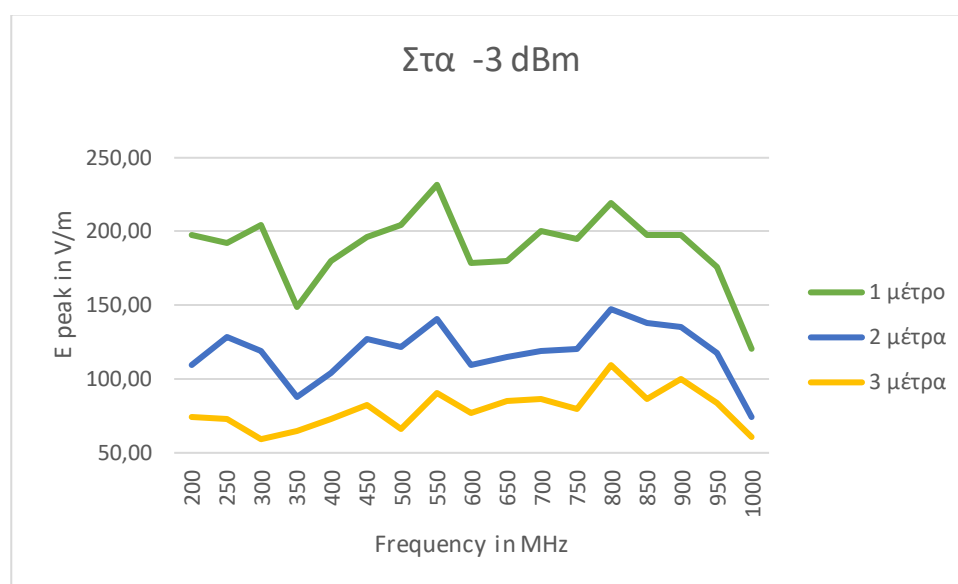


Διάγραμμα 2.4.α. : Οι τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις και ισχύ οδήγησης 0dBm .

Πίνακας 2.7.β Μετρήσεις (M) και θεωρητικές εκτιμήσεις (Θ) της έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου στις συχνότητες 800 - 1000 MHz και σε αποστάσεις 1, 2 και 3 μέτρα, με ακτινοβολούμενη ισχύ οδήγησης -3 dBm.

Συχνότητα (MHz)	1m		2 m		3 m	
	Θ (V/m)	M (V/m)	Θ (V/m)	M (V/m)	Θ (V/m)	M (V/m)
200	191,65	197,60	90,47	109,97	60,31	73,97
250	178,81	192,36	94,70	129,00	63,14	73,55
300	202,13	203,82	108,29	118,95	72,20	59,26
350	221,15	149,22	106,82	87,84	71,21	64,36
400	225,18	180,06	112,59	104,10	75,06	72,98
450	208,78	196,75	104,39	127,30	69,59	82,74
500	207,01	204,53	125,88	121,22	83,92	66,05
550	193,37	231,68	121,72	140,31	81,14	89,96
600	165,75	178,22	98,50	110,04	65,66	77,23
650	181,15	179,63	112,72	114,29	75,15	84,58
700	186,68	199,86	116,17	119,66	77,44	86,42

750	189,25	195,19	123,31	120,37	82,21	79,77
800	203,00	218,67	129,26	147,38	86,17	109,48
850	209,60	197,60	136,57	137,91	91,05	86,56
900	182,69	197,45	91,34	135,08	60,90	99,86
950	155,73	175,39	108,73	117,68	72,48	83,88
1000	100,70	120,51	73,62	74,26	49,08	60,11

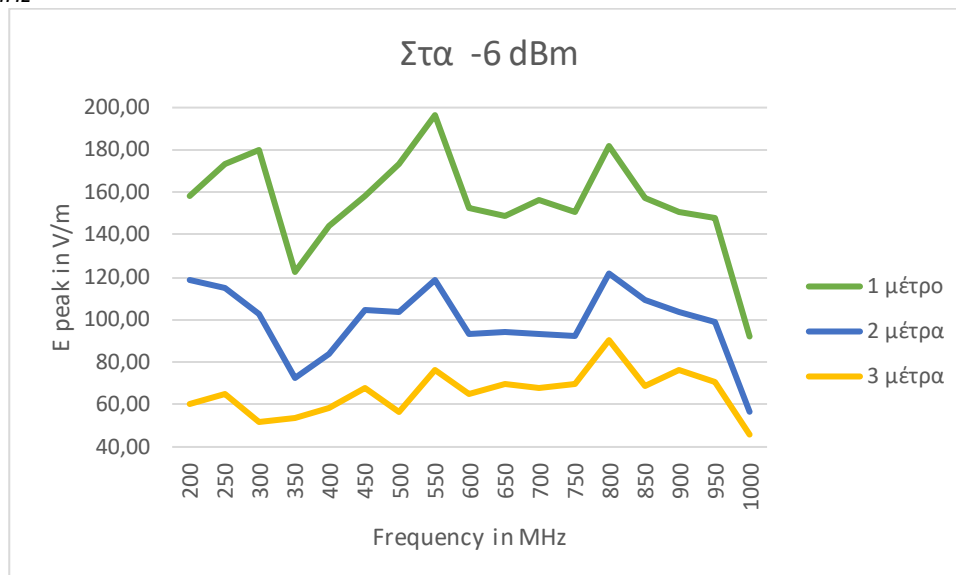


Διάγραμμα 2.4.β : Οι τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις και ισχύ οδήγησης -3 dBm.



Πίνακας 2.7.γ Μετρήσεις (M) και θεωρητικές εκτιμήσεις (Θ) της έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου στις συχνότητες 800 - 1000 MHz και σε αποστάσεις 1, 2 και 3 μέτρα, με ακτινοβολούμενη ισχύ οδήγησης -6 dBm.

Συχνότητα (MHz)	1m		2 m		3 m	
	Θ (V/m)	M (V/m)	Θ (V/m)	M (V/m)	Θ (V/m)	M (V/m)
200	154,83	158,70	73,09	118,53	48,72	60,54
250	168,50	173,55	89,24	114,85	59,49	64,78
300	187,03	179,63	100,20	102,83	66,80	52,05
350	184,42	122,49	89,08	72,56	59,39	53,89
400	173,15	144,55	86,58	83,52	57,72	58,13
450	165,34	157,99	82,67	104,10	55,11	67,61
500	173,59	173,27	105,56	103,39	70,37	56,44
550	162,18	196,46	102,08	118,95	68,06	76,38
600	138,99	152,48	82,59	92,93	55,06	65,21
650	148,29	149,22	92,27	93,92	61,51	69,73
700	143,13	156,44	89,06	93,07	59,37	67,47
750	147,38	150,50	96,03	92,50	64,02	69,31
800	173,30	181,47	110,35	121,78	73,57	90,38
850	168,32	157,43	109,68	109,62	73,12	68,60
900	141,37	150,50	70,68	103,68	47,12	76,38
950	132,50	148,09	92,51	99,15	61,67	70,72
1000	75,53	92,08	55,22	56,58	36,81	45,83



Διάγραμμα 2.4.γ : Οι τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις και ισχύ οδήγησης -6 dBm .

### 2.2.2 Εντοπισμός Συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία

Για να επιταχυνθεί η πειραματική διαδικασία και ταυτόχρονα να καταστεί εφικτή η λεπτομερής αξιολόγηση των κυματομορφών, ως προς τη δυνατότητά τους να δημιουργήσουν σοβαρές διαταραχές στα MEEO, αποφασίστηκε να εντοπιστούν καταρχάς ζώνες συχνοτήτων, στις οποίες το κάθε MEEO είναι πιο ευαίσθητο. Στη συνέχεια, μέσω διαδοχικών πειραματικών ελέγχων επιχειρείται η εστίαση σε μικρότερες ζώνες συχνοτήτων και τελικά σε μία συχνότητα, η οποία χαρακτηρίζεται από την πλέον μειωμένη ατρωσία στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz.

Για να εντοπιστούν οι συχνότητες στις οποίες τα υπό έλεγχο MEEO επιδεικνύουν μειωμένη ατρωσία. πραγματοποιήθηκε σάρωση συχνοτήτων ( frequency sweep ), στην περιοχή συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz. Για την σάρωση αυτή χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία frequency sweep της γεννήτριας συχνοτήτων, η οποία επιτρέπει την αυτοματοποιημένη εναλλαγή συχνοτήτων στο φάσμα που θα καθοριστεί από τον χρήστη. Το εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz χωρίστηκε σε μικρότερες ζώνες των 100 MHz. Για κάθε επιμέρους ζώνη συχνοτήτων η γεννήτρια εκπέμπει με ισχύ 0 dBm αλλάζοντας συχνότητα με βήμα 10 MHz και τυπικό χρόνο παραμονής σε κάθε συχνότητα ( dwell time ) 10 sec ή 5 sec. Μετά το πέρας της σάρωσης, εάν το MEEO έχει απενεργοποιηθεί λόγω παρεμβολών γίνεται επαναφορά του χειριστηρίου και του MEEO με χρήση των διακοπών ON/OFF τους. Για τις ζώνες συχνοτήτων, στις οποίες εντοπίστηκαν διαταραχές, γίνεται νέα σάρωση με μειωμένη ισχύ εκπομπής επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία. Η διαδικασία μείωσης της ισχύος και σάρωσης, επαναλαμβάνεται μέχρι να μειωθεί τόσο ισχύ, ώστε να μην επηρεάζεται πλέον MEEO.

Η προαναφερόμενη διαδικασία προσφέρει μία εικόνα για το εύρος ζώνης συχνοτήτων, οι οποίες παρουσιάζουν μειωμένη ατρωσία, δηλ. τις ζώνες στις οποίες προκαλούνται διαταραχές με τη μικρότερη δυνατή ισχύ τροφοδοσίας και το μικρότερο δυνατό dwell time. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στο προαναφερόμενο μικρότερο εύρος συχνοτήτων με σάρωση ανά 50 MHz προκειμένου να εντοπιστεί ένα ακόμη πιο στενό εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος.

Όταν εντοπιστεί η ζώνη 50 MHz η οποία εμφανίζει την πλέον μειωμένη ατρωσία, τα πειράματα συνεχίζονται με εκπομπές σε μεμονωμένες συχνότητες (χωρίς σάρωση) με βήμα 10 MHz. Με διαδοχικές μειώσεις της ισχύος καθώς και της διάρκειας της ακτινοβολίας τελικά επιλέγεται μία συχνότητα με την πλέον μειωμένη ατρωσία. Τελικά ως συχνότητα στην οποία το MEEΟ έχει την πιο μειωμένη ατρωσία, επιλέγεται εκείνη όπου το MEEΟ διαταράσσεται με την μικρότερη δυνατή ισχύ και διάρκεια ακτινοβολίας.

### **2.2.3 Μεταβολή της απόστασης**

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η απόσταση μεταξύ της κεραίας και του MEEΟ χρησιμοποιείται ως ένας έμμεσος τρόπος ενίσχυσης της έντασης του ακτινοβολούμενου πεδίου προκειμένου να εντοπίζονται με εμφανή τρόπο οι συχνότητες στις οποίες το MEEΟ επιδεικνύει μειωμένη ατρωσία.

Σε αυτό το πλαίσιο, η προκαταρκτική διερεύνηση με σάρωση συχνοτήτων ανά 100 MHz πραγματοποιείται σε απόσταση 1 m. Στη συνέχεια τα πειράματα συνεχίζονται στις ζώνες συχνοτήτων, οι οποίες αναδεικνύονται από τα πειράματα του 1 m, αλλά αυτή τη φορά σε απόσταση 2 ή 3 m. Κριτήριο για την μετακίνηση στα 2 m ή στα 3 m είναι η δυνατότητα πρόκλησης διαταραχών, π.χ. εάν στα 3 m δεν είναι εφικτό να προκληθούν διαταραχές, τότε τα πειράματα πραγματοποιούνται στα 2 m.

Σε κάθε περίπτωση, τα πειράματα επιδιώκεται να πραγματοποιηθούν στη μέγιστη δυνατή απόσταση προκειμένου να επιτευχθούν συνθήκες πλησιέστερες προς αυτές του μακρινού πεδίου.

### **2.2.4 Μελέτη με μεμονωμένο παλμό**

Στις προηγούμενες δύο υποενότητες 2.2.2 και 2.2.3 βρέθηκε η πιο ευνοϊκή συχνότητα και η μέγιστη απόσταση στην οποία υπήρχαν αποτελέσματα διαταραχών. Τα δύο αυτά στοιχεία “κλειδώθηκαν” και στα επόμενα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για την εξαγωγή περαιτέρω αποτελεσμάτων. Στην ενότητα αυτή θα περιγράψει η πειραματική μεθοδολογία, προκειμένου να εξεταστεί, εάν ο αριθμός των παλμών επηρεάζει την ατρωσία του MEEΟ με τελικό στόχο να

διευκρινιστεί εάν ένας μεμονωμένος παλμός μπορεί να προκαλέσει σοβαρές διαταραχές. Για να επιτευχθεί η εκπομπή ενός μόνο παλμού, χρησιμοποιήθηκε μία πολύ μεγάλη περίοδος και συγκριτικά αρκετά μικρότερη διάρκεια παλμού, ώστε να είναι εφικτή η απενεργοποίηση της γεννήτριας πριν σταλεί και δεύτερος παλμός.

Η διαδικασία εξέλιξης των πειραμάτων μεμονωμένου παλμού έχει ως εξής:

Επιλέγεται μία μεγάλη περίοδος επανάληψης παλμών και μια σημαντικά μικρότερη διάρκεια παλμού.

- Εάν ο πειραματικός έλεγχος συνδυάζεται με διαταραχή της λειτουργίας του MEEΟ, τότε επαναλαμβάνεται το πείραμα με μείωση της διάρκειας του παλμού και ίδια περίοδο επανάληψης παλμού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να μην επηρεάζεται το MEEΟ.
- Εάν το MEEΟ δεν επηρεαστεί στο αρχικό πείραμα ή σε κάποιο από τα επόμενα με την περαιτέρω μείωση του χρόνου, θεωρείται στην πρώτη περίπτωση ότι δεν το επηρεάζει ο μονός παλμός με αυτή την διάρκεια και γίνονται νέα πειράματα, με αύξηση της διάρκειας του παλμού, για να εξεταστεί αν το αποτέλεσμα αλλάζει με μεγαλύτερη διάρκεια. Στην δεύτερη περίπτωση, η τιμή που το MEEΟ επηρεάστηκε τελευταία φορά θεωρείται η οριακή τιμή.

### 2.2.5 Μελέτη για πολλαπλούς παλμούς

Παρόμοια μελέτη έγινε και με πολλαπλούς παλμούς προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η διάρκεια του παλμού μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με αντιστάθμισμα την εκπομπή πολλαπλών παλμών με υψηλή συχνότητας επανάληψης. Σε αυτό το πλαίσιο, μας ενδιαφέρει να προσδιορισθούν τα όρια σε ότι αφορά τη διάρκεια και τη συχνότητα επανάληψης παλμών ως ζεύγος παραμέτρων, δηλ. ουσιαστικά μας ενδιαφέρει να διευκρινίσουμε εάν το Duty Cycle ( $100 \times [\text{Διάρκεια Παλμού } \tau] / [\text{Περίοδος Επανάληψης Παλμών } T]$ ) αποτελεί μία προϋπόθεση πρόκλησης διαταραχών. Επίσης, μας ενδιαφέρει να διευκρινιστεί ποιο είναι το ειδικό βάρος της κάθε μίας από τις δύο προαναφερόμενες παραμέτρους ( $\tau$ ,  $T$ ), δηλ. εάν το  $\tau$  ή το  $T$  έχει πιο καθοριστική επίδραση και κατ' επέκταση εάν η σχέση αναλογίας τους είναι σταθερή ή όχι.

Η πειραματική διαδικασία έχει ως εξής: ρυθμίζεται η γεννήτρια σήματος στην λειτουργία παλμικής διαμόρφωσης ( pulse modulation ), ώστε να παράγει παλμό με επιλεγμένες τιμές ( $\tau$ ,  $T$ ).

- Εάν το MEEO επηρεάστηκε, τότε το πείραμα επαναλαμβάνεται με παλμούς μικρότερης διάρκειας ενώ η περίοδος μένει σταθερή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου να μην υπάρχει επιρροή πλέον το drone. Σε κάθε κύκλο επανάληψης γίνεται νέα μείωση της διάρκειας του παλμού.
- Εάν το MEEO δεν επηρεαστεί σε κάποια φάση της πειραματικής διαδικασίας αυτό σημαίνει ότι εντοπίστηκε μία οριακή τιμή για το ζεύγος ( $\tau$ ,  $T$ ) καθώς και για duty cycle.

Τα προαναφερόμενά πειράματα επαναλαμβάνονται με μείωση της περιόδου  $T$  ώστε να διαπιστωθεί εάν υπάρχει δυνατότητα πρόκλησης διαταραχών με διαφορετικούς συνδυασμούς ( $\tau$ ,  $T$ ).

### 2.2.6 Αλλαγή προσανατολισμού

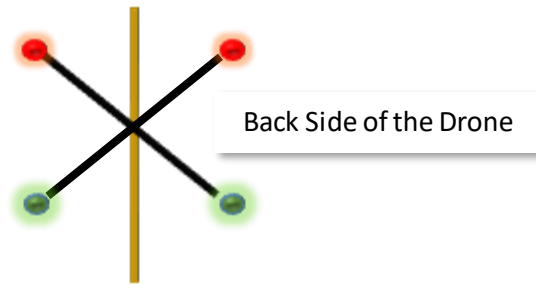
Τα προκαταρκτικά πειράματα, υποδεικνύουν ότι η γωνία πρόσπτωσης καθώς και η πόλωση του ακτινοβολούμενου πεδίου είναι ένας παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η πρόκληση διαταραχών. Η περιστροφή της κεραίας εκπομπής ETS 3106 B, για την προσομοίωση των διαφορετικών περιπτώσεων πόλωσης και γωνιών πρόσπτωσης είναι σχετικά δύσκολη καθώς η κεραία έχει αρκετά μεγάλες διαστάσεις. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε ότι αντί της κεραίας θα ήταν πιο λειτουργικό και γρήγορο, να αλλάζει ο προσανατολισμός του MEEO. Μάλιστα, με τον τρόπο αυτό θα προσομοιωθούν καλύτερα οι πραγματικές συνθήκες πτήσης, καθώς όταν το MEEO εκτεθεί σε ακτινοβολία εν ώρα πτήσης, τα χαρακτηριστικά της πόλωσης και της διεύθυνσης πρόσπτωσης δεν είναι σταθερά.

Το MEEO βρίσκεται ασφαλισμένο πάνω σε ένα πλαστικό τρίποδο, έτσι είναι εύκολο να το επανατοποθετηθεί με διαφορετικό προσανατολισμό. Τα MEEO διαθέτουν από το εργοστάσιο τέσσερα λαμπάκια LED, τα οποία βοηθούν τον χρήστη να κατανοεί καλύτερα την κατεύθυνση κίνησης του drone στον ουρανό. Βρίσκονται στους τέσσερις βραχίονες, ένα στον καθένα. Κόκκινα στους βραχίονες της αριστερής πλευράς και πράσινα στους βραχίονες της δεξιάς πλευράς. Στην υπό-ενότητα αυτή θα ορισθούν και θα ονοματιστούν οι διαφορετικοί προσανατολισμοί που εξετάστηκαν στα πειράματα.

Οι διαφορετικοί προσανατολισμοί :

### 1. **DOWN<sub>A</sub>**

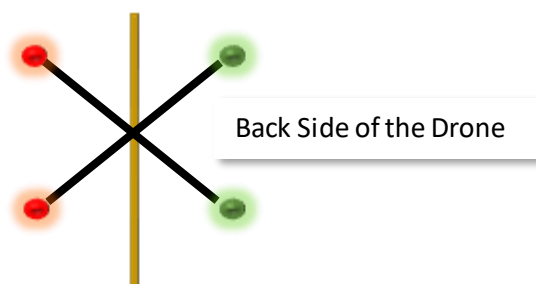
Στον προσανατολισμό με το κωδικό όνομα DOWN<sub>A</sub>, το MEEO βρίσκεται ασφαλισμένο στο πλαϊνό μέρος του ιστού του τρίποδου. Το κάτω μέρος του “κοιτάζει” προς την κεραία, ενώ τα LED στους βραχίονες του, έχουν την εξής θέση. Τα δύο πράσινα βρίσκονται στην κάτω πλευρά, ενώ τα δύο κόκκινα στην επάνω, όπως το κοιτάζουμε από την κεραία προς το τρίποδο.



Εικόνα 2.25 Σχηματική απόδοση, της όψης του MEEO σε προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub> από την οπτική γωνία της κεραίας.

### 2. **DOWN<sub>B</sub>**

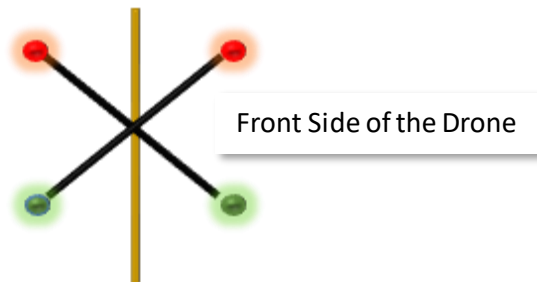
Στον προσανατολισμό με το κωδικό όνομα DOWN<sub>B</sub>, το κάτω μέρος του MEEO “κοιτάζει” προς την κεραία (όπως στην περίπτωση DOWN<sub>A</sub>) ενώ τα LED στους βραχίονες του, έχουν την εξής θέση. Τα δύο πράσινα βρίσκονται στην δεξιά πλευρά, ενώ τα δύο κόκκινα στην αριστερή, όπως κοιτάζουμε από την κεραία προς το τρίποδο. Ουσιαστικά, αυτή η τοπολογία διαφοροποιείται έναντι της DOWN<sub>A</sub> κατά μία περιστροφή 90°. Η διαφοροποίηση αυτή ισοδυναμεί με μία στροφή πόλωσης κατά 90° έναντι της τοπολογίας DOWN<sub>A</sub>.



Εικόνα 2.26 Σχηματική απόδοση, της όψης του MEEO σε προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub> από την οπτική γωνία της κεραίας.

### 3. $UP_A$

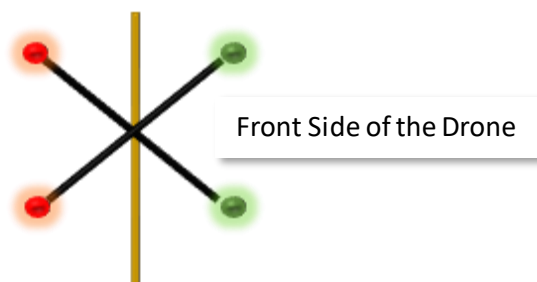
Στον προσανατολισμό με το κωδικό όνομα  $UP_A$ , το πάνω μέρος του ΜΕΕΟ “κοιτάζει” προς την κεραία, ενώ τα LED στους βραχίονες του, έχουν την εξής θέση. Τα δύο πράσινα βρίσκονται στην κάτω πλευρά, ενώ τα δύο κόκκινα στην επάνω, όπως κοιτάζουμε από την κεραία προς το τρίποδο.



Εικόνα 2.27 Σχηματική απόδοση, της όψης του ΜΕΕΟ σε προσανατολισμό  $UP_A$  από την οπτική γωνία της κεραίας.

### 4. $UP_B$

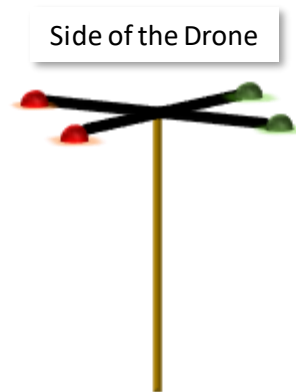
Στον προσανατολισμό με το κωδικό όνομα  $UP_B$ , το πάνω μέρος του ΜΕΕΟ “κοιτάζει” προς την κεραία (όπως στην περίπτωση του  $UP_A$ ) ενώ τα LED στους βραχίονες του, έχουν την εξής θέση. Τα δύο πράσινα βρίσκονται στην δεξιά πλευρά, ενώ τα δύο κόκκινα στην αριστερή, όπως κοιτάζουμε από την κεραία προς το τρίποδο. Ουσιαστικά, ο προσανατολισμός  $UP_B$  προκύπτει με περιστροφή  $90^\circ$  του προσανατολισμού  $UP_A$ . Η διαφοροποίηση αυτή ισοδυναμεί με μία στροφή πόλωσης κατά  $90^\circ$  έναντι της τοπολογίας  $UP_A$ .



Εικόνα 2.28 Σχηματική απόδοση, της όψης του drone, σε προσανατολισμό  $UP_B$ , από την οπτική γωνία της κεραίας, ασφαλισμένο στο τρίποδο.

## 5. **SIDE<sub>A</sub>**

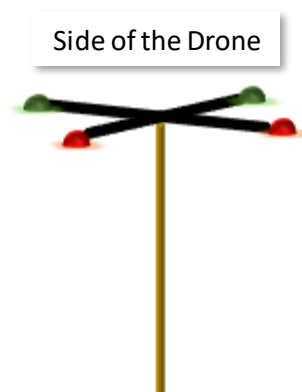
Στον προσανατολισμό με το κωδικό όνομα SIDE<sub>A</sub>, το MEEO τοποθετείται σε οριζόντια θέση. Στην διάταξη αυτή το πλαϊνό μέρος του “κοιτάζει” προς την κεραία ενώ τα LED στους βραχίονες του, έχουν την εξής θέση. Τα δύο πράσινα βρίσκονται στην δεξιά πλευρά, ενώ τα δύο κόκκινα στην αριστερή, όπως κοιτάζουμε από την κεραία προς το τρίποδο.



Εικόνα 2.29 Σχηματική απόδοση, της όψης του drone σε προσανατολισμό SIDE<sub>A</sub> από την οπτική γωνία της κεραίας.

## 6. **SIDE<sub>B</sub>**

Στον προσανατολισμό με το κωδικό όνομα SIDE<sub>B</sub>, το MEEO τοποθετείται οριζόντια με περιστροφή κατά 90° έναντι της περίπτωσης SIDE<sub>A</sub>. Στην διάταξη αυτή το πλαϊνό μέρος του “κοιτάζει” προς την κεραία ενώ τα LED στους βραχίονες του, έχουν την εξής θέση. Τα δύο πράσινα βρίσκονται στην πίσω πλευρά, στην πλευρά που βρίσκεται πιο μακριά από την κεραία, ενώ τα δύο κόκκινα στην μπροστινή, στην πλευρά που είναι πιο κοντά στην κεραία, όπως κοιτάζουμε από την κεραία προς το τρίποδο.



Εικόνα 2.30 Σχηματική απόδοση, της όψης του drone, σε προσανατολισμό SIDE<sub>B</sub>, από την οπτική γωνία της κεραίας, ασφαλισμένο στο τρίποδο.



### 2.2.7 Διερεύνηση Τρωτότητας

Μετά το πέρας όλων των προαναφερόμενων πειραματικών ελέγχων έχει σχηματιστεί μια αρκετά πλήρης εικόνα για το εάν κάποιο ΜΕΕΟ επηρεάζεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και κυρίως κάτω υπό ποιες συνθήκες συμβαίνει αυτό. Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε να διερευνηθεί εντοπιστούν ο λόγος ή οι λόγοι, στους οποίους οφείλεται η διαταραχή των ελεγχόμενων ΜΕΕΟ. Η πρόκληση διαταραχών σημαίνει ότι σε κάποιο σημείο του, όπως είναι η πλακέτα, κάποιο εξάρτημα, κάποιο καλώδιο, η κεραία και άλλα να λειτουργεί ως άτυπο σημείο λήψης και οδήγησης του σήματος διαταραχής σε κάποιο κρίσιμο για τη λειτουργία του ΜΕΕΟ υποσύστημα. Έγινε προσπάθεια, μέσα από αποσυναρμολόγηση των ΜΕΕΟ, να βρεθούν τα κομμάτια τα οποία οδηγούν στην τρωτότητα.

Συγκεκριμένα, τα ΜΕΕΟ ανοίχθηκαν και έγινε έρευνα για το ποια μέρη τους θα μπορούσαν να έχουν συμβατή πόλωση με το πεδίο. Αρχικά, εντοπίστηκαν τα μέρη, τα οποία θα μπορούσαν να έχουν πιο ξεκάθαρα τέτοια πόλωση από αλλά, Στην συνέχεια ελέγχθηκε στο ιστορικό των μετρήσεων μας σε ποια τεστ υπήρξε επιρροή και τι προσανατολισμό είχε το ΜΕΕΟ. Μετά εξετάστηκε το κάθε πιθανό μέρος ξεχωριστά, δηλ. επιλέχθηκε ένα πιθανό σημείο, π.χ. η κεραία, και το ΜΕΕΟ τοποθετήθηκε σε προσανατολισμό όπου έχουν εντοπιστεί παρεμβολές. Στη συνέχεια, το κάθε φορά επιλεγμένο εξάρτημα τοποθετήθηκε με προσανατολισμό, τέτοιο ώστε να έχει ασύμβατη πόλωση με το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκπομπή με σάρωση συχνοτήτων στο εύρος 200 MHz – 1000 MHz και καταγράφηκαν τα αποτελέσματα. Εάν το ΜΕΕΟ επηρεαζόταν αυτό σήμαινε ότι το υπό έλεγχο εξάρτημα δεν είναι το τρωτό σημείο του και υπάρχουν άλλα τρωτά σημεία, τα οποία θα πρέπει να δοκιμαστούν και να αποκλειστούν ένα προς ένα για βγει πόρισμα. Εάν το ΜΕΕΟ δεν επηρεαστεί τότε αυτό σημαίνει ότι το ελεγχόμενο εξάρτημα αποτελεί ως σημείο σύζευξης της ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό έγινε μια προσπάθεια εμβάθυνσης σε ότι αφορά την κατασκευή των ΜΕΕΟ και εύρεσης της πηγής του προβλήματος που δημιουργεί την αστοχία στην ατρωσία τους.

### 2.3 Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας

Στην ενότητα αυτή καταγράφονται τα αποτελέσματα, τα οποία εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, όπως αυτή περιγράφεται στις ενότητες 2.2.2 έως 2.2.6. Τα αποτελέσματα κατηγοριοποιούνται ανά συσκευή: αρχικά αναφέρονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, τα οποία αφορούν το Syma X5HW και συνέχεια αυτά τα οποία αφορούν στο Nova Pro. Καταγράφονται με την μορφή πινάκων, για κάθε τεστ ξεχωριστά.

Στις επόμενες παραγράφους χρησιμοποιούνται οι παρακάτω κωδικές φράσεις για την περιγραφή του αποτελέσματος, το οποίο προέκυψε μετά την ακτινοβολήση του MEEO καθώς και το είδος της πειραματικής διαδικασίας:

- **Error 1** Η κωδική φράση «Error 1» περιγράφει την κατάσταση κατά την οποία οι κινητήρες του MEEO έχουν παύσει να λειτουργούν και το MEEO δεν ανταποκρίνεται σε καμία εντολή του χειριστήριου. Για να ανταποκριθεί ξανά σε εντολές θα πρέπει να γίνει επαναφορά ( reset), τόσο του χειριστήριου, όσο και του drone, με την χρήση των διακοπών ON/OFF της τροφοδοσίας. Στην περίπτωση του Syma X5HW τα LED φώτα πλοήγησης αναβοσβήνουν. Στην περίπτωση του Nova Pro, αναβοσβήνουν τα δύο LED εντολών, ενώ τα LED πλοήγησης είναι σταθερά.
- **Error 2** Η κωδική φράση «Error 2» περιγράφει τη κατάσταση κατά την οποία οι κινητήρες του έχουν παύσει να λειτουργούν, όμως με την εκπομπή νέας εντολής από το χειριστήριο, το MEEO επανέρχεται σε κατάσταση φυσιολογικής λειτουργίας χωρίς να απαιτείται reset στο χειριστήριο και στο drone. Τα LED φώτα πλοήγησης του Syma X5HW και του Nova Pro υποδεικνύουν φυσιολογική λειτουργία δηλ. είναι σταθερά.
- **No error** Η κωδική φράση «No Error» περιγράφει την κατάσταση κατά την οποία το MEEO έμεινε πλήρως ανεπηρέαστο, δηλαδή οι κινητήρες συνέχισαν να λειτουργούν κανονικά και όλα τα LED που διαθέτουν τα MEEO υποδεικνύουν φυσιολογική λειτουργία.
- **Γενικά Πειράματα:** Η κωδική φράση περιγράφει τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν με σάρωση συχνοτήτων με στόχο την εύρεση των πλέον ευαίσθητων συχνοτήτων με εύρος 100 MHz. Κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων Μετά από την φράση αυτή δίνονται πληροφορίες για την απόσταση και τον προσανατολισμό του MEEO.
- **Στοχευμένα Πειράματα:** Η κωδική φράση αναφέρεται στα πειράματα τα οποία γίνονται σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων, π.χ. ανά 50 MHz, στις οποίες φάνηκε ότι υπάρχει διαταραχές και γίνονται πειράματα με χρήση χαμηλής ισχύος για να προκύψουν οι πιο ευαίσθητες περιοχές. Μετά από την φράση αυτή δίνονται πληροφορίες για την απόσταση και τον προσανατολισμό του drone, σε σχέση με τη κεραία ακτινοβολίας.

- **Πειράματα Μεμονωμένης Συχνότητας:** Η κωδική φράση αναφέρεται στα πειράματα σε συγκεκριμένες συχνότητες, χωρίς χρήση της λειτουργίας σάρωσης, για να γίνει η εύρεση της πιο ευαίσθητης συχνότητας. Μετά από την φράση αυτή δίνονται πληροφορίες για την απόσταση και τον προσανατολισμό του drone, σε σχέση με τη κεραία ακτινοβολίας.
- **Πειράματα Μεμονωμένου Παλμού:** Η κωδική φράση αυτή αναφέρεται στα πειράματα, όπου εξετάζεται εάν ένα μεμονωμένος παλμός είναι ικανός να προκαλέσει διαταραχές. Γίνεται έλεγχος με διαφορετικές διάρκειες παλμών. Μετά από την φράση αυτή δίνονται πληροφορίες για την απόσταση και τον προσανατολισμό του drone, σε σχέση με τη κεραία ακτινοβολίας.
- **Πειράματα Πολλαπλών Παλμών:** Η κωδική φράση αναφέρεται στα πειράματα, όπου εξετάζεται αν οι πολλαπλοί παλμοί είναι ικανοί να επιφέρουν αποτελέσματα ή ακόμα και διαφορετικά αποτελέσματα από τους μεμονωμένους. Γίνεται έλεγχος με διαφορετικές διάρκειες παλμών και περιόδους του σήματος. Μετά από την φράση αυτή δίνονται πληροφορίες για την απόσταση και τον προσανατολισμό του drone, σε σχέση με τη κεραία ακτινοβολίας.

## 2.4 Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας του Syma X5HW

### Προσανατολισμός UPA Απόσταση 1 m

Ο Πίνακας 2.8 καταγράφει τα αποτελέσματα των πειραμάτων σάρωσης συχνοτήτων σε ζώνες εύρους 100 MHz. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το Syma εμφανίζει εξασθενημένη ατρωσία σε ένα εύρος συχνοτήτων 300-500 MHz.

Πίνακας 2.8 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 1m - προσανατολισμός UPA.

Γενικά Πειράματα σε απόσταση 1 m, Τοπολογία UPA			
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς Οδήγησης (dBm)	Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)	Αποτέλεσμα
200 - 300	0	10	No error
200 - 300	-3	10	No error
200 - 300	-6	10	No error
200 - 300	-10	10	No error
300 - 400	0	10	Error 1
300 - 400	-10	10	Error 1
300 - 400	-13	10	Error 1
300 - 400	-16	10	Error 1
300 - 400	-20	10	No error
400 - 500	0	10	Error 1
400 - 500	-13	10	Error 1
400 - 500	-13	20	Error 1
400 - 500	-16	20	Error 1
400 - 500	-20	20	No error
500 - 600	0	20	No error
500 - 600	-3	20	No error
500 - 600	-6	20	No error
600 - 700	0	20	No error
700 - 800	0	20	No error
800 - 900	0	20	No error
900 - 1000	0	20	No error

Ο Πίνακας 2.9 καταγράφει τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από μία πιο στοχευμένη σάρωση συχνοτήτων σε ένα εύρος συχνοτήτων 50 MHz. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το εύρος συχνοτήτων μειωμένης ατρωσίας εντοπίζεται σε ένα μικρότερο εύρος συχνοτήτων 350-450 MHz.

Πίνακας 2.9 Αποτελέσματα στοχευμένων πειραμάτων: απόσταση 1m - προσανατολισμός UPA.

<b>Στοχευμένα Πειράματα σε απόσταση 1 m και προσανατολισμό UPA</b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
300 - 350	-16	10	No error
350 - 400	-16	10	Error 1
400 - 450	-13	10	No error
400 - 450	-13	20	Error 2
450 - 500	-13	10	No error
450 - 500	-13	20	No error
450 - 500	-10	20	No error
450 - 500	-6	20	Error 1

### **Αλλαγή σε απόσταση 2 μέτρων**

Δεδομένου ότι στην απόσταση του 1m επιτεύχθηκαν σοβαρές διαταραχές με ιδιαίτερα χαμηλή ισχύ (-13 dBm) αποφασίστηκε να μην εξεταστεί η απόσταση των 2 μέτρων και να συνεχίσουν τα πειράματα απευθείας στα 3 μέτρα. Σε αυτό το σημείο σημειώνεται ότι τα 3 m είναι η μέγιστη απόσταση μετρήσεων του ανηχοϊκού θαλάμου και είναι επιθυμητό να διεξαχθούν τα πειράματα σε αυτήν την απόσταση προκειμένου να προσεγγιστούν τουλάχιστον για κάποιες συχνότητες η συνθήκες του μακρινού πεδίου (far field). Η διεξαγωγή πειραμάτων στα 2 m αποτελεί αναγκαστική επιλογή, εφόσον τα πειράματα στην απόσταση των 3 m δεν αναδεικνύουν φαινόμενα διαταραχών. Η απόφαση αποδείχθηκε ορθή, καθώς εντοπίστηκαν φαινόμενα διαταραχών στην απόσταση των 3 μέτρων, όπως δείχνουν οι ακόλουθοι Πίνακες.

**Αλλαγή σε απόσταση 3 μέτρων**

Ο Πίνακας 2.10 καταγράφει τα αποτελέσματα των πειραμάτων σάρωσης συχνοτήτων σε ζώνες εύρους 100 MHz. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το Syma εμφανίζει εξασθενημένη ατρωσία σε ένα εύρος συχνοτήτων 300-500 MHz, όπως ακριβώς παρατηρήθηκε στα αντίστοιχα πειράματα σε απόσταση 1 m.

Πίνακας 2.10 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός U<sub>A</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό U<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
200 - 300	0	10	No error
300 - 400	0	10	Error 1
400 - 500	0	10	Error 1
500 - 600	0	10	No error
600 - 700	0	10	No error
700 - 800	0	10	No error
800 - 900	0	10	No error
900 -1000	0	10	No error

Ο Πίνακας 2.11 καταγράφει τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από μία πιο στοχευμένη σάρωση συχνοτήτων σε ένα εύρος συχνοτήτων 50 MHz. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το εύρος συχνοτήτων μειωμένης ατρωσίας εντοπίζεται σε ένα μικρότερο εύρος συχνοτήτων 350-450 MHz. Καταρχάς φαίνεται ότι η ζώνη 350-400 MHz επιδεικνύει μειωμένη ατρωσία αλλά λόγω σάρωσης δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί εάν αυτό σε μία μεμονωμένη συχνότητα ή αποτελεί προϊόν συσσώρευσης σε πολλαπλές συχνότητες.

<b>Πίνακας 2.11 Αποτελέσματα στοχευμένων πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός U<sub>A</sub>. Στοχευμένα Πειράματα σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό U<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
350-400	0	10	Error 1
350-400	-3	10	Error 1

350-400	-6	10	Error 1
350-400	-10	10	No error
400-450	0	10	Error 1
400-450	-3	10	No error
450-500	0	10	No error

Η διευκρίνιση του ερωτήματος, το οποίο αναδεικνύεται από τον Πίνακα 2.11, υποστηρίζεται από τα πειράματα του Πίνακα 2.12. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.12 φαίνεται ότι το εύρος συχνοτήτων, στο οποίο εμφανίζονται διαταραχές είναι μεγαλύτερο στη ζώνη 350 – 400 MHz, ενώ στην επόμενη ζώνη συχνοτήτων (400-450 MHz) τα φαινόμενα εντοπίζονται στη ζώνη 400-410 MHz.

Πίνακας 2.12 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένης συχνότητας: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>A</sub>. Πείραμα Μεμονωμένης Συχνότητας σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό UP<sub>A</sub>

Συχνότητα (MHz)	Ισχύς ( dBm)	Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)	Αποτελέσματα
450	0	10	No error
440	0	10	No error
430	0	10	No error
420	0	10	No error
410	0	10	Error 1
400	0	10	Error 1
390	0	10	Error 1
380	0	10	Error 1
370	0	10	Error 1
360	0	10	No error
350	0	10	No error

Τα πειραματικά αποτελέσματα του Πίνακα 2.13 διερευνούν σε επίπεδο ελέγχων μεμονωμένης συχνότητας την ατρωσία του Syma προκειμένου να εντοπιστεί η συχνότητα με την πλέον εξασθενημένη ατρωσία. Σύμφωνα, με τα αποτελέσματα οι συχνότητες 380 MHz και 390 MHz εμφανίζουν ισοδύναμα αποτελέσματα αλλά δεδομένου ότι η συχνότητα 380 MHz καταλαμβάνει μία πιο κεντρική θέση (φαινόμενα παρεμβολών εντοπίζονται σε χαμηλότερες αλλά και υψηλότερες συχνότητες του 380 MHz) θεωρείται ως η συχνότητα ενδιαφέροντος για περαιτέρω διερεύνηση.

Πίνακας 2.13 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένης συχνότητας: απόσταση 3 m - προσανατολισμός U<sub>P</sub>A.

<b>Πείραμα Μεμονωμένης Συχνότητας σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό U<sub>P</sub>A</b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
370	-6	1	No error
370	-6	5	No error
370	-6	10	Error 2
380	0	1	No error
380	-6	1	No error
380	-6	5	Error 1
390	-6	5	Error 1
400	-6	5	No error
410	-6	5	No error

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.14 αφορούν την επιλεγμένη συχνότητα 380 MHz σε συνθήκες παλμικής ακτινοβολίας. Ειδικότερα, διερευνάται η επίδραση του αριθμού των παλμών, οι οποίοι είναι αναγκαίοι προκειμένου να εμφανιστούν διαταραχές στη λειτουργία του Syma. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει ότι με τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ (0 dBm) είναι εφικτό να προκληθεί σοβαρή διαταραχή στη λειτουργία του MEEO ακόμη και με έναν μεμονωμένο παλμό.

Πίνακας 2.14 Αποτελέσματα ελέγχου της επιρροής του αριθμού των παλμών: απόσταση 3 m – προσανατολισμός U<sub>P</sub>A.

<b>Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό U<sub>P</sub>A, Περίοδος T= 5 sec, Διάρκεια Παλμού τ= 1 sec</b>				
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς (dBm)</b>	<b>Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)</b>	<b>Αριθμός Παλμών</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
380	0	40	8	Error 1
380	0	25	5	Error 1
380	0	15	3	Error 1
380	0	10	2	Error 1
380	0	5	1	Error 1



Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.15 εστιάζουν στην περίπτωση του μεμονωμένου παλμού προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχει απαίτηση ελάχιστης διάρκειας προκειμένου να προκληθεί διαταραχή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο παλμός πρέπει να έχει διάρκεια τουλάχιστον 5 sec.

Πίνακας 2.15 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός  $UP_A$ .

<b>Πείραμα Μεμονωμένου Παλμού σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό <math>UP_A</math></b>				
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς ( dBm)	Περίοδος (sec)	Διάρκεια Παλμού (sec)	Αποτελέσματα
380	0	20	5	Error 1
380	0	20	1	No error

Ο Πίνακας 2.16 καταγράφει τα αποτελέσματα των πειραμάτων με ακτινοβολία πολλαπλών παλμών προκειμένου να διερευνηθεί η συνδυασμένη επίδραση της συχνότητας επανάληψης των παλμών και της διάρκειας του παλμού. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει ότι με την αύξηση της συχνότητας επανάληψης παλμών στο 1 kHz (περίοδος 1 ms), η απαίτηση ως προς τη διάρκεια του παλμού μειώνεται έως και το επίπεδο των 20 ns.

Πίνακας 2.16 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός  $UP_A$ .

<b>Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό <math>UP_A</math></b>						
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς ( dBm)	Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)	Περίοδος (sec)	Διάρκεια Παλμού	Duty cycle (%)	Αποτελέσματα
380	0	10	2 sec	1 sec	50	Error 1
380	0	10	2 sec	500 ms	25	Error 1
380	0	10	2 sec	100 ms	5	Error 1
380	0	10	2 sec	10 ms	0.5	Error 1
380	0	10	2 sec	1 ms	0.05	Error 1
380	0	10	2 sec	500 $\mu$ s	0.025	Error 1
380	0	10	2 sec	100 $\mu$ s	0.005	Error 1
380	0	10	2 sec	10 $\mu$ s	0.0005	Error 1

380	0	10	2 sec	1 μs	0.00005	No error
380	0	10	1 sec	1 μs	0.0001	No error
380	0	10	200 ms	1 μs	0.0005	No error
380	0	10	100 ms	1 μs	0.001	No error
380	0	10	10 ms	1 μs	0.01	No error
380	0	10	1 ms	1 μs	0.1	Error 1
380	0	10	1 ms	500 ns	0.05	Error 1
380	0	10	1 ms	100 ns	0.01	Error 1
380	0	10	1 ms	20 ns	0.002	Error 1
380	0	2	1 ms	20 ns	0.002	Error 1

### Αλλαγή προσανατολισμού σε UP<sub>B</sub>

Ο Πίνακας 2.17 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων προκειμένου να εντοπιστούν ζώνες συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σε καμία συχνότητα στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz δεν προέκυψε διαταραχή.

Πίνακας 2.17 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός UP<sub>B</sub>.

Γενικά Πειράματα σε απόσταση 3 m, Τοπολογία UP <sub>B</sub>			
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς Οδήγησης (dBm)	Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)	Αποτέλεσμα
200-360	-3	10	No Error
370-410	-3	10	No Error
420-1000	-3	10	No Error

Οι Πίνακες 2.18 και 2.19 καταγράφουν αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού και πολλαπλών παλμών, αντίστοιχα, στη συχνότητα 380 MHz, η οποία εντοπίστηκε στα πειράματα του προσανατολισμού UP<sub>A</sub> χωρίς να προκύπτει διαταραχή της λειτουργίας του Συμα.

UP<sub>B</sub>.

<b>Πείραμα Μεμονωμένου Παλμού σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό UP<sub>B</sub></b>				
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
380	0	20 sec	5	No error
380	0	20 sec	1	No error

Πίνακας 2.19 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός

UP<sub>B</sub> .

<b>Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό UP<sub>B</sub></b>						
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς dBm</b>	<b>Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Duty cycle (%)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
380	0	10	1 ms	20 ns	0.002	No error

### Αλλαγή προσανατολισμού σε DOWN<sub>A</sub>

Ο Πίνακας 2.20 καταγράφει τα αποτελέσματα από τα γενικά πειράματα εντοπισμού συχνοτήτων με μειωμένης ατρωσίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα εντοπίστηκε η ίδια ζώνη συχνοτήτων (370 MHz – 410 MHz), όπως και στην περίπτωση του προσανατολισμού UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.20 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 3 m, Προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς Οδήγησης (dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200-360	-3	10	No error
370-410	-3	10	Error 1
420-1000	-3	10	No error

Οι Πίνακες 2.21 και 2.22 καταγράφουν αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού και πολλαπλών παλμών, αντίστοιχα, στη συχνότητα 380 MHz, η οποία επιλέχθηκε ως η συχνότητα με την πλέον μειωμένη ατρωσία. Τα αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν ταυτίζονται με αυτά τα οποία προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων σε προσανατολισμό UP<sub>A</sub>.

Πίνακας 2.21 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

<b>Πείραμα Μεμονωμένου Παλμού σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub></b>				
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
380	0	20 sec	5 sec	Error 1
380	-3	20 sec	5 sec	Error 1
380	0	20 sec	1 sec	Error 1
380	-3	20 sec	1 sec	No error

Πίνακας 2.22 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

<b>Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub></b>						
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Duty cycle (%)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
380	0	10	1 ms	20 ns	0.002	Error 1
380	0	10	10 ms	20 ns	0.0002	Error 1
380	-3	10	1 ms	20 ns	0.002	No error
380	-3	10	10 ms	20 ns	0.0002	No error

**Αλλαγή προσανατολισμού σε DOWN<sub>B</sub>**

Ο Πίνακας 2.23 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων προκειμένου να εντοπιστούν ζώνες συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σε καμία συχνότητα στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz δεν προέκυψε διαταραχή.

Πίνακας 2.23 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 3 m, Προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς Οδήγησης (dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200-360	-3	10	No error
370-410	-3	10	No error
420-1000	-3	10	No error

Οι Πίνακες 2.24 και 2.25 καταγράφουν αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού και πολλαπλών παλμών, αντίστοιχα, στη συχνότητα 380 MHz, η οποία εντοπίστηκε στα πειράματα του προσανατολισμού UP<sub>A</sub> και DOWN<sub>A</sub> χωρίς να προκύπτει διαταραχή της λειτουργίας του Syma.

Πίνακας 2.24 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

<b>Πείραμα Μεμονωμένου Παλμού σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub></b>				
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
380	0	20 sec	10 sec	No error
380	0	20 sec	5 sec	No error
380	-3	20 sec	1 sec	No error
380	0	20 sec	1 sec	No error

Πίνακας 2.25 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

<b>Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 3 m, προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub></b>						
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς (dBm)</b>	<b>Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Duty cycle (%)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
380	-3	10	1 ms	20 ns	0.002	No error
380	0	10	1 ms	20 ns	0.002	No error

### Αλλαγή προσανατολισμού σε SIDE<sub>A</sub>

Ο Πίνακας 2.26 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων προκειμένου να εντοπιστούν ζώνες συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σε καμία συχνότητα στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz δεν προέκυψε διαταραχή και ως εκ τούτου δεν υπάρχει περαιτέρω διερεύνηση.

Πίνακας 2.26 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 3 m, Προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς Οδήγησης (dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200-360	0	10	No error
370-410	0	10	No error
420-1000	0	10	No error

### Αλλαγή προσανατολισμού σε SIDE<sub>B</sub>

Ο Πίνακας 2.27 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων προκειμένου να εντοπιστούν ζώνες συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σε καμία συχνότητα στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz δεν προέκυψε διαταραχή και ως εκ τούτου δεν υπάρχει περαιτέρω διερεύνηση.

Πίνακας 2.27 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 3 m, Προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς Οδήγησης (dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200-360	0	10	No error
370-410	0	10	No error
420-1000	0	10	No error

## 2.5 Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας του Nova Pro

### Προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub> Απόσταση 1 μέτρου

Ο Πίνακας 2.28 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων στο εύρος 200 MHz – 1000 MHz προκειμένου να εντοπιστούν ζώνες συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα εντοπίζονται αρκετές ζώνες συχνοτήτων, στις οποίες προκαλούνται σημαντικές παρεμβολές. Με κριτήριο την ισχύ εκπομπής φαίνεται ότι η ζώνη 200 MHz – 300 MHz είναι το εύρος συχνοτήτων με την πλέον μειωμένη ατρωσία. Η διαπίστωση αυτή μένει να επιβεβαιωθεί με πειράματα τα οποία θα διεξαχθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις, δηλ. 2 m και 3 m.

Πίνακας 2.28 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 1 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 1 m, Προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς Οδήγησης (dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200-300	-12	10	Error 1
200-300	-9	10	Error 1
200-300	0	10	Error 1
300-400	-12	10	No error
300-400	-9	10	No error
300-400	0	10	Error 1
400-500	-9	10	No error
400-500	-6	10	Error 1
400-500	0	10	Error 1
500-600	-6	10	Error 1
500-600	-3	10	Error 1

500-600	0	10	Error 1
600-700	0	10	Error 1
700-800	0	10	No error
800-900	0	10	No error
900-1000	0	10	No error

### Απόσταση 2 μέτρων

Ο Πίνακας 2.29 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων σε απόσταση 2 m και στο εύρος 200 MHz – 1000 MHz προκειμένου να εντοπιστούν ζώνες συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία. Όπως είναι αναμενόμενο η εξασθένηση της έντασης του ΗΜ πεδίου περιορίζει το εύρος συχνοτήτων μειωμένης ατρωσίας σε δύο ζώνες: 200 MHz – 300 MHz και 500 MHz – 600 MHz.

Πίνακας 2.29 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, Προσανατολισμός DOWN <sub>A</sub>			
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς Οδήγησης (dBm)	Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)	Αποτέλεσμα
200-300	0	10	Error 1
300-400	0	10	No error
400-500	0	10	No error
500-600	0	10	Error 1
600-700	0	10	No error
700-800	0	10	No error
800-900	0	10	No error
900-1000	0	10	No error

### Απόσταση 3 μέτρων

Ο Πίνακας 2.30 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων σε απόσταση 3 m και στο εύρος 200 MHz – 1000 MHz προκειμένου να εντοπιστούν ζώνες συχνοτήτων με μειωμένη ατρωσία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η εξασθένηση του ΗΜ Πεδίου λόγω της μετακίνησης από τα 2 m στα



3 m ξεπερνά το κρίσιμο εκείνο κατώφλι, το οποίο αποτελεί προϋπόθεση για την πρόκληση διαταραχών. Συνεπώς, στα 3 m δεν υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω διερεύνησης και τα πειράματα συνεχίζονται με στοχευμένους ελέγχους στα 2 m.

Πίνακας 2.30 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 3 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 3 m, Προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς Οδήγησης (dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200-300	0	10	No error
300-400	0	10	No error
400-500	0	10	No error
500-600	0	10	No error
600-700	0	10	No error
700-800	0	10	No error
800-900	0	10	No error
900-1000	0	10	No error

### Απόσταση 2 μέτρων

Ο Πίνακας 2.31 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων με μεταβλητή ισχύ εκπομπής στις δύο ζώνες συχνοτήτων 200 MHz – 300 MHz και 500 MHz – 600 MHz, οι οποίες εντοπίστηκαν κατά το γενικό έλεγχο στην απόσταση των 2 m. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η ζώνη συχνοτήτων 200 MHz – 300 MHz αποδεικνύεται ως αυτή με την πλέον μειωμένη ατρωσία. Η διαπίστωση αυτή μένει να επιβεβαιωθεί και με τη διεξαγωγή πειραμάτων σε μεμονωμένες συχνότητες.

Πίνακας 2.31 Αποτελέσματα στοχευμένων πειραμάτων: απόσταση 2 m – προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>

<b>Στοχευμένα Πειράματα σε απόσταση 2 m και προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>

200-300	-3	10	Error 1
200-300	-6	10	Error 1
200-300	-9	10	Error 1
500-600	-3	10	Error 2
500-600	-6	10	No error

Ο Πίνακας 2.32 καταγράφει τα πειραματικά αποτελέσματα σε μεμονωμένες συχνότητες στο εύρος 200 MHz-300 MHz. Η συγκριτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων αποδεικνύει ότι στη συχνότητα των 290 MHz το Nova Pro επιδεικνύει τη μικρότερη ατρωσία. Συνεπώς, η συχνότητα των 290 MHz επιλέγεται για περαιτέρω διερεύνηση.

Πίνακας 2.32 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένης συχνότητας (200 MHz-300 MHz):  
απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

<b>Πείραμα Μεμονωμένης Συχνότητας σε απόσταση 2 m και προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
200	-6	5	No error
210	-6	5	No error
220	-6	5	No error
230	-6	5	No error
240	-6	5	No error
250	-6	5	No error
260	-6	5	No error
270	-6	5	No error
280	-6	5	No error
290	-6	5	Error 1
300	-6	5	No error

Ο Πίνακας 2.33 καταγράφει τα πειραματικά αποτελέσματα σε μεμονωμένες συχνότητες στο εύρος 500 MHz-600 MHz. Η ισχύς εκπομπής ρυθμίστηκε στα – 6 dBm, διότι με αυτήν την ισχύ έχουν ήδη προκληθεί σοβαρές διαταραχές στη συχνότητα των 290 MHz. Δεδομένου ότι με αυτήν την ισχύ δεν προκλήθηκαν σοβαρές διαταραχές στο εύρος συχνοτήτων 500 MHz-600 MHz, προκύπτει αβίαστα το συμπέρασμα ότι ο αρχικός χαρακτηρισμός της ζώνης 200 MHz - 300 MHz ως την πλέον

προνομιακή είναι ορθός. Συνεπώς, η περαιτέρω διερεύνηση θα περιοριστεί στη συχνότητα των 290 MHz.

Πίνακας 2.33 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένης συχνότητας (500 MHz-600 MHz): απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

<b>Πείραμα Μεμονωμένης Συχνότητας σε απόσταση 2 m και προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
500	-6	5	No error
510	-6	5	No error
520	-6	5	No error
530	-6	5	No error
540	-6	5	No error
550	-6	5	No error
560	-6	5	No error
570	-6	5	No error
580	-6	5	No error
590	-6	5	No error
600	-6	5	No error

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.34 η πρόκληση σοβαρών διαταραχών στα 290 MHz είναι εφικτή με την εκπομπή ενός μεμονωμένου παλμού αλλά με την προϋπόθεση ότι αυτός διαρκεί κατ' ελάχιστο 1 sec.

Πίνακας 2.34 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

<b>Πείραμα Μεμονωμένου Παλμού σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub></b>				
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
290	0	20	1 sec	Error 1
290	0	20	500 ms	No error
290	0	20	700 ms	No error

Τα πειράματα με ακολουθία παλμών του Πίνακα 2.35 αποδεικνύουν ότι μπορούν να προκληθούν σοβαρές διαταραχές ακόμη και με παλμούς διάρκειας ορισμένων μs αρκεί αυτό να συνδυάζεται μία ικανοποιητικά υψηλή συχνότητα επανάληψης παλμών.

Πίνακας 2.35 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN <sub>A</sub>						
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς ( dBm)	Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)	Περίοδος (sec)	Διάρκεια Παλμού (sec)	Duty cycle (%)	Αποτελέσματα
290	0	10	1 ms	20 ns	0.002	No error
290	0	10	1 sec	500 ms	50	Error 1
290	0	10	1 sec	100 ms	10	Error 1
290	0	10	1 sec	10 ms	1	Error 1
290	0	10	1 ms	100 ns	0.01	No error
290	0	10	10 ms	1 μs	0.00001	No error
290	0	10	1 ms	500 ns	0.05	No error
290	0	10	1 ms	1 μs	0.0001	No error
290	0	10	1 ms	500 μs	50	Error 1
290	0	10	1 ms	100 μs	10	Error 1
290	0	10	1 ms	10 μs	1	Error 1
290	0	10	1 ms	1 μs	0.1	No error

### Αλλαγή προσανατολισμού σε DOWN<sub>B</sub>

Ο Πίνακας 2.36 καταγράφει τα αποτελέσματα από τη σάρωση συχνοτήτων στο εύρος 200 MHz – 1000 Mz, η οποία καταδεικνύει αδυναμία πρόκλησης σοβαρών διαταραχών. Προς επιβεβαίωση αυτής της διαπίστωσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα μεμονωμένου (Πίνακας 2.37) και πολλαπλών παλμών (Πίνακας 2.38) στη συχνότητα 290 MHz, τα οποία επιβεβαίωσαν τα συμπεράσματα από τον έλεγχο με σάρωση συχνοτήτων. Ως εκ τούτου στον προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub> δεν πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειράματα.

Πίνακας 2.36 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς Οδήγησης ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200-320	-3	10	No error
320-400	-3	10	No error
400-1000	-3	10	No error

Πίνακας 2.37 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

<b>Πείραμα Μεμονωμένου Παλμού σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub></b>				
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
290	0	20 sec	10 sec	No error
290	0	20 sec	5 sec	No error
290	0	20 sec	1 sec	No error
290	0	20 sec	500 ms	No error

Πίνακας 2.38 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

<b>Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub></b>						
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Duty cycle (%)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
290	0	10	1 ms	10 μs	0.002	No error
290	0	10	1 ms	100 μs	0.002	No error
290	0	10	1 ms	500 μs	50	No error
290	0	10	1 sec	10 ms	0.1	No error
290	0	10	1 sec	100 ms	10	No error
290	0	10	1 sec	500 ms	50	No error
290	0	10	1 sec	800 ms	80	No error

### Αλλαγή προσανατολισμού σε SIDE<sub>A</sub>

Ο Πίνακας 2.39 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων σε όλο το υπό έλεγχο εύρος. Όπως και στην περίπτωση του προσανατολισμού DOWN<sub>A</sub>, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη ζώνη 200 MHz – 300 MHz ως αυτή με την πλέον μειωμένη ατρωσία.

Πίνακας 2.39 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>.

Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, Προσανατολισμός SIDE <sub>A</sub>			
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς Οδήγησης (dBm)	Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)	Αποτέλεσμα
200-320	-3	10	Error 1
320-400	-3	10	No error
400-1000	-3	10	No error

Ο Πίνακας 2.40 καταδεικνύει ότι η έκθεση του Nova Pro σε ακτινοβολία ακολουθίας παλμών μπορεί να προκαλέσει σοβαρές διαταραχές αρκεί να υιοθετηθεί ο κατάλληλος συνδυασμός διάρκειας παλμού και συχνότητα επανάληψης παλμών.

Πίνακας 2.40 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>.

Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό SIDE <sub>A</sub>						
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς (dBm)	Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)	Περίοδος (sec)	Διάρκεια Παλμού (sec)	Duty cycle (%)	Αποτελέσματα
290	0	10	1 ms	10 μs	1	No error
290	0	10	1 ms	100 μs	10	Error 1

### Αλλαγή προσανατολισμού σε SIDE<sub>B</sub>

Ο Πίνακας 2.41 καταγράφει τα αποτελέσματα της σάρωσης συχνοτήτων στο εύρος 200 MHz – 1000 MHz καταλήγοντας σε ταυτόσημα αποτελέσματα με την περίπτωση του προσανατολισμού SIDE<sub>A</sub>. Η επιπλέον διερεύνηση σε ότι αφορά τη σημασία της διάρκειας του παλμού και της συχνότητας επανάληψης παλμών (Πίνακας 2.42) επιβεβαιώνει την ομοιότητα των αποτελεσμάτων για τους προσανατολισμούς SIDE<sub>A</sub> και SIDE<sub>B</sub>.

Πίνακας 2.41 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>.

Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, Προσανατολισμός SIDE <sub>B</sub>			
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς Οδήγησης ( dBm)	Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)	Αποτέλεσμα
200-320	-3	10	Error 1
320-400	-3	10	No error
400-1000	-3	10	No error

Πίνακας 2.42 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>.

Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό SIDE <sub>B</sub>						
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς ( dBm)	Διάρκεια Ακτινοβολίας (sec)	Περίοδος (sec)	Διάρκεια Παλμού (sec)	Duty cycle (%)	Αποτελέσματα
290	0	10	1 ms	10 μs	1	No error
290	0	10	1 ms	100 μs	10	Error 1

## 2.6 Πειραματική διαδικασία διερεύνησης τρωτότητας των MEEO

Στην παρούσα ενότητα, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και τα μεθοδολογικά βήματα, τα οποία υιοθετήθηκαν προκειμένου να εντοπιστούν οι αιτίες της τρωτότητας των εξεταζόμενων MEEO καθώς οι πιθανές διαδρομές σύζευξης (coupling paths) ανάμεσα στις ακτινοβολούμενες παρεμβολές και τα παρεμβαλλόμενα συστήματα. Στην υπό-ενότητα 2.6.1 περιγράφεται η διαδικασία διερεύνησης για το Syma X5HW και υπό-ενότητα 2.6.2 η αντίστοιχη διαδικασία για το Nova Pro.

### 2.6.1 Τρωτότητα Syma X5HW

Τα πειραματικά αποτελέσματα για το Syma X5HW εμφανίζουν σημαντική διαφοροποίηση ανάλογα με την πόλωση του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη περαιτέρω έρευνας για την πηγή της τρωτότητας της συσκευής απέναντι στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.11, το X5HW εμφανίζει στον προσανατολισμό UP<sub>A</sub> το σφάλμα “Error 1” σε ένα εύρος συχνοτήτων 300 MHz – 500 MHz. Παρόμοια συμπεριφορά αποτυπώνεται και στα αποτελέσματα, τα οποία καταγράφονται στον Πίνακα 2.20 της ενότητας 3.3.1

για την περίπτωση του προσανατολισμού  $DOWN_A$ . Οι δύο προαναφερόμενοι προσανατολισμοί του X5HW παραπέμπουν στην ίδια πόλωση για το ΗΜ κύμα.

Ωστόσο, όταν η πόλωση αλλάξει κατά ενενήντα μοίρες, σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, όπως συμβαίνει στους προσανατολισμούς  $DOWN_B$  και  $UP_B$ , τα πειράματα στα τρία μέτρα δεν αναδεικνύουν κάποιο σφάλμα. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται στους Πίνακες 2.17 – 2.19 για τον προσανατολισμό  $UP_B$  και στους Πίνακες 2.23 – 2.25 για τον προσανατολισμό  $DOWN_B$ .

Η προαναφερόμενη διαφοροποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων ανάλογα με την πόλωση του ΗΜ Πεδίου ερμηνεύθηκε ως εξής: στο εσωτερικό του Syma X5HW, υπάρχουν πολλαπλές καλωδιώσεις, όπως είναι οι καλωδιώσεις των κινητήρων και της τροφοδοσίας, η κεραία λήψης και εκπομπής καθώς και αρκετά άλλα εξαρτήματα. Η υπόθεση είναι ότι κάποιο ή κάποια από αυτά τα εξαρτήματα λειτουργούν ως άτυπες γραμμικά πολωμένες κεραίες λήψης και ως εκ τούτου αποτελούν σημεία επαγωγής σημάτων παρεμβολής και πρόκλησης διαταραχών στο ΜΕΕΟ.

Προκειμένου να ελεγχθεί η προαναφερόμενη υπόθεση, αποσυναρμολογήθηκε το Syma και αφαιρέθηκε το άνω πλαστικό καπάκι του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.33.



Εικόνα 2.31 Το Syma X5HW έχοντας αφαιρέσει το καπάκι.



Στην φωτογραφία διακρίνονται οι καλωδιώσεις των κινητήρων, η κεντρική πλακέτα, η κεραία RF, η καλωδίωση τροφοδοσίας από την μπαταρία, καθώς και η πλακέτα ελέγχου τροφοδοσίας, όπως και η καλωδίωση από την πλακέτα ελέγχου τροφοδοσίας, προς την κεντρική.

Όλα τα προαναφερόμενα στοιχεία θεωρούνται ύποπτα και ικανά εισάγουν την παρεμβολή εφόσον η πόλωση του πεδίου είναι συμβατή. Η υπόθεση αυτή εξετάστηκε πειραματικά μέσω της μεθόδου του αποκλεισμού. Συγκεκριμένα, σε διαδοχικά πειράματα επιλέγεται ένα εξάρτημα από τα παραπάνω και τοποθετείται έτσι ώστε να έχει ασύμβατη πόλωση, με το πεδίο. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ένα πείραμα κατά το οποίο το MEOO είχε εμφανίσει διαταραχές. Εάν στο νέο αυτό πείραμα δεν εμφανιστούν διαταραχές, τότε αυτό σημαίνει πως το εξάρτημα αποτελεί σημείο σύζευξης και επαγωγής παρεμβολών. Ωστόσο επειδή μπορεί να μην είναι το μοναδικό σημείο, σε επόμενο πείραμα παραμένει τοποθετημένο στην μην ευνοϊκή θέση για την πόλωση του πεδίου και δοκιμάζεται το επόμενο ύποπτο εξάρτημα, το οποίο και αυτό τοποθετείται με κατάλληλο προσανατολισμό, ώστε να λειτουργεί σε μία κατά το δυνατόν ασύμβατη πόλωση.

Καταρχάς, εξετάστηκε η καλωδίωση των κινητήρων του Syma. Σύμφωνα με την Εικόνα 2.33 οι καλωδιώσεις είναι τοποθετημένες διαγώνια. Συνεπώς, μπορούν να λάβουν και από τις δύο πολώσεις του πεδίου, οι οποίες αντιστοιχούν στις τοπολογίες  $DOWN_A, UP_A$  και  $DOWN_B, UP_B$ . Επομένως, η φυσική τοπολογία της συγκεκριμένης καλωδίωσης είναι μερικώς συμβατή με τις δύο πολώσεις των πειραματικών ελέγχων και εκτιμάται ότι δεν μπορεί να αποτελεί σημείο σύζευξης με το ΗΜ Πεδίο.

Στην συνέχεια εξετάστηκε η κεραία λήψης και εκπομπής RF εντολών. Τοποθετήθηκε η κεραία με ασύμβατη πόλωση στο πεδίο και πραγματοποιήθηκε νέο πείραμα σάρωσης συχνοτήτων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.43 προκλήθηκε σφάλμα “Error 1” και επομένως δεν μπορεί η κεραία να αποτελεί σημείο σύζευξης με το ΗΜ πεδίο.

Πίνακας 2.43 Σάρωση συχνοτήτων με την κεραία σε ασύμβατη πόλωση.

<b>Διερεύνηση Αιτιών Πρόκλησης Παρεμβολών σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό <math>UP_A</math></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
200 – 1000	0	10	Error 1

Το επόμενο εξάρτημα που εξετάστηκε ήταν η καλωδίωση τροφοδοσίας από τη μπαταρία προς την κεντρική πλακέτα. Τοποθετήθηκε η καλωδίωση με ασύμβατη πόλωση στο πεδίο και πραγματοποιήθηκε νέο πείραμα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.44 εντοπίστηκε

σφάλμα “Error 1” και επομένως δεν μπορεί συγκεκριμένη καλωδίωση να αποτελεί σημείο σύζευξης με το ΗΜ πεδίο .

Πίνακας 2.44 Σάρωση συχνοτήτων με την καλωδίωση της μπαταρίας σε ασύμβατη πόλωση.

<b>Διερεύνηση Αιτιών Πρόκλησης Παρεμβολών σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό UP<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
200 – 1000	0	10	Error 1

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η καλωδίωση, η οποία διασυνδέει την πλακέτα του διακόπτη τροφοδοσίας με την κεντρική πλακέτα. Η καλωδίωση αυτή αποτελείται από τέσσερα καλώδια. Στους προσανατολισμούς DOWN<sub>A</sub>, UP<sub>A</sub> η καλωδίωση, οπτικά, φαίνεται ότι βρίσκεται παράλληλα με την πόλωση του πεδίου, ενώ στους προσανατολισμούς DOWN<sub>B</sub>, UP<sub>B</sub> βρίσκεται κάθετα. Για την πειραματική διερεύνηση, ξεβιδώθηκε η πλακέτα και τοποθετήθηκαν τα καλώδια ώστε να έχουν ασύμβατη πόλωση με το πεδίο. Έγινε πείραμα σε προσανατολισμό UP<sub>A</sub> και δεν προκλήθηκε καμία διαταραχή (Πίνακας 2.45). Στη συνέχεια, επαναλήφθηκε το πείραμα με την καλωδίωση τοποθετημένη αυτή την φορά σε συμβατή πόλωση με το πεδίο, όπως καταγράφεται στον Πίνακα 2.46, και προκλήθηκε σφάλμα “Error 1”. Αυτό σημαίνει ότι η καλωδίωση, η οποία φεύγει από την πλακέτα του διακόπτη τροφοδοσίας αποτελεί σημείο εισόδου των παρεμβολών στο Syma.

Πίνακας 2.45 Σάρωση συχνοτήτων με την καλωδίωση της πλακέτας τροφοδοσίας σε ασύμβατη πόλωση.

<b>Διερεύνηση Αιτιών Πρόκλησης Παρεμβολών σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό UP<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
200 – 1000	0	10	No error

Πίνακας 2.46 Σάρωση συχνοτήτων με την καλωδίωση της πλακέτας τροφοδοσίας σε συμβατή πόλωση.

<b>Διερεύνηση Αιτιών Πρόκλησης Παρεμβολών σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό UP<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
200 – 1000	0	10	Error 1

Τέλος, δοκιμάστηκε η κεντρική πλακέτα. Έχοντας πλέον τοποθετήσει όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα με ασύμβατη πόλωση δοκιμάστηκε σε προσανατολισμό  $UP_A$  και  $UP_B$ . Από τα δύο πειράματα δεν προέκυψε κάποιο φαινόμενο διαταραχής (Πίνακας 2.47 και 2.48). Επομένως, εκτιμάται ότι η κεντρική πλακέτα δεν αποτελεί πύλη εισόδου των παρεμβολών.

Πίνακας 2.47 Σάρωση συχνοτήτων με την κεντρική πλακέτα σε προσανατολισμό  $UP_A$ .

<b>Διερεύνηση Αιτιών Πρόκλησης Παρεμβολών σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό <math>UP_A</math></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
200 – 1000	0	10	No error

Πίνακας 2.48 Σάρωση συχνοτήτων με την κεντρική πλακέτα σε προσανατολισμό  $UP_B$ .

<b>Διερεύνηση Αιτιών Πρόκλησης Παρεμβολών σε απόσταση 3 m και προσανατολισμό <math>UP_B</math></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
200 – 1000	0	10	No error

### **Επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας του Syma X5HW**

Με την μέθοδο του αποκλεισμού, η οποία υιοθετήθηκε για τον εντοπισμό των διαδρομών σύζευξης των παρεμβολών, καταφέραμε να εντοπίσουμε ένα τρωτό σημείο. Ωστόσο, το τρωτό αυτό σημείο είναι πολύ ειδικό και αφορά τις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου MEEO. Με αφετηρία αυτήν τη διαπίστωση αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν εκ νέου τα τεστ της ενότητας 2.4, αυτή την φορά όμως έχοντας τοποθετήσει όλα τα ευαίσθητα εξαρτήματα του Syma με προσανατολισμό ασύμβατο στην πόλωση του πεδίου. Η επανάληψη των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε προκειμένου να εντοπιστούν επιπλέον τρωτά σημεία, τα οποία ενδεχομένως δεν θα αντιστοιχούν σε κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου MEEO και θα μπορούσαν να υπάρχουν και σε διαφορετικούς τύπους MEEO. Το πείραμα του Πίνακα 2.47 αποδεικνύει ότι στα 3 m με τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ δεν κατέστη εφικτό να προκληθούν διαταραχές με τα καλώδια τροφοδοσίας σε ασύμβατη πόλωση. Συνεπώς, κρίθηκε σκόπιμο να επαναληφθούν τα πειράματα σε απόσταση 2 m. Η μείωση της απόστασης ισχυροποιεί την ένταση του πεδίου και ενδέχεται αυτό να αποκαλύψει επιπλέον τρωτά σημεία για το MEEO.

**Προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub> Απόσταση 2 μέτρων**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.49 ο έλεγχος μέσω σάρωσης συχνοτήτων στα 2m υποδεικνύει το εύρος συχνοτήτων 300 MHz – 500 MHz ως την περιοχή με την πλέον μειωμένη ατρωσία. Η περιοχή ταυτίζεται με αυτήν, η οποία αναδείχθηκε στα πειράματα των 3m της ενότητας 2.4 αλλά στην παρούσα περίπτωση μία σειρά από εξαρτήματα έχουν τοποθετηθεί με ασύμβατο προσανατολισμό, ως προς την πόλωση του ακτινοβολούμενου πεδίου.

Πίνακας 2.49 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, Προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub></b>			
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς Οδήγησης (dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200 – 300	0	5	No error
300 – 400	0	5	Error 1
400 – 500	0	5	Error 1
500 – 600	0	5	No error
600 – 700	0	5	No error
700 – 800	0	5	No error
800 - 900	0	5	No error
900 – 1000	0	5	No error

Τα στοχευμένα πειράματα στο εύρος συχνοτήτων 300 MHz – 500 MHz αναδεικνύουν δύο ισοδύναμες συχνότητες ενδιαφέροντος στα 370 MHz και στα 380 MHz (Πίνακας 2.50). Στη συνέχεια των πειραμάτων επιλέχθηκε η περαιτέρω διερεύνηση της συχνότητας των 380 MHz (Πίνακας 2.51), δεδομένου ότι σε αυτήν τη συχνότητα διεξήχθησαν τα πειράματα της ενότητας 2.4.

Πίνακας 2.50 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

<b>Πείραμα Μεμονωμένου Παλμού σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub></b>				
<b>Συχνότητα (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Περίοδος (sec)</b>	<b>Διάρκεια Παλμού (sec)</b>	<b>Αποτελέσματα</b>
380	0	20 sec	1 sec	No error
380	0	20 sec	5 sec	Error 1
370	0	20 sec	1	No error
370	0	20 sec	5	Error 1

Τα πειράματα των πολλαπλών παλμών το Πίνακα 2.51 επιβεβαιώνουν τα προηγούμενα ευρήματα: διαταραχές μπορεί να προκληθούν με ιδιαίτερα μικρές διάρκειες παλμών (μερικές δεκάδες ns) αρκεί η συχνότητα επανάληψης να λαμβάνει τιμές της τάξης του 1 kHz.

Πίνακας 2.51 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub>.

Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN <sub>B</sub>						
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς ( dBm)	Διάρκεια Ακτινοβολία $\varsigma$ (sec)	Περίοδος (sec)	Διάρκεια Παλμού (sec)	Duty cycle (%)	Αποτελέσματα
380	0	5	2 sec	1 sec	50	Error 1
380	0	5	2 sec	500 ms	25	Error 1
380	0	5	2 sec	100 ms	5	Error 1
380	0	5	2 sec	10 ms	0.5	Error 1
380	0	5	2 sec	1 ms	0.05	Error 1
380	0	5	2 sec	500 $\mu$ s	0.025	Error 1
380	0	5	2 sec	100 $\mu$ s	0.005	Error 1
380	0	5	2 sec	10 $\mu$ s	0.0005	Error 1
380	0	5	2 sec	1 $\mu$ s	0.00005	Error 1
380	0	5	1 sec	1 $\mu$ s	0.0001	Error 1
380	0	5	200 ms	1 $\mu$ s	0.0005	Error 1
380	0	5	100 ms	1 $\mu$ s	0.001	Error 1
380	0	5	1 ms	1 $\mu$ s	0.1	Error 1
380	0	5	10 ms	1 $\mu$ s	0.01	Error 1
380	0	5	1 ms	500 ns	0.05	Error 1
380	0	5	1ms	100 ns	0.01	Error 1
380	0	5	1 ms	20 ns	0.002	Error 1

### Προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>

Η αλλαγή του προσανατολισμού σε DOWN<sub>A</sub> φαίνεται να περιορίζει το εύρος της ζώνης συχνοτήτων στα 300 MHz – 400 MHz (Πίνακας 2.52)

Πίνακας 2.52 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN <sub>A</sub>			
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς Οδήγησης (dBm)	Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)	Αποτέλεσμα
200-300	0	5	No error
300-400	0	5	Error 1
400-500	0	5	No error
500-600	0	5	No error
600-700	0	5	No error
700-800	0	5	No error
800-900	0	5	No error
900-1000	0	5	No error

Τα στοχευμένα πειράματα του Πίνακα 2.53 καταδεικνύουν ότι συχνότητα ενδιαφέροντος μετατοπίζεται ελαφρώς στην ψηλότερη συχνότητα 390 MHz.

Πίνακας 2.53 Αποτελέσματα πειραμάτων μεμονωμένου παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πείραμα Μεμονωμένου Παλμού σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN <sub>A</sub>				
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς ( dBm)	Περίοδος (sec)	Διάρκεια Παλμού (sec)	Αποτελέσματα
380	0	20 sec	1 sec	No error
380	0	20 sec	5 sec	No error
370	0	20 sec	5 sec	No error
390	0	20 sec	5 sec	Error 1

Η χρήση πολλαπλών παλμών στη συχνότητα 390 MHz αποδεικνύει ότι η αλλαγή προσανατολισμού επιφέρει μία επιπλέον απαίτηση ως προς τη διάρκεια της ακτινοβολίας, στην οποία δεν μπορούν να ανταποκριθούν οι παλμικές κυματομορφές (Πίνακας 2.54).

Πίνακας 2.54 Αποτελέσματα πειραμάτων πολλαπλών παλμού: απόσταση 2 m - προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub>.

Πείραμα Πολλαπλών Παλμών σε απόσταση 2 m, προσανατολισμό DOWN <sub>A</sub>						
Συχνό-τητα (MHz)	Ισχύς ( dBm)	Διάρκεια Ακτινοβολία $\varsigma$ (sec)	Περίοδος (sec)	Διάρκεια Παλμού (sec)	Duty cycle (%)	Αποτελέσματα
390	0	5	2 sec	10 ms	0.5	No error
390	0	5	2 sec	100 ms	5	No error
390	0	5	2 sec	500 ms	25	No error
390	0	5	2 sec	1 sec	50	No error
390	0	5	1 sec	1 sec	100	No error

Σύμφωνα με τους Πίνακες 2.55 – 2.56, η αλλαγή του προσανατολισμού σε SIDE<sub>A</sub> - SIDE<sub>B</sub> και η διενέργεια πειραμάτων σάρωσης αποδεικνύουν αδυναμία πρόκλησης σοβαρών διαταραχών στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz -1000 MHz.

### Προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>

Πίνακας 2.55 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>A</sub>.

Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, Προσανατολισμός SIDE <sub>A</sub>			
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς Οδήγησης ( dBm)	Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)	Αποτέλεσμα
200 - 300	0	5	No error
300 - 400	0	5	No error
400 - 500	0	5	No error
500 -600	0	5	No error
600 -700	0	5	No error
700 - 800	0	5	No error
800 - 900	0	5	No error
900 - 1000	0	5	No error

### Προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>

Πίνακας 2.56 Αποτελέσματα γενικών πειραμάτων: απόσταση 2 m - προσανατολισμός SIDE<sub>B</sub>.

Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, Προσανατολισμός SIDE <sub>B</sub>			
Συχνότητα (MHz)	Ισχύς Οδήγησης ( dBm)	Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)	Αποτέλεσμα
200 - 300	0	5	No error
300 - 400	0	5	No error
400 - 500	0	5	No error
500 -600	0	5	No error
600 -700	0	5	No error
700 - 800	0	5	No error
800 - 900	0	5	No error
900 - 1000	0	5	No error

#### 2.6.2 Τρωτότητα Nova Pro

Η μελέτη ατρωσίας του Nova Pro, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 2.5, χαρακτηρίζεται από μία ιδιαιτερότητα ως προς την πειραματική τοπολογία, η οποία με τη σειρά της ενδέχεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Το συγκεκριμένο MEEO τροφοδοτείται μέσω εξωτερικού τροφοδοτικού, καθώς η μπαταρία του έχει φθαρεί. Το τροφοδοτικό είναι τοποθετημένο σε ειδική θέση μέσα στον ημι-ανηχοϊκό θάλαμο, ώστε να μην επηρεάζεται από την ακτινοβολία. Ωστόσο τα καλώδια τροφοδοσίας είναι τοποθετημένα στο δάπεδο και στη συνέχεια τοποθετούνται κατακόρυφα ώστε να συνδεθούν με το MEEO.

Αρχικά, τα καλώδια τροφοδοσίας δεν διέθετα κάποια προστασία απέναντι στην ακτινοβολία, άρα ήταν πιθανόν λόγω του μήκους τους και της θέσης τους να την διοχετεύσουν στο MEEO, δημιουργώντας τα σφάλματα τα οποία καταγράφονται στην ενότητα 2.5. Για να εξαλειφθεί η πιθανότητα να συμβαίνει αυτό, οι αγωγοί περιστράφηκαν μεταξύ τους και στην συνέχεια τοποθετήθηκαν κάτω από τους ειδικούς κώνους που βρίσκονται στο δάπεδο του θαλάμου. Στην συνέχεια τα καλώδια τοποθετήθηκαν κατά μήκος του τριπόδου, στην πίσω πλευρά του, τοποθετημένα μέσα σε μεταλλικό σωλήνα, ώστε να θωρακιστούν έναντι της ακτινοβολίας. Τέλος, το κομμάτι των καλωδίων που συνδέεται με το drone, τοποθετήθηκε οριζόντια για τον ίδιο λόγο. Μετά τη λήψη αυτών των μέτρων, η πιθανότητα εισαγωγής ακτινοβολίας μέσω των καλωδίων τροφοδοσίας μειώθηκε όσο το δυνατόν περισσότερο, ενώ παράλληλα οι μετρήσεις του πεδιομέτρου δεν έδειξαν σημαντική διαφοροποίηση λόγω του μεταλλικού σωλήνα, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε.



Η επανάληψη των βασικών πειραμάτων της ενότητας 2.5 με τη νέα πειραματική τοπολογία επιβεβαίωσε τα προηγούμενα αποτελέσματα. Δεδομένης της επιπλέον θωράκισης των καλωδίων τροφοδοσίας, η επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων αποδυναμώνει σε σημαντικό βαθμό την υπόθεση της επαγωγής διαταραχών μέσω της εξωτερικής τροφοδοσίας.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, του Nova Pro έδειξαν διαφοροποίηση ανάλογα με την πόλωση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε η περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου αυτού.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.29, το Nova Pro εμφανίζει διαταραχή τύπου Error 1 ζώνες συχνοτήτων 200 MHz – 300 MHz και 500 – 600 MHz, όταν το είναι τοποθετημένο σε προσανατολισμό DOWN<sub>A</sub> και σε απόσταση 2 μέτρων. Αντίθετα, δεν εμφανίζονται διαταραχές όταν το MEEO έχει προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub> (Πίνακες 2.36 – 2.38), δηλ. στην περίπτωση όπου το MEEO είναι στραμμένο κατά ενενήντα μοίρες σε σχέση με τα DOWN<sub>A</sub>.

Η προαναφερόμενη συμπεριφορά δείχνει ότι ανάλογα με την πόλωση του πεδίου διαφοροποιείται το επίπεδο ατρωσίας. Κατ' αναλογία με την περίπτωση του Syma MEEO, η διαφοροποίηση αυτή ενδέχεται να οφείλεται στον προσανατολισμό των εσωτερικών διατάξεων, ο οποίος μπορεί να δημιουργεί μία άτυπη συμβατότητα με συγκεκριμένη γραμμική πόλωση. Προκειμένου να διερευνηθεί η εν λόγω υπόθεση, αποφασίστηκε να αφαιρεθεί το πλαστικό άνω καπάκι του Nova Pro, και οπτικά να εντοπιστούν πιθανά εξαρτήματα, τα οποία θα μπορούσαν να εξηγήσουν την επιλεκτικότητα της πόλωσης.

Η καλωδίωση, η οποία διασυνδέει την κεντρική πλακέτα, με τους τέσσερεις κινητήρες θα μπορούσε επί της αρχής να είναι ένα τέτοιο εξάρτημα, ωστόσο ο κατασκευαστής έχει προνοήσει και έχει περιστρέψει τα καλώδια μεταξύ τους και επιπρόσθετα λόγω της διαγώνιας θέσης των κινητήρων, η καλωδίωση είναι μερικώς συμβατή και με τις δύο πολώσεις. Συνεπώς, εκτιμάται ότι δεν ευθύνεται η καλωδίωση των κινητήρων για την εμφάνιση διαταραχών με επιλεκτικότητα ως προς την πόλωση.

Άλλο ένα ύποπτο εξάρτημα είναι η καλωδίωση της κεραίας GPS και για αυτόν τον λόγο τοποθετήθηκε με ασύμβατη πόλωση ως προς το ακτινοβολούμενο πεδίο και δοκιμάστηκε σε ένα πείραμα στο οποίο είχε εμφανιστεί Error 1. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2.57, το MEEO εμφάνισε Error 1 και μετά την αλλαγή θέσης της κεραίας GPS. Επομένως, εκτιμάται ότι το εν λόγω εξάρτημα δεν ευθύνεται η κεραία για την είσοδο της ακτινοβολίας στο σύστημα.

Πίνακας 2.57 Σάρωση Συχνότητας με την κεραία GPS σε ασύμβατη πόλωση.

<b>Γενικά Πειράματα σε απόσταση 2 m, Προσανατολισμός DOWN<sub>A</sub></b>			
<b>Συχνότητες (MHz)</b>	<b>Ισχύς ( dBm)</b>	<b>Χρόνος Παραμονής ανά Συχνότητα (sec)</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
200 – 1 GHz	0	10	Error 1

Το Nova Pro, φαίνεται ότι έχει κατασκευαστεί να αντέχει της ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μέχρι ένα βαθμό, καθώς δεν υπάρχουν άλλα εξαρτήματα τα οποία θα μπορούσαν να πολώνονται και να δημιουργούν πρόβλημα. Το τελευταίο εξάρτημα που θα μπορούσε να πολωθεί συμβατά είναι η κεντρική πλακέτα, όμως δεν είναι δυνατός ο έλεγχος της θεώρησης αυτής.

### 3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στο παρόν κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας ελέγχου της ατρωσίας των δύο υπό εξέταση ΜΕΕΟ και στο βαθμό κατά το οποίο τα αποτελέσματα το επιτρέπουν εξάγονται συμπεράσματα.

#### 3.1 Συμπεράσματα πειραματικής διαδικασίας Syma X5HW

##### 3.1.1 Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό U<sub>P</sub>A

Σύμφωνα με τα προκαταρκτικά τεστ σάρωσης συχνοτήτων με χρόνο παραμονής (dwell time) 10 sec, τα οποία πραγματοποιήθηκαν σε απόσταση 1 m και με προσανατολισμό U<sub>P</sub>A (Πίνακας 2.8), αποδεικνύεται ότι το Syma μπορεί να επηρεαστεί και να εμφανίσει Error 1 με πολύ μικρή τιμή εκπεμπόμενη ισχύος. Συγκεκριμένα, είναι εφικτό να δημιουργηθούν παρεμβολές με ισχύ τροφοδοσίας έως και -16 dBm στο εύρος συχνοτήτων 300 MHz – 400 MHz. Ωστόσο, με -13 dBm εντοπίστηκαν διαταραχές και στο εύρος 400 MHz – 500 MHz. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση του χρόνου παραμονής από 10 σε 20 sec και η επανάληψη των τεστ στο εύρος 400 MHz – 500 MHz αποδεικνύει ότι είναι εφικτή η πρόκληση παρεμβολών με -16 dBm.

***Συμπέρασμα 1:** Συνεπώς, υπάρχει μια πρώτη ένδειξη ότι η τιμή κατωφλίου για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αποτελεί συνάρτηση και του χρόνου έκθεσης στην ακτινοβολία.*

Σε υψηλότερες ή χαμηλότερες συχνότητες δεν εντοπίστηκαν διαταραχές αλλά ακόμη και αυτό το γεγονός ισχύει στο πλαίσιο της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος, η οποία χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές διαδικασίες.

Τα στοχευμένα πειράματα σάρωσης (Πίνακας 2.9) υποδεικνύουν ότι η πλέον μειωμένη ατρωσία εντοπίζεται στη ζώνη 350 MHz – 400 MHz, όπου το drone εμφάνισε Error 1 με ισχύ τροφοδοσίας -16 dBm και χρόνο παραμονής 10 sec. Στη ζώνη 450 MHz – 500 MHz, εντοπίστηκε το λιγότερο σοβαρό σφάλμα Error 2 με υψηλότερη ισχύ -13 dBm και χρόνο παραμονής 20 sec. Επίσης, στη ζώνη συχνοτήτων 450 MHz – 500 MHz εντοπίζονται παρεμβολές αλλά υπό την προϋπόθεση της υψηλότερης τροφοδοσίας (-6 dBm) και μεγαλύτερου χρόνου παραμονής ανά συχνότητα (10 sec).. Αξίζει να επισημανθεί ότι στο εύρος ζώνης 200 MHz – 300 MHz και κατά την διάρκεια της ακτινοβολίας του Syma, παρουσιάστηκε σταδιακή αύξηση των στροφών των κινητήρων, χωρίς να δοθεί τέτοια εντολή από το χειριστήριο.

***Συμπέρασμα 2:** Συνεπώς, προκύπτουν ενδείξεις ότι η πρόκληση παρεμβολών είναι εφικτή σε πολλές διαφορετικές συχνότητες αλλά ανά συχνότητα διαφοροποιούνται οι τιμές κατωφλίου σε ότι αφορά την ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου καθώς και του χρόνου έκθεσης.*

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα αποτελέσματα το Syma MEEO εμφανίζει την πλέον μειωμένη ατρωσία στο εύρος ζώνης 350 MHz – 400 MHz, διότι σε αυτό το εύρος συχνοτήτων προκαλείται η πλέον σοβαρή διαταραχή (Error 1) με μικρότερη ισχύ (-16 dBm) και μικρότερο χρόνο έκθεσης (10 sec ανά συχνότητα). Υπενθυμίζεται ότι το Error 1 είναι πιο ισχυρό από το Error 2, καθώς για την επίλυση του Error 1 απαιτείται επανεκκίνηση στο χειριστήριο και στο Syma, ενώ στην περίπτωση του Error 2 κάτι τέτοιο δεν χρειάζεται. Συνεπώς, στην περίπτωση όπου προκύπτει Error 1 κατά την διάρκεια πραγματικής πτήσης, το MEEO με μεγάλη πιθανότητα θα συντριβεί ή θα αναγκαστεί να προσγειωθεί αυτόματα, εάν έχει την δυνατότητα αυτή. Το σενάριο απομακρυσμένης επανεκκίνησης δεν είναι δυνατή στα περισσότερα drone και ακόμη και εάν αυτό ήταν εφικτό είναι αμφιλεγόμενο εάν στο λίγο χρόνο, ο οποίος μεσολαβεί μέχρι την πρόσκρουση στο έδαφος, είναι δυνατό να ολοκληρωθεί η επανεκκίνηση και η επανάκτηση του ελέγχου στο MEEO. Στην περίπτωση εμφάνισης Error 2, με την εκπομπή νέας εντολής από τον χρήστη, μέσω του χειριστηρίου, το MEEO επανέρχεται σε φυσιολογική λειτουργία.

Τα προαναφερόμενα προκαταρκτικά τεστ διενεργούνται σε μία απόσταση 1 m, η οποία απέχει κατά πολύ από τη ζώνη του μακρινού πεδίου της κεραίας. Η ελάχιστη απόσταση για τον μακρινό πεδίο στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz κυμαίνεται από 1.87 m – 9.35 m, αντίστοιχα. Παράλληλα, η μέγιστη απόσταση, η οποία οριοθετεί το κοντινό πεδίο στο εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1000 MHz κυμαίνεται από 0.65 m – 1.46 m, αντίστοιχα. Δεδομένου, ότι στο κοντινό πεδίο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζει διακυμάνσεις (στάσιμο κύμα) καθώς και ασάφειες ως προς την πόλωση και την όδευση του εκπεμπόμενου κύματος τα κυρίως πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση με όριο τη μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση από το θάλαμο (3 m). Η επιλογή της απόστασης για τη διεξαγωγή των πειραμάτων στα πλαίσια της παρούσας πειραματικής μελέτης κάθε φορά επιλέγεται με κριτήριο την ελάχιστη τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου προκειμένου να προκληθούν διαταραχές σε μία τουλάχιστον από τις εξεταζόμενες τοπολογίες. Στην περίπτωση του Syma αποδεικνύεται εφικτή η πρόκληση διαταραχών σε απόσταση 3 m και τα πειράματα τα οποία θα σχολιασθούν ακολούθως έχουν πραγματοποιηθεί σε απόσταση 3 m.

Τα τεστ σάρωσης συχνοτήτων στο εύρος ζώνης 200 MHz – 1000 MHz, με ισχύ τροφοδοσίας 0 dBm και χρόνο παραμονής 10 sec (Πίνακας 2.10) έδωσε παραπλήσια αποτελέσματα με τα τεστ του 1 m. Η στοχευμένη σάρωση ανά 50 MHz (Πίνακας 2.11), εντόπισε σφάλματα τύπου Error 1 στη ζώνη 350 MHz – 400 MHz με χρήση ισχύος -6 dBm. Αντίθετα, στη ζώνη 400 MHz - 450MHz η πρόκληση του ίδιου σφάλματος απαιτεί χρήση ισχύος 0 dBm. Συνεπώς, και στην απόσταση των τριών μέτρων ζώνη συχνοτήτων 350 MHz – 400 MHz παρουσιάζει μειωμένη ατρωσία συγκριτικά με τη ζώνη 400 MHz - 450MHz.

Τα πειράματα, τα οποία έχουν συζητηθεί έως τώρα είναι πειράματα σάρωσης συχνοτήτων. Η σάρωση συχνοτήτων είναι μια επιλογή, η οποία επιτρέπει μία γρήγορη επισκόπηση της κατάστασης αλλά παρουσιάζει το εξής μειονέκτημα: δεν είναι ευκρινές εάν το αποτέλεσμα της διαταραχής προκύπτει ως συσσώρευση διαταραχών σε πολλές διαφορετικές συχνότητες ή σε μία συγκεκριμένη. Η διερεύνηση αυτής της ασάφειας προκύπτει από τη διενέργεια τεστ σε μεμονωμένες συχνότητες (Πίνακας 2.12). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.12 προκύπτει ότι οι συχνότητες στις οποίες προκαλούνται παρεμβολές με ισχύ τροφοδοσίας 0 dBm περιορίζονται στη ζώνη 370 MHz έως 410 MHz. Ωστόσο μετά από περαιτέρω μείωση της ισχύος στα - 6 dBm (Πίνακας 2.13) προκλήθηκαν σοβαρές διαταραχές μόνο στις συχνότητες 370 MHz, 380 MHz και 390 MHz. Στα 370 MHz εμφανίστηκε Error 2 με ελάχιστη διάρκεια ακτινοβολίας 10 sec, ενώ στα 380 MHz και 390 MHz Error 1 με διάρκεια ακτινοβολίας 5 sec. Συνεπώς, οι δύο τελευταίες συχνότητες χαρακτηρίζονται ως αυτές με την πλέον μειωμένη ατρωσία δεδομένου ότι συσχετίζονται με πιο σοβαρό σφάλμα (Error 1) και μικρότερη ελάχιστη διάρκεια ακτινοβολίας. Η συχνότητα των 380 MHz, επιλέχθηκε ως κεντρική συχνότητα όλων των πειραμάτων, τα οποία θα ακολουθήσουν καθώς βρίσκεται πιο κοντά στο μέσον ολόκληρης της ευαίσθητης περιοχής συχνοτήτων. Σε αυτό το σημείο αξίζει να επισημανθεί ότι για τη συχνότητα των 380 MHz το κατώφλι για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι περίπου 57 V/m.

Μετά την επιλογή της συχνότητας των 380 MHz διενεργήθηκαν πειράματα παλμικής ακτινοβολίας (Πίνακες 2.14 – 2.16), όπου αποδεικνύεται ότι η παλμική λειτουργία προκαλεί τα ίδια σφάλματα, τα οποία εντοπίστηκαν στα προηγούμενα τεστ συνεχούς κύματος. Τα τεστ πραγματοποιήθηκαν με ισχύ τροφοδοσίας 0 dBm και ένταση ηλεκτρικού πεδίου 80 V/m. Επίσης, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η διάρκεια του παλμού μπορεί να μειωθεί σημαντικά (έως 20 ns) αρκεί ταυτόχρονα να αυξηθεί η συχνότητα επανάληψης παλμών (έως 1 kHz). Συνεπώς, προκύπτει το εξής συμπέρασμα:

**Συμπέρασμα 3:** Η πρόκληση σφαλμάτων κατά την έκθεση σε παλμική ακτινοβολία προϋποθέτει ένα συνδυασμό ελάχιστης διάρκειας και ελάχιστης συχνότητας επανάληψης παλμών σε ένα σχήμα αντιστάθμισης της μορφής μικρότερη διάρκεια – μεγαλύτερη συχνότητα επανάληψης παλμών.

Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων στον Πίνακα 2.16 για ταυτόσημα ή παρεμφερή Duty Cycles, διότι προκύπτουν ενδείξεις για το ειδικό βάρος που έχουν οι παράμετροι: διάρκεια του παλμού και η συχνότητα επανάληψης παλμών. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός (10 μs, 0.5 Hz, 0.0005%) προκαλεί σφάλμα, ενώ οι συνδυασμοί (1μs, 5 Hz, 0.0005%), (1μs, 10 Hz, 0.001%) και (1μs, 100 Hz, 0.01%) δεν προκαλούν σφάλμα. Με διάρκεια παλμού 1 μs μπορεί να προκληθεί σφάλμα, εάν το duty cycle αυξηθεί στο 0.1%. Συνεπώς, υπάρχουν ενδείξεις υποστηρικτικές ως προς το εξής συμπέρασμα:

**Συμπέρασμα 4:** Στην περίπτωση του *Syma*, η διάρκεια του παλμού έχει κυρίαρχο ρόλο συγκριτικά με τη συχνότητα επανάληψης παλμών και ως εκ τούτου η μείωση της διάρκειας του παλμού μπορεί να αντισταθμιστεί με πολλαπλάσια αύξηση της συχνότητας επανάληψης παλμού.

### 3.1.2 Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $DOWN_A$

Με την αλλαγή του προσανατολισμού σε  $DOWN_A$  έγιναν νέα πειράματα εύρεσης της ευαίσθητης περιοχής συχνοτήτων. Βρέθηκε ότι το MEEO εμφανίζει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με αυτή που έχει σχολιασθεί στον προσανατολισμό  $UP_A$ . Συγκεκριμένα, προκαλούνται σφάλματα Error 1 στη ζώνη συχνοτήτων 370 MHz – 410 MHz (Πίνακας 2.20). Ωστόσο από τα πειράματα με έκθεση σε ένα μεμονωμένο παλμό (Πίνακας 2.21) παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μειωμένη απαίτηση σε ότι αφορά τη διάρκεια έκθεσης σε ακτινοβολία (1 sec έναντι των 5 sec στην περίπτωση του προσανατολισμού  $UP_A$ ). Τέλος, από τα πειράματα με χρήση πολλαπλών παλμών (Πίνακας 2.22) προέκυψαν πανομοιότυπα αποτελέσματα με τον προσανατολισμό  $UP_A$  σε ότι αφορά την επίδραση των παραμέτρων διάρκεια και συχνότητα επανάληψης παλμών. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνεται πως το *Syma X5HW*, εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερη τρωτότητα στον προσανατολισμό  $DOWN_A$  συγκριτικά με τον προσανατολισμό  $UP_A$  με γνώμονα τη μικρότερη απαίτηση για τη διάρκεια της ακτινοβολίας. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δίνουν τις πρώτες ενδείξεις για τη διαφοροποίηση, η οποία προκύπτει όταν αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης αλλά αυτό θα επιβεβαιωθεί με εμφατικό τρόπο σε επόμενα πειράματα.

### 3.1.3 Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $DOWN_B$

Με το MEEO τοποθετημένο σε προσανατολισμό  $DOWN_B$ , δηλαδή περιστραμένο κατά  $90^\circ$  σε σχέση με τον  $DOWN_A$ , έγιναν νέα πειράματα εύρεσης της ευαίσθητης περιοχής συχνοτήτων και προέκυψαν διαφορετικά αποτελέσματα, από τον  $DOWN_A$ . Το MEEO δεν επηρεάστηκε σε καμία συχνότητα, σε όλο το φάσμα, από 200 MHz – 1000 MHz (Πίνακες 2.23 – 2.25). Η διαφοροποίηση μεταξύ των τοπολογιών  $DOWN_A$  και  $DOWN_B$  αφορά την πόλωση του ακτινοβολούμενου πεδίου και ως εκ τούτου καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα:

**Συμπέρασμα 5:** Η πόλωση του *HM* Πεδίου διαφοροποιεί σημαντικά τη δυνατότητα πρόκλησης παρεμβολών.

### 3.1.4 Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $UP_B$

Το MEEO τοποθετήθηκε σε προσανατολισμό  $UP_B$ , δηλαδή περιστραμένο κατά  $90^\circ$  σε σχέση με τον  $UP_A$ . Τα πειραματικά αποτελέσματα είναι όμοια με αυτά της περιστροφής από τον προσανατολισμό  $DOWN_A$  σε  $DOWN_B$ . Συγκεκριμένα, το *Syma* δεν εμφάνισε κανένα είδους σφάλμα στο φάσμα 200 MHz – 1000 MHz (Πίνακες 2.17 – 2.19) επιβεβαιώνοντας το Συμπέρασμα 5.

### 3.1.5 Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $SIDE_A$ και $SIDE_B$

Με την τοποθέτηση του MEEO σε προσανατολισμό  $SIDE_A$  και  $SIDE_B$  τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι δεν παρουσίασε κανένα σφάλμα σε ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων, από 200 MHz – 1GHz (Πίνακες 2.26 – 2.27). Η διαφοροποίηση στην περίπτωση των δύο αυτών τοπολογιών αφορά τη γωνία πρόσπτωσης και επομένως μπορεί να εξαχθεί το ακόλουθο συμπέρασμα:

**Συμπέρασμα 6:** Η γωνία πρόσπτωσης διαφοροποιεί σημαντικά τη δυνατότητα πρόκλησης παρεμβολών.

### 3.2 Συμπεράσματα επαναληπτικής πειραματικής διαδικασίας Syma X5HW

Στη υποενότητα αυτή περιγράφονται τα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν με την επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας, με την τοποθέτηση διάφορων εξαρτημάτων του Syma X5HW σε ασύμβατη πόλωση με το ακτινοβολούμενο πεδίο. Στα εξαρτήματα τα οποία εξετάστηκαν περιλαμβάνονται: α) η κεραία, β) το καλώδιο τροφοδοσίας από την μπαταρία προς την κεντρική πλακέτα, γ) τα καλώδια από την πλακέτα του διακόπτη τροφοδοσίας.

Η πειραματική διερεύνηση για την επίδραση των προαναφερόμενων εξαρτημάτων αποδεικνύει ότι ο προσανατολισμός της κεραίας δεν επηρεάζει (Πίνακας 2.43). Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένης της μεγάλης συχνοτικής απόστασης των πειραματικής κυματομορφών από τη ζώνη 2.4 GHz, στην οποία λειτουργεί το Syma X5HW. Επίσης, ο προσανατολισμός της καλωδίωσης της μπαταρίας δεν φαίνεται να επηρεάζει (Πίνακας 2.44). Αντίθετα, τα πειράματα αποδεικνύουν ότι η καλωδίωση από την πλακέτα του διακόπτη τροφοδοσίας προς την κεντρική πλακέτα αποτελεί ένα σημείο άτυπης λήψης παρεμβολών (Πίνακας 2.45 – 2.46). Ο προσανατολισμός της συγκεκριμένης καλωδίωσης σε ασύμβατο προσανατολισμό με την πόλωση του πεδίου καθιστά αδύνατη την πρόκληση παρεμβολών σε απόσταση 3 m (Πίνακες 2.47-2.48). Συνοψίζοντας, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

**Συμπέρασμα 7:** Επί της αρχής, οι διαδρομές σύζευξης (coupling path) των παρεμβολών περιλαμβάνουν εξαρτήματα, όπως για παράδειγμα οι καλωδιώσεις, τα οποία λειτουργούν ως άτυπα σημεία λήψης (back door coupling).

**Συμπέρασμα 8:** Η τοποθέτηση των ευπαθών εξαρτημάτων σε προσανατολισμούς, οι οποίοι δυσχεραίνουν την επαγωγή σημάτων παρεμβολής ενισχύει την ατρωσία των MEEO.

Η ακύρωση μίας διαδρομής σύζευξης ενισχύει την ατρωσία αλλά δεν αποκλείει το ενδεχόμενο ανάδειξης εναλλακτικών διαδρομών σύζευξης σε περίπτωση κατά την οποία ενισχυθεί η

ακτινοβολία. Αυτή η υπόθεση ελέγχθηκε με τη διενέργεια πειραμάτων σε απόσταση 2 m, όπου λόγω της μείωσης της απόστασης από την κεραία ενισχύεται το ακτινοβολούμενο πεδίο.

Η επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας στα 2 m με προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub> έδειξαν ότι το Syma εμφανίζει Error 1 στις ζώνες συχνοτήτων 300 MHz – 400 MHz και 400 MHz – 500 MHz (Πίνακας 2.49). Τα πειράματα με μεμονωμένο παλμό έδειξαν ότι το MEEO επηρεάζεται στην συχνότητα των 380 MHz, αλλά και στα 370 MHz, με ελάχιστη όμως διάρκεια παλμού και στις δύο περιπτώσεις τα 5 sec (Πίνακας 2.50). Αξίζει να επισημανθεί ότι στις συχνότητες 370 MHz και 380 MHz η ένταση του πεδίου είναι περίπου 113 V/m ενώ στα 3 m η ένταση είναι 81 V/m. Τα πειράματα πολλαπλών παλμών στη συχνότητα 380 MHz (Πίνακας 2.51) έδειξαν ότι το MEEO διαταράσσεται ελάχιστη διάρκεια παλμού 20 ns και συχνότητα επανάληψης παλμών 1 KHz. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά τα οποία εντοπίστηκαν σε άλλους προσανατολισμούς (UP<sub>A</sub>, DOWN<sub>A</sub>) στα πειράματα των 3m. Στα 3 m ο προσανατολισμός DOWN<sub>B</sub> δεν έδωσε ποτέ σοβαρές διαταραχές (με ή χωρίς επανατοποθέτηση της καλωδίωσης). Εκτιμάται ότι στην περίπτωση των πειραμάτων στα 2 m με προσανατολισμό DOWN<sub>B</sub>, η αύξηση της έντασης του πεδίου αναδεικνύει κάποια εναλλακτική διαδρομή σύζευξης με το τελικά προβαλλόμενο υποσύστημα του MEEO. Συνεπώς, προκύπτει το ακόλουθο συμπέρασμα:

**Συμπέρασμα 9:** Η αύξηση της έντασης του ακτινοβολούμενου πεδίου αναδεικνύει διαδρομές σύζευξης, οι οποίες δεν ενεργοποιούνται από χαμηλότερης έντασης πεδία.

Αξίζει να επισημανθεί ότι στην περίπτωση των πειραμάτων στα 2 m εντοπίζονται ταυτόσημες συχνότητες με αυτές, οι οποίες εντοπίστηκαν στα πειράματα των 3m. Το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι σχετίζεται με το υποσύστημα του MEEO, το οποίο σε τελική ανάλυση διαταράσσεται. Η διαφοροποίηση ανάμεσα στα πειράματα των 2 m και 3 m αφορά κατά κύριο λόγο την αλλαγή προσανατολισμού της καλωδίωσης του MEEO, δηλ. η αλλαγή εντοπίζεται στην αλλαγή της διαδρομής σύζευξης. Όμως, το κοινό σημείο ανάμεσα στα πειράματα σε διαφορετικές αποστάσεις είναι η απόληξη των διαδρομών σύζευξης των παρεμβολών, δηλ. το διαταρασσόμενο υποσύστημα, το οποίο εύλογα καθορίζει τις συχνότητες μειωμένης ατρωσίας. Επομένως, μπορεί να προκύψει το ακόλουθο συμπέρασμα:

**Συμπέρασμα 10:** Οι συχνότητες μειωμένης ατρωσίας καθορίζονται κυρίως από το υποσύστημα το οποίο κάθε φορά διαταράσσεται αλλά δευτερευόντως διαμορφώνεται από την εξασθένηση του σήματος παρεμβολής κατά μήκος της διαδρομής σύζευξης.

Με την αλλαγή προσανατολισμού σε DOWN<sub>A</sub>, το MEEO επηρεάζεται μόνο στη ζώνη συχνοτήτων 300MHz – 400 MHz, και πιο συγκεκριμένα στα 390 MHz (Πίνακες 2.52 – 2.53). Στην συχνότητα αυτή εμφανίστηκαν σφάλματα τύπου Error 1 με ελάχιστη απαίτηση διάρκειας παλμού τα 5 sec.



Τα πειράματα με χρήση πολλαπλών παλμών (Πίνακας 2.54), έδειξαν ότι δεν εμφανίζεται σφάλμα με παλμούς διάρκειας έως και 1 sec.

Τέλος, για τους προσανατολισμούς  $SIDE_A$  και  $SIDE_B$  τα αποτελέσματα ήταν κοινά. Δεν εμφανίστηκε καμία επίδραση στο MEE) κατά την διενέργεια οποιουδήποτε πειράματος. Το drone έμεινε ανεπηρέαστο σε όλο το φάσμα συχνοτήτων από 200 MHz έως 1 GHz.

### 3.3 Συμπεράσματα πειραματικής διαδικασίας Nova Pro

#### 3.3.1 Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $DOWN_A$

Τα προκαταρκτικά πειράματα στο 1m (Πίνακας 2.28) εντοπίζουν σοβαρές διαταραχές (Error 1) σε ένα εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 700 MHz. Ωστόσο, στη ζώνη συχνοτήτων 200 MHz – 300 MHz το MEEO επηρεάζεται με ένταση ηλεκτρικού πεδίου μικρότερη από 142 V/m. Στις υπόλοιπες ζώνες συχνοτήτων ( $f > 300$  MHz) η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη από 142 V/m.

Η επανάληψη των προκαταρκτικών πειραμάτων στα 2 m (Πίνακας 2.29) περιορίζει τις ζώνες συχνοτήτων στα 200 MHz έως 300 MHz και 500 MHz έως 600 MHz. Τα αντίστοιχα πειράματα στα 3 m (Πίνακας 2.30) δεν εντοπίζουν καμία διαταραχή. Η περαιτέρω διερεύνηση στα 2 m (Πίνακες 2.31-2.33) αποδεικνύει ότι η πλέον μειωμένη ατρωσία εντοπίζεται στη συχνότητα των 290 MHz (διαταραχή Error 1 με διάρκεια ακτινοβολίας 5 sec και ένταση ηλεκτρικού πεδίου 103 V/m). Η μετατόπιση της συχνότητας ενδιαφέροντος από τα 380 MHz στο Syma στα 290 MHz για το Nova Pro είναι αναμενόμενη, διότι οι κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους MEEO μπορούν να οδηγήσουν στη διαφοροποίηση τόσο των διαδρομών σύζευξης όσο και των πληττόμενων υποσυστημάτων. Συνεπώς, προκύπτει ένα επιπλέον συμπέρασμα:

**Συμπέρασμα II:** Οι συχνότητες μειωμένης ατρωσίας διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του MEEO, διότι είναι εύλογο να διαφοροποιούνται τόσο τα πληττόμενα υποσυστήματα όσο και οι διαδρομές σύζευξης με αυτά.

Τα πειράματα μεμονωμένου παλμού στα 290 MHz (Πίνακας 2.34) έδειξαν πως το MEEO επηρεάζεται, με παλμό ελάχιστης διάρκειας 1 sec και ένταση ηλεκτρικού πεδίου περίπου 127 V/m. Τα πειράματα πολλαπλών παλμών (Πίνακας 2.35) έδειξαν ότι το Nova Pro επηρεάζεται αρκεί το duty cycle να ξεπερνά το 1%. Το σημείο αυτό αποτελεί μία διαφοροποίηση μεταξύ των 2 MEEO. Το Syma μπορούσε να διαταραχθεί με εξαιρετικά χαμηλά duty cycles (έως 0.00005%) επιδεικνύοντας μία τάση να εξαρτάται κυρίως από τη διάρκεια του παλμού και δευτερευόντως από τη συχνότητα επανάληψης παλμών. Αντίθετα, το Nova Pro φαίνεται να θέτει μία κυρίαρχη απαίτηση για ένα ελάχιστο duty cycle. Στην προέκταση της αυτή η διαπίστωση επιβάλλει μία συγκεκριμένη σχέση

ανάμεσα στη διάρκεια παλμού και την περίοδο επανάληψης παλμών. Στην περίπτωση του Nova Pro η αναλογία, τουλάχιστον στο εύρος τιμών που ελέγχθηκαν, έχει ως εξής: (Διάρκεια Παλμού):(Περίοδος Επανάληψης)=1:100. Επομένως, στην περίπτωση του Nova Pro επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα 3 αλλά διαφοροποιείται το συμπέρασμα 4 ως εξής:

**Συμπέρασμα 12:** Στην περίπτωση του Nova Pro, τίθεται μία ελάχιστη απαίτηση ως προς το duty cycle χωρίς να προκύπτει κάποια επιμέρους απαίτηση για τη διάρκεια του παλμού και τη συχνότητα επανάληψης παλμών πλην αυτή που επιβάλλει το ελάχιστο duty cycle..

### 3.3.2 Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $SIDE_A$ και $SIDE_B$

Το Nova Pro σε προσανατολισμό  $SIDE_A$  και  $SIDE_B$ , εξετάστηκε εκ νέου για την εύρεση της πιο ευαίσθητης συχνότητας και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι κοινά με τον προσανατολισμό  $DOW_A$  (Πίνακας 2.39 και 2.41) αλλά με μία μικρή μετατόπιση της συχνότητας στα 290 MHz. Ωστόσο, στα πειράματα με πολλαπλούς παλμούς, τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται, διότι η απαίτηση για ένα ελάχιστο duty cycle αυξήθηκε στο 10 % (Πίνακες 2.40 και 2.42).

### 3.3.3 Συμπεράσματα πειραμάτων σε προσανατολισμό $DOWN_B$

Με την αλλαγή όμως σε προσανατολισμό  $DOWN_B$ , δηλαδή περιστραμμένο κατά  $90^\circ$ , σε σχέση με τον  $DOWN_A$ , το MEEO δεν επηρεάστηκε σε καμία συχνότητα στο εύρος 200 MHz – 1000 MHz, ακτινοβολούμενο με την μέγιστη δυνατή ισχύ 0 dBm (127 V/m).



Εικόνα 3.1 Το Nova Pro σε λειτουργία.

### 3.4 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παρούσας πειραματικής μελέτης θα μπορούσαν να επεκταθούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις προκειμένου να κατανοηθεί σε μεγαλύτερο βάθος το φαινόμενων των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε MEEO. Ενδεικτικά μπορούν να αναφερθούν οι ακόλουθες προεκτάσεις της παρούσας εργασίας ως αντικείμενα μελλοντική έρευνας:

- α) διενέργεια πειραμάτων ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας με διαφορετικούς τύπους MEEO προκειμένου να επιβεβαιωθεί η γενικότητα ορισμένων συμπερασμάτων καθώς και το εύρος των διαφοροποιήσεων, οι οποίες μπορεί να προκύψουν,
- β) σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας φαίνεται ότι το τρίπτυχο πλάτος κορυφής παλμού – διάρκεια παλμού – συχνότητα επανάληψης παλμών ορίζει μία τριάδα παραμέτρων, οι οποίες έχουν αλληλοσυμπληρούμενο χαρακτήρα, π.χ. η αύξηση μίας από τις παραμέτρους μπορεί να αντισταθμίσει τη μείωση των υπολοίπων. Θα ήταν ενδιαφέρον να πραγματοποιηθεί μία συστηματική μελέτη σε ένα μεγάλο εύρος τιμών αυτών των παραμέτρων ώστε να προκύψει μία ποσοτική σχέση μεταξύ τους,
- γ) Η μελέτη σε ένα εύρος συχνοτήτων  $< 1000$  MHz θα μπορούσε να συσχετιστεί με αντίστοιχα πειράματα χρήσης υπερ-ευρυζωνικών παλμών (Ultra-Wideband, UWB). Η χρήση UWB παλμών για την πρόκληση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών έχουν το πλεονέκτημα να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και κατ' επέκταση διαφορετικούς τύπους MEEO. Ωστόσο, το ευρύ φασματικό περιεχόμενό τους συνεπάγεται ένα υψηλό ενεργειακό κόστος. Αυτό το κόστος θα μπορούσε να περιοριστεί, εάν μία μελλοντική μελέτη υποδείκνυε μία διαμόρφωση του φάσματος, ώστε να περιοριστεί σε μία πιο στενή ζώνη συχνοτήτων, όπου τα MEEO επιδεικνύουν μειωμένη ατρωσία.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] O. H. Arnesen, E. Krogager, M. Bäckström, S. B.-Sande, J. Godø, S. Härkönen, K. G. Lövstrand, M. Moiso, B. Nordström, J. Peltonen, O. Øystad, "High Power Microwave Effects on Civilian Equipment", in Proceedings of XXVIIIth General Assembly of International Union Radio science (URSI), October 23-29 October 23-29, 2005.
- [2] D. V. Giri, F.M. Tesche, "Classification of Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)", σε IEEE Trans. Electromagn. Compat. vol.46, 2004, pp. pp.322-328.
- [3] M. Camp, H. Gerth, H. Garbe, H. Haase, "Predicting the Breakdown Behavior of Microcontrollers under EMP/UWB Impact Using Statistical Analysis", in IEEE Trans. Electromagn. Compat. vol.46, Aug 2004, pp. pp. 368-379.
- [4] D. Nitsch, M. Camp, F. Sabath, J-L. Haseborg, H. Garbo, "Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats", σε IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 46, Aug. 2004, pp. pp. 380-389.
- [5] F. Sonnemann, J. Bohl, "Susceptibility and Vulnerability of Semiconductor Components and Circuits against HPM", in Proc. XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science, 2002.
- [6] L. Torrero, P. Mollo, A. Molino, A. Perotti "RF Immunity Testing of an Unmanned Aerial Vehicle Platform Under Strong EM Field Conditions", in 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Apr. 2013, pp. pp. 1-5.
- [7] K. Y. Sakharov, A.V. Sukhov, V.L. Ugolev, Yu.M. Gurevich "Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle", in Proc. Of International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), Aug. 27-30, 2018, pp. pp. 40-43.
- [8] R. Przesmycki, M. Wnuk, "Susceptibility of IT devices to HPM Pulses", σε Int. J. of Safety and Security Eng., vol. 8, No. 2, 2018, pp. pp. 223-233.

- [9] M. G. Bäckström, K. G. Lövstrand, "Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves: Summary of Test Experience", IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 46, Aug. 2004, pp. pp. 396-403.
- [10] D. Zhang, X. Zhou, E. Cheng, H. Wan and Y. Chen, "Investigation on susceptibility of UAV to radiated IEMI", pp. pp. 718-722, 2018.
- [11] J. L. Esteves, E. Cottais and C. Kasmi, "Unlocking the Access to the Effects Induced by IEMI on a Civilian UAV", σε 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), doi: 10.1109/EMCEurope.2018.8484990, 2018, pp. pp. 48-52.
- [12] Q. Liu, J. Wang and Y. Jun, "Damage evaluation of microwave anti swarm attack based on scoring method", doi: 10.1109/AEECA49918, 2020, pp. pp. 345-350.
- [13] Y. Chen, D. Zhang, E. Cheng and X. Wang, "Investigation on Effects of HPM Pulse on UAV's Datalink", σε in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 62, no. 3, doi: 10.1109/TEMC.2019.2915285, June 2020, pp. pp. 829-839.
- [14] Copyright Micro-Coax, Inc., «datasheet.octopart.com,» 2006. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://datasheet.octopart.com/UFA210A-0-2400-300300-Micro-Coax-datasheet-8566962.pdf>. [Πρόσβαση 3 9 2021].
- [15] Rohde & Schwarz, «scdn.rohde-schwarz.com,» July 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/SMB100A\\_dat-sw\\_en\\_3609-4761-22\\_v0100\\_120dpi.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/SMB100A_dat-sw_en_3609-4761-22_v0100_120dpi.pdf). [Πρόσβαση 16 8 2021].
- [16] OPHIR RF, «ophirrf.com,» 3 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ophirrf.com/wp-content/uploads/2021/03/5225.pdf>. [Πρόσβαση 5 8 2021].

- [17] ETS LINDGREN, «[ets-lindgren.com](http://ets-lindgren.com),» ETS LINDGREN, 2007. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ets-lindgren.com/products/antennas/double-ridged-guide/4002/400201>. [Πρόσβαση 6 8 2021].
- [18] ETS LINDGREN, «<https://www.ets-lindgren.com/>,» 2007. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ets-lindgren.com/get-manuals/3106B%20399785%20B.pdf>. [Πρόσβαση 6 8 2021].
- [19] narda Safety Test Solutions, «[narda-sts.com](http://narda-sts.com),» narda Safety Test Solutions, 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.narda-sts.com/en/wideband-emf/nbm-550/>. [Πρόσβαση 6 8 2021].
- [20] narda Safety Test Solutions, «[narda-sts.com](http://narda-sts.com),» narda Safety Test Solutions, 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.narda-sts.com/en/wideband-emf/nbm-550/nbme-field-18-ghz/>. [Πρόσβαση 6 8 2021].
- [21] Rohde & Schwarz, «[scdn.rohde-schwarz.com](http://scdn.rohde-schwarz.com),» March 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/ZVA\\_dat-sw\\_en\\_5213-5680-22\\_v1100.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZVA_dat-sw_en_5213-5680-22_v1100.pdf). [Πρόσβαση 3 9 2021].
- [22] DRONE OMEGA, «[droneomega.com](http://droneomega.com),» Syma toys, 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://droneomega.com/syma-x5hw-review/>. [Πρόσβαση 17 8 2021].
- [23] Syma toys, «[symatoys.com](http://symatoys.com),» Syma toys, 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.symatoys.com/goodshow/x5hw-syma-x5hw-fpv-real-time-the-new-drone.html>. [Πρόσβαση 17 8 2021].
- [24] HobbyKing, «[hobbyking.com](http://hobbyking.com),» Quatum, 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://hobbyking.com/en\\_us/nova-pro-main-body-esc-radio-receiver-charger-rtf-mode-2.html](https://hobbyking.com/en_us/nova-pro-main-body-esc-radio-receiver-charger-rtf-mode-2.html). [Πρόσβαση 27 8 2021]