



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μετρήσεις Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας
και Αξιολόγηση Συμπεριφοράς Καλωδιακού Προτύπου
SpaceWire**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρετή Γ. Πέτσα

Επιβλέπων : Χρήστος Ν. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μετρήσεις Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας
και Αξιολόγηση Συμπεριφοράς Καλωδιακού Προτύπου
SpaceWire**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρετή Γ. Πέτσα

Επιβλέπων : Χρήστος Ν. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Μαρτίου 2020.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2020

.....

Αρετή Γ. Πέτσα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αρετή Γ. Πέτσα, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η επιτυχία μίας διαστημικής αποστολής εξαρτάται από την αποτελεσματική λειτουργία όλων των συστημάτων της. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εξασφάλιση της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας του εξοπλισμού, πριν την έναρξη της αποστολής. Πρέπει δηλαδή κάθε μονάδα του συστήματος να μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά στο ηλεκτρομαγνητικό της περιβάλλον, δηλαδή να έχει υψηλά επίπεδα ατρωσίας. Επιβάλλεται, επίσης, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές αυτής προς τα άλλα μέρη του συστήματος να είναι αποδεκτές σύμφωνα με τις παγκόσμιες προδιαγραφές.

Στη διπλωματική αυτή εργασία, μελετάται η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του καλωδιακού προτύπου SpaceWire.

Στα πρώτα κεφάλαια αναλύεται η έννοια της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας και αναδεικνύεται η ανάγκη τήρησης των υφιστάμενων προτύπων μετρήσεων. Δίνεται, επίσης, μία περιγραφή όλων των δομικών επιπέδων του προτύπου SpaceWire. Ακόμη, περιγράφεται η λειτουργία και ο ρόλος όλων των παραγόντων που λαμβάνουν μέρος στην πειραματική διαδικασία. Οι μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών του SpaceWire λαμβάνονται σύμφωνα με το πρότυπο MIL-STD-461G. Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των μετρήσεων και αξιολογείται η συμπεριφορά του SpaceWire ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες.

Λέξεις-κλειδιά

Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ατρωσία, πρότυπα μετρήσεων, πρότυπο SpaceWire, MIL-STD-461G, δέκτης Schaffner, iSAFT, ανηχοϊκός θάλαμος, θόρυβος

Abstract

The success of a space mission depends on the efficient operation of all of its systems. A prerequisite is to ensure Electromagnetic Compatibility of the equipment before mission begins. Each unit of the system must be able to operate efficiently in its electromagnetic environment and to have high levels of immunity. It is also necessary that its electromagnetic interference to other parts of the system to be accepted in accordance with worldwide standards.

In this thesis, the electromagnetic behavior of the SpaceWire cable model is studied.

The first chapters analyze the notion of Electromagnetic Compatibility and highlight the need to adhere to existing measurement standards. A description of all structural layers of the SpaceWire standard is also given. The function and role of all the factors involved in the experimental process are also described. SpaceWire's electromagnetic emission measurements are taken according to MIL-STD-461G. In the last chapter, comparative measurement charts are presented and SpaceWire's behavior is evaluated according to prevailing conditions.

Key-words

Electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, immunity, measurement standards, SpaceWire standard, MIL-STD-461G, Schaffner receiver, iSAFT, anechoic chamber, noise

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019-2020. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στον χώρο του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή της σχολής Η.Μ.Μ.Υ. κ. Χρήστο Καψάλη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το θέμα αυτής της εργασίας αλλά και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Σημαντικοί αρωγοί στην προσπάθειά μου ήταν ο Διδάκτορας της σχολής Η.Μ.Μ.Υ κ. Χρήστος Νικολόπουλος και ο υποψήφιος Διδάκτορας της σχολής Η.Μ.Μ.Υ. κ. Ανάργυρος Μπακλέζος, οι οποίοι με τις γνώσεις τους και την εμπειρία τους συνέβαλαν καθοριστικά στην υλοποίηση της εργασίας αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πτυχιούχο του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Ηλία Σιγάλα, ο οποίος συμμετείχε στη διαδικασία λήψης ενός μέρους των μετρήσεων της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου, τον αδερφό μου, όλους τους δικούς μου ανθρώπους και φίλους, έναν προς έναν ξεχωριστά, οι οποίοι ήταν δίπλα μου σε όλες τις όμορφες αλλά και στις δύσκολες στιγμές των φοιτητικών μου χρόνων.

Περιεχόμενα

1	Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα σε διαστημικές εφαρμογές.....	15
1.1	Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα	15
1.2	Μελέτες Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας σε διαστημικές αποστολές.....	16
1.3	SpaceWire ως τμήμα εξοπλισμού διαστημικών αποστολών	17
2	Κεφάλαιο 2: Πρότυπα μετρήσεων Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας.....	18
2.1	Πρότυπα	18
2.2	Δέκτης ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών	20
3	Κεφάλαιο 3: SpaceWire.....	22
3.1	Εισαγωγή.....	22
3.2	Αναλυτική περιγραφή του προτύπου.....	22
3.3	Φυσικό επίπεδο.....	25
3.3.1	Καλώδια	25
3.3.2	Σύνδεσμοι.....	26
3.3.3	Συγκροτήματα καλωδίων.....	27
3.3.4	LVDS PCB tracks.....	28
3.3.5	Οδηγοί γραμμών και δέκτες	28
3.4	Επίπεδο κωδικοποίησης	28
3.4.1	Σειριοποίηση και απο-σειριοποίηση	28
3.4.2	Κωδικοποίηση χαρακτήρων και κωδικών ελέγχου.....	29
3.4.3	Ρυθμός σηματοδότησης δεδομένων	29
3.5	Επίπεδο σύνδεσης δεδομένων.....	30
3.6	Επίπεδο δικτύου	30
3.6.1	Πακέτα SpaceWire	30
3.6.2	Κόμβος SpaceWire	31
3.6.3	Δρομολογητές SpaceWire.....	31
3.6.4	Δίκτυο SpaceWire.....	31
3.6.5	Μονάδες και συσκευές SpaceWire.....	31
3.7	Τρέχουσα κατάσταση - Εξελίξεις.....	32
4	Κεφάλαιο 4: Πειραματικές συνιστώσες	34
4.1	Ανηχοϊκός θάλαμος.....	34
4.2	Απαιτήσεις MIL-STD 461G	35
4.3	Κεραίες.....	38

4.4	Δέκτης μέτρησης	38
4.5	iSAFT.....	42
4.6	Διάταξη.....	42
4.7	Παράμετροι.....	46
5	Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα μετρήσεων.....	48
5.1	Συγκριτική παρουσίαση	48
5.2	Σύγκριση ως προς την ταχύτητα αποστολής πακέτων.....	52
5.3	Σύγκριση ως προς το μέγεθος των πακέτων	60
5.4	Σύγκριση ως προς το περιεχόμενο των πακέτων	68
5.5	Σύγκριση ως προς την πόλωση της κεραίας	72
5.6	Σύγκριση ως προς τη διάταξη του SpaceWire	76
5.7	Σύγκριση ως προς την απόσταση της κεραίας.....	84
5.8	Σύγκριση ως προς τη συχνότητα.....	87
5.9	Συμπεράσματα	88
5.10	Μελλοντικές επεκτάσεις	89
6	Βιβλιογραφία	90

Ευρετήριο εικόνων και διαγραμμάτων

Εικόνα 2-1: Emission and susceptibility requirements.....	19
Εικόνα 2-2: Limit for aircraft and space system applications	21
Εικόνα 3-1: SpaceWire protocol stack	22
Εικόνα 3-2: SpaceWire port architecture.....	24
Εικόνα 3-3: SpaceWire cable construction.....	25
Πίνακας 3.1: Insertion loss values to be respected for a cable	25
Πίνακας 3.2: Return loss values to be respected for a cable	26
Εικόνα 3-4: SpaceWire connector contact identification	27
Εικόνα 3-5: SpaceWire cable assembly type A.....	27
Εικόνα 3-6: LVDS transmitter output signals	28
Εικόνα 3-7: Data character encoding.....	29
Εικόνα 3-8: Control character encoding.....	29
Εικόνα 3-9: SpaceWire packet format.....	30
Εικόνα 4-1: Πλήρης ανηχοϊκός θάλαμος.....	34
Εικόνα 4-2: Μοντέλο διαστημικού σκάφους Juice κατά τη διάρκεια δοκιμών EMC.....	35
Εικόνα 4-3: Basic test setup.....	36
Εικόνα 4-4: Antenna positioning.....	37
Εικόνα 4-5: Limit for aircraft and space system applications	37
Εικόνα 4-6: Schaffner SMR 4530	38
Εικόνα 4-7: Διάφορα προφίλ μέτρησης.....	39
Εικόνα 4-8: Παράμετροι του προφίλ μέτρησης της εργασίας.....	39
Εικόνα 4-9: Έναρξη λήψης μέτρησης	40
Εικόνα 4-10: Ολοκλήρωση λήψης μέτρησης	40
Εικόνα 4-11: Αποθήκευση αρχείου	41
Εικόνα 4-12: Μετατροπή αρχείου	41
Εικόνα 4-13: Normal setup.....	43
Εικόνα 4-14: Perpendicular setup.....	43
Εικόνα 4-15: Vertical antenna - Normal SpaceWire	44
Εικόνα 4-16: Vertical antenna - Perpendicular SpaceWire	45
Εικόνα 4-17: Horizontal antenna - Normal SpaceWire.....	45
Εικόνα 4-18: Horizontal antenna - Perpendicular SpaceWire.....	46
Εικόνα 4-19: Εκπομπή P1-H-100-32-RAND compared to Noise.....	47
Εικόνα 5-1: Εκπομπή N1-V-400-2048-RAND compared to Noise (Ethernet ON)	48

Εικόνα 5-2: Εκπομπή N1-V-400-2048-RAND compared to Noise (Ethernet OFF)	49
Εικόνα 5-3: Σύγκριση θορύβων N1-V-400 με Ethernet ON και Ethernet OFF	50
Εικόνα 5-4: Σύγκριση θορύβων P1-V-400 με Ethernet ON και Ethernet OFF	51
Εικόνα 5-5: Σύγκριση εκπομπών: 400/100Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 1 byte)	52
Εικόνα 5-6: Σύγκριση εκπομπών: 400/100Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)	53
Εικόνα 5-7: Σύγκριση εκπομπών: 400/100Mbps (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)	54
Εικόνα 5-8: Σύγκριση εκπομπών: 100/10Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 1 byte)	55
Εικόνα 5-9: Σύγκριση εκπομπών: 100/10Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)	56
Εικόνα 5-10: Σύγκριση εκπομπών: 100/10Mbps (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)	57
Εικόνα 5-11: Σύγκριση εκπομπών: 400/10Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 1 byte)	58
Εικόνα 5-12: Σύγκριση εκπομπών: 400/10Mbps (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)	59
Εικόνα 5-13: Σύγκριση εκπομπών: 1/32 bytes (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)	60
Εικόνα 5-14: Σύγκριση εκπομπών: 1/32 bytes (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)	61
Εικόνα 5-15: Σύγκριση εκπομπών: 32/512 bytes (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)	62
Εικόνα 5-16: Σύγκριση εκπομπών: 32/512 bytes (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)	63
Εικόνα 5-17: Σύγκριση εκπομπών: 512/2048 bytes (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)	64
Εικόνα 5-18: Σύγκριση εκπομπών: 512/2048 bytes (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)	65
Εικόνα 5-19: Σύγκριση εκπομπών: 1/2048 bytes (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)	66
Εικόνα 5-20: Σύγκριση εκπομπών: 1/2048 bytes (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)	67
Εικόνα 5-21: Σύγκριση εκπομπών: RAND/ZEROS (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, 1 byte)	68
Εικόνα 5-22: Σύγκριση εκπομπών: RAND/ZEROS (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, 32 bytes)	69
Εικόνα 5-23: Σύγκριση εκπομπών: RAND/ZEROS (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, 512 bytes)	70

Εικόνα 5-24: Σύγκριση εκπομπών: RAND/ZEROS (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, 2048 bytes).....	71
Εικόνα 5-25: Σύγκριση εκπομπών: Vertical/Horizontal (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte).....	72
Εικόνα 5-26: Σύγκριση εκπομπών: Vertical/Horizontal (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 32 bytes)	73
Εικόνα 5-27: Σύγκριση εκπομπών: Vertical/Horizontal (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, τυχαίο πακέτο 512 bytes).....	74
Εικόνα 5-28: Σύγκριση εκπομπών: Vertical/Horizontal (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, τυχαίο πακέτο 2048 bytes).....	75
Εικόνα 5-29: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για κατακόρυφη πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte)	76
Εικόνα 5-30: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για κατακόρυφη πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 512 bytes).....	77
Εικόνα 5-31: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για οριζόντια πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte)	78
Εικόνα 5-32: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για οριζόντια πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 512 bytes).....	79
Εικόνα 5-33: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για κατακόρυφη πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 100Mbps, τυχαίο πακέτο 32 bytes).....	80
Εικόνα 5-34: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για κατακόρυφη πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 100Mbps, τυχαίο πακέτο 2048 bytes).....	81
Εικόνα 5-35: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για οριζόντια πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 100Mbps, τυχαίο πακέτο 32 bytes).....	82
Εικόνα 5-36: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για οριζόντια πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 100Mbps, τυχαίο πακέτο 2048 bytes).....	83
Εικόνα 5-37: Σύγκριση εκπομπών: 1/1.5m (για κάθετη διάταξη SpaceWire, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 2048 bytes)	84
Εικόνα 5-38: Σύγκριση εκπομπών: 1/2m (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte).....	85
Εικόνα 5-39: Σύγκριση εκπομπών: 1/2m (για κάθετη διάταξη SpaceWire, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte).....	86
Εικόνα 5-40: Εκπομπή P1-V-400-2048-RAND-1...2GHz compared to Noise.....	87

1 Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα σε διαστημικές εφαρμογές

1.1 Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Εδώ και πολλές δεκαετίες έχει αναγνωριστεί η σημαντικότητα της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας στον κλάδο της Αεροδιαστημικής. Αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ανάπτυξης διαστημικών εφαρμογών και συστημάτων καθώς και της επίτευξης αποτελεσματικών διαστημικών αποστολών.

Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC) ορίζεται η ικανότητα μίας διάταξης, συσκευής ή συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον, χωρίς να προκαλεί ανεπιθύμητες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε βρίσκεται στο περιβάλλον αυτό.[1]

Ο ρόλος της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας στις διαστημικές εφαρμογές είναι, κατ' αρχήν, να διασφαλίσει τη σωστή λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού ενός διαστημικού σκάφους. Αποσκοπεί, επίσης, στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της βιωσιμότητάς του.

Η ομαλή λειτουργία των ηλεκτρονικών συστημάτων ενός διαστημόπλοιου μπορεί να διαταραχθεί με την έναρξη, για παράδειγμα, μίας πειραματικής λειτουργίας με συνέπειες που μπορεί να είναι καταστροφικές για τον ίδιο τον εξοπλισμό ή και θανατηφόρες για το πλήρωμα του σκάφους. Αυτό καθιστά απαραίτητη τη διεξαγωγή μετρήσεων με σκοπό την επαλήθευση της συμβατότητας του εξοπλισμού.

Οι μετρήσεις αυτές στοχεύουν στο να εξασφαλίσουν, πρώτον, τη συμβατότητα των συστημάτων όταν αυτά λειτουργούν σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και δεύτερον την αμοιβαία συμβατότητα μονάδων που αποτελούν το συνολικό σύστημα.

Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic Interference, EMI) ορίζουμε κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να μειώσει την επίδοση μίας συσκευής ή ενός συστήματος.[1] Είναι, δηλαδή, κάθε διαταραχή, φυσικής ή ανθρώπινης προέλευσης, στις συχνότητες λειτουργίας του συστήματος, στο οποίο έχει αρνητική επίδραση.

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που παράγει μία πηγή επάγονται στον δέκτη με τους εξής τρόπους:

- με άμεση ακτινοβολήση του δέκτη από την πηγή
- με ακτινοβολήση μέσω καλωδίου τροφοδοσίας ή μεταφοράς πληροφορίας
- λόγω παραγωγής παρεμβολών από τα ίδια τα καλώδια
- με αγωγή παρεμβολή μέσω του δικτύου παροχής χαμηλής τάσης στην πηγή και στον δέκτη.

Έτσι, λοιπόν, οι μετρήσεις EMC ενός συστήματος στοχεύουν στον προσδιορισμό τριών πτυχών αυτού:

- την παραγωγή ανεπιθύμητων εκπομπών αυτού προς το περιβάλλον του
- την *ευαισθησία* του, δηλαδή κατά πόσο εύκολα μπορεί να δυσλειτουργήσει όταν δέχεται ανεπιθύμητες διαταραχές. Συμπληρωματική έννοια είναι η *ατρωσία*

(immunity), δηλαδή η ικανότητα του συστήματος να λειτουργεί χωρίς να υποβαθμίζεται η επίδοσή του, παρά την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών.

- τον μηχανισμό κατά τον οποίο φτάνει η ανεπιθύμητη παρεμβολή στο σύστημα.[2]

1.2 Μελέτες Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας σε διαστημικές αποστολές

Σε κάθε διαστημικό αεροσκάφος απαιτείται έλεγχος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Ο έλεγχος αυτός θα πρέπει να είναι ενσωματωμένος στη διαδικασία σχεδίασης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και όχι στις διορθωτικές δοκιμές κατά τη λειτουργία του. Θα πρέπει δηλαδή εκ των προτέρων να εξασφαλίζεται ότι το αεροσκάφος είτε θα παράγει είτε θα υποφέρει από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στον μικρότερο δυνατό βαθμό. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποτελεσματική εκτέλεση των λειτουργιών για τις οποίες έχει σχεδιαστεί κάθε επιμέρους μονάδα του εξοπλισμού στον προβλεπόμενο χρόνο ζωής του.

Τα περισσότερα διαστημικά αεροσκάφη σχεδιάζονται με σκοπό να λειτουργούν αυτόνομα, χωρίς ανθρώπινη παρεμβολή, για πολλά χρόνια. Έτσι, η διεξαγωγή μελετών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας στον εξοπλισμό πριν την έναρξη λειτουργίας του σκάφους μειώνει σε σημαντικό βαθμό την πιθανότητα αποτυχίας της αποστολής. Η, έστω και μερική, απώλεια των ικανοτήτων του εξοπλισμού έχει αρνητική επίπτωση στην επιστημονική/πειραματική απόδοσή του, αυξάνει το οικονομικό κόστος πέραν του προβλεπόμενου και προκαλεί υπέρβαση του χρονικού πλαισίου της αποστολής. Γίνεται, λοιπόν, προφανής η αναγκαιότητα διεξαγωγής μελετών EMC σε κάθε διαστημική αποστολή ώστε να εκπληρώνονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι στόχοι αυτής.

Σε σχέση με επίγειες εφαρμογές και συστήματα, υπάρχουν πολλοί περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στις μελέτες EMC εξοπλισμού διαστημικών εφαρμογών. Αρχικά, ένα διαστημικό σκάφος βρίσκεται σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες ανάλογα με τη φάση λειτουργίας του (εκκίνηση, εκτόξευση, κανονική λειτουργία). Από τις ηλεκτρομαγνητικά «καθαρές» αίθουσες μεταβαίνει σε περιβάλλοντα μεταβλητής θερμοκρασίας και πίεσης, όπου υφίστανται φαινόμενα φόρτισης πλάσματος, ιονιζουσών ακτινοβολιών κ.ά. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει το βάρος του εξοπλισμού. Αυτό θα πρέπει να είναι το ελάχιστο δυνατό, οπότε, για παράδειγμα, τυποποιημένες λύσεις θωράκισης επίγειων συστημάτων δε μπορούν να εφαρμοστούν. Άλλη μία παράμετρος που εξετάζεται είναι η μαγνητική καθαρότητα του σκάφους. Τα διαστημικά σκάφη χρησιμοποιούν το μαγνητικό πεδίο της γης για πλοήγηση, αφού τα μαγνητικά πεδία στο διάστημα έχουν αρκετά χαμηλές τιμές. Η πρόκληση όμως μεγάλου μαγνητικού πεδίου από ροή συνεχούς ρεύματος στον εξοπλισμό του σκάφους, θα μπορούσε να προκαλέσει μεγάλα προβλήματα. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται κατάλληλα μη μαγνητικά υλικά και δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη γείωση του εξοπλισμού.

Τα προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης τόσο σε επίγειες όσο και σε διαστημικές εφαρμογές είναι οι παραγόμενες και οι ακτινοβολούμενες εκπομπές. Όσον αφορά τις παραγόμενες εκπομπές (conducted emissions), ο μηχανισμός διάδοσης είναι μέσω του συστήματος διανομής ισχύος του διαστημικού σκάφους. Με φίλτρα και σωστό σχεδιασμό του συστήματος για μείωση των μεταβατικών φαινομένων, μπορούν αυτού του είδους οι εκπομπές να ελαχιστοποιηθούν. Τόσο οι χαμηλές όσο κι οι υψηλές ακτινοβολούμενες εκπομπές (radiated emissions) μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα σε ευαίσθητα όργανα και αισθητήρες. Έτσι, η αντιμετώπισή τους περιλαμβάνει τεχνικές φιλτραρίσματος και θωράκισης, εντός των ορίων βάρους φυσικά.

Συμπερασματικά, η αξιολόγηση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας διαστημικών συστημάτων είναι μία περίπλοκη διαδικασία, κατά την οποία πρέπει να εξετάζονται πολλές παράμετροι (δίκτυο ισχύος συστήματος, καλωδίωση, γείωση και θωράκιση). Μπορεί στις διαστημικές εφαρμογές οι απαιτήσεις EMC να είναι περισσότερο ευέλικτες σε σχέση με τον εμπορικό κόσμο, δεν παύουν όμως να απαιτούν συνεχείς αξιολογήσεις και δοκιμές καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους, έτσι ώστε να συμβάλουν αποτελεσματικά σε επόμενες διαστημικές αποστολές.[3]

1.3 SpaceWire ως τμήμα εξοπλισμού διαστημικών αποστολών

Το SpaceWire είναι ένα πρότυπο δικτύου επικοινωνιών υψηλής απόδοσης, το οποίο είναι κατάλληλο για χρήση μέσα σε ένα διαστημόπλοιο. Βασίζεται στο πρότυπο επικοινωνιών IEEE 1355 και συντονίζεται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) σε συνεργασία με άλλους διεθνείς διαστημικούς οργανισμούς, όπως η NASA. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιεί σειριακές συνδέσεις από σημείο σε σημείο, πλήρως αμφίδρομες, με ρυθμό διάδοσης δεδομένων που μπορεί να ξεπεράσει τα 100 Mbps. Τα δεδομένα μεταφέρονται σε πακέτα, το μέγεθος των οποίων δεν είναι καθορισμένο, προσφέροντας ευελιξία στο σχεδιασμό του συστήματος.[4]

Η χρήση του SpaceWire σε διαστημικά σκάφη είναι ευρύτατη διότι εξασφαλίζει ότι ο εξοπλισμός είναι συμβατός τόσο σε επίπεδο μονάδας όσο και σε επίπεδο υποσυστήματος. Οι μονάδες επεξεργασίας, μνήμης αλλά και τα συστήματα τηλεμετρίας που εμπεριέχονται στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό ενός διαστημόπλοιου, χρησιμοποιώντας διασυνδέσεις SpaceWire, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερες από μία αποστολές. Έτσι, επιτυγχάνεται μείωση του κόστους και του χρόνου διεκπεραίωσης της αποστολής, βελτίωση της αξιοπιστίας της αλλά και αύξηση του επιστημονικού έργου που υλοποιείται με συγκεκριμένο προϋπολογισμό.

Στα σύγχρονα συστήματα έχει υιοθετηθεί η τεχνική της Διαφορικής Σήμανσης Χαμηλής Τάσης (Low Voltage Differential Signaling, LVDS). Λειτουργεί με χαμηλή τάση και επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες με τη χρήση φθηνών χάλκινων καλωδίων συνεστραμμένου ζεύγους. Αυτός ο τύπος καλωδίωσης σε σύγκριση με ένα ισορροπημένο ζεύγος (ή και έναν απλό αγωγό) μειώνει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ζεύγους καθώς και τις παρεμβολές (crosstalk) μεταξύ γειτονικών ζευγών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας του συστήματος.[5]

Σε επόμενο κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί αναλυτική περιγραφή του προτύπου SpaceWire.

2 Κεφάλαιο 2: Πρότυπα μετρήσεων Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας

2.1 Πρότυπα

Όπως έγινε φανερό και παραπάνω, είναι πλέον απαραίτητη η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα του ηλεκτρονικού εξοπλισμού ενός διαστημικού αεροσκάφους με το περιβάλλον του αλλά και των επιμέρους εξαρτημάτων του μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η επίτευξη του επιστημονικού σκοπού κάθε διαστημικής αποστολής.

Οι απαραίτητες μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας κατά τη διάρκεια σχεδίασης ή κατασκευής ενός εξαρτήματος ή και ολόκληρου συστήματος προλαμβάνουν πιθανά σφάλματα που θα προέκυπταν μελλοντικά και ίσως είχαν καταστροφικές συνέπειες.

Βασική προϋπόθεση ώστε οι μετρήσεις EMC, που πραγματοποιούνται σε εργαστήρια παγκοσμίως, να οδηγούν σε ουσιώδη και χρήσιμα συμπεράσματα για τις διάφορες διαστημικές αποστολές είναι να βασίζονται σε ορισμένα πρότυπα μετρήσεων.

Τα πρότυπα μετρήσεων EMC ορίζουν όρους, κανόνες, μεθόδους δοκιμών, όρια εκπομπών και επίπεδα ανοσίας για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Τα παγκοσμίως αποδεκτά πρότυπα συμβάλλουν στο να είναι οι μετρήσεις συγκρίσιμες μεταξύ τους αλλά και να μπορούν να επαναληφθούν παραμένοντας αξιόπιστες. Προωθούν, επίσης, μία παγκόσμια ομοιομορφία και εναρμόνιση στον κλάδο της Διαστημικής, με βασικό πλεονέκτημα την επιστημονική πρόοδο και σύμπραξη των κρατών.[6]

Το βασικό πρότυπο που ακολουθείται όσον αφορά τις διαστημικές εφαρμογές είναι το “MIL-STD-461”. Είναι ένα στρατιωτικό πρότυπο των ΗΠΑ που περιγράφει τη διαδικασία μετρήσεων του εξοπλισμού για ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Εκδόθηκε το 1967 προκειμένου να ενσωματώσει την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα στην έρευνα και ανάπτυξη των αμυντικών επικοινωνιών. Η τελευταία αναθεώρησή του, στην οποία βασίζονται οι μετρήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η “MIL-STD-461G”. Το πρότυπο αυτό θεσπίζει βασικές απαιτήσεις επαλήθευσης για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών της εκπομπής και της ευαισθησίας ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από ηλεκτρονικό, ηλεκτρολογικό και ηλεκτρομηχανικό εξοπλισμό ή και υποσυστημάτων αυτού, σχεδιασμένων για υπηρεσίες του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ.[7]

Το πρότυπο MIL-STD-461G καθορίζει λεπτομερώς τις απαιτήσεις σε δοκιμές εκπομπών και δοκιμές ευαισθησίας και αποσαφηνίζει τις αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες. Συγκεκριμένα, καθορίζει τις δοκιμές επαγόμενων και ακτινοβολούμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εκπεμπόμενων από μία δομική μονάδα ενός συστήματος, η οποία θα αναφέρεται ως EUT (Equipment Under Test), αλλά και τις δοκιμές ευαισθησίας αυτού παρουσία ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων-διαταραχών.

Στην εργασία αυτή μελετάται το ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο του καλωδίου SpaceWire, οπότε αναλύεται παρακάτω μόνο η διαδικασία δοκιμής ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου (RE102).

Η διαδικασία αυτή ουσιαστικά αποτελεί μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που παράγει το EUT (στην προκειμένη περίπτωση το SpaceWire) σε διάφορα στιγμιότυπα λειτουργίας του σε ένα εύρος συχνοτήτων που υποστηρίζει ο εκάστοτε δέκτης μέτρησης. Είναι απαραίτητη η σάρωση ολόκληρου του επιλεγμένου εύρους ζώνης για κάθε δοκιμή. Τα προφίλ μέτρησης (διαγράμματα πλάτους-συχνότητας) παράγονται τη στιγμή της δοκιμής και είναι συνεχή. Τα διαγράμματα αυτά συγκρίνονται με τα ισχύοντα όρια εκπομπών, τα οποία επίσης καθορίζονται από το MIL-STD-461G.

Requirement	Description
CE101	Conducted Emissions, Audio Frequency Currents, Power Leads
CE102	Conducted Emissions, Radio Frequency Potentials, Power Leads
CE106	Conducted Emissions, Antenna Port
CS101	Conducted Susceptibility, Power Leads
CS103	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Intermodulation
CS104	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Rejection of Undesired Signals
CS105	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Cross-Modulation
CS109	Conducted Susceptibility, Structure Current
CS114	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection
CS115	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, Impulse Excitation
CS116	Conducted Susceptibility, Damped Sinusoidal Transients, Cables and Power Leads
CS117	Conducted Susceptibility, Lightning Induced Transients, Cables and Power Leads
CS118	Conducted Susceptibility, Personnel Borne Electrostatic Discharge
RE101	Radiated Emissions, Magnetic Field
RE102	Radiated Emissions, Electric Field
RE103	Radiated Emissions, Antenna Spurious and Harmonic Outputs
RS101	Radiated Susceptibility, Magnetic Field
RS103	Radiated Susceptibility, Electric Field
RS105	Radiated Susceptibility, Transient Electromagnetic Field

Εικόνα 2-1: Emission and susceptibility requirements

Οι απαιτήσεις RE102 για διαστημικούς σκοπούς εφαρμόζονται στο εύρος συχνοτήτων 10kHz έως 18GHz.

Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας αυτής το πρότυπο απαιτεί τον εξής εξοπλισμό:

- Δέκτες μέτρησης
- Συσκευή καταγραφής δεδομένων
- Κεραίες
 - ✓ ραβδοειδή κεραία για εύρος συχνοτήτων 10kHz - 30MHz
 - ✓ δικωνική κεραία για εύρος συχνοτήτων 30MHz - 200MHz
 - ✓ χοανοειδή κεραία για εύρος συχνοτήτων 200MHz - 1GHz
 - ✓ χοανοειδή κεραία για εύρος συχνοτήτων 1GHz - 18GHz
(οι δύο τελευταίες κεραίες έχουν διαφορετικές διαστάσεις)
- Γεννήτρια σήματος
- LISNs (Line Impedance Stabilization Networks)

(είναι βαθυπερατά φίλτρα που τοποθετούνται συνήθως ανάμεσα σε πηγές ρεύματος AC ή DC και το EUT και απομονώνουν ανεπιθύμητα σήματα ραδιοσυχνοτήτων από την πηγή τροφοδοσίας).[8]

2.2 Δέκτης ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών

Σημαντικό μέρος κάθε δοκιμής μετρήσεων είναι ο δέκτης, ο οποίος λαμβάνει τις εκπομπές του εξοπλισμού που ελέγχεται. Μέσω της κεραίας που συνδέεται με τον δέκτη, οι εκπομπές οπτικοποιούνται σε ημιλογαριθμικά διαγράμματα πλάτους-συχνότητας [dBV-Hz].

Οι τιμές που λαμβάνει ο χρήστης από τον δέκτη είναι οι τιμές τάσης στον ακροδέκτη του καλωδίου που συνδέει την κεραία με αυτόν. Επομένως, ο χρήστης για να μπορεί να αξιολογεί τις εκπομπές του εξοπλισμού, θα πρέπει οι λαμβανόμενες τιμές να μετατρέπονται σε τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου. Η μετατροπή αυτή γίνεται μέσω του συντελεστή κεραίας (antenna factor, AF).

Συντελεστής κεραίας ορίζεται ως ο λόγος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου προς την τάση που προκαλείται στο τερματικό της κεραίας. Για μία κεραία, ο συντελεστής κεραίας έχει μονάδες 1/m και ορίζεται από τη σχέση:

$AF_{dBm^{-1}} = E_{dBV/m} - V_{dBV}$, όπου E είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και V η τάση στο τερματικό της κεραίας.[9]

Υπ' όψιν θα πρέπει, επίσης, να ληφθούν και οι απώλειες του καλωδίου (Cable Losses, CL) που συνδέει την κεραία με τον δέκτη. Έτσι, λοιπόν, οι τελικές τιμές που είναι χρήσιμες προς ανάλυση και επεξεργασία δίνονται από τη σχέση:

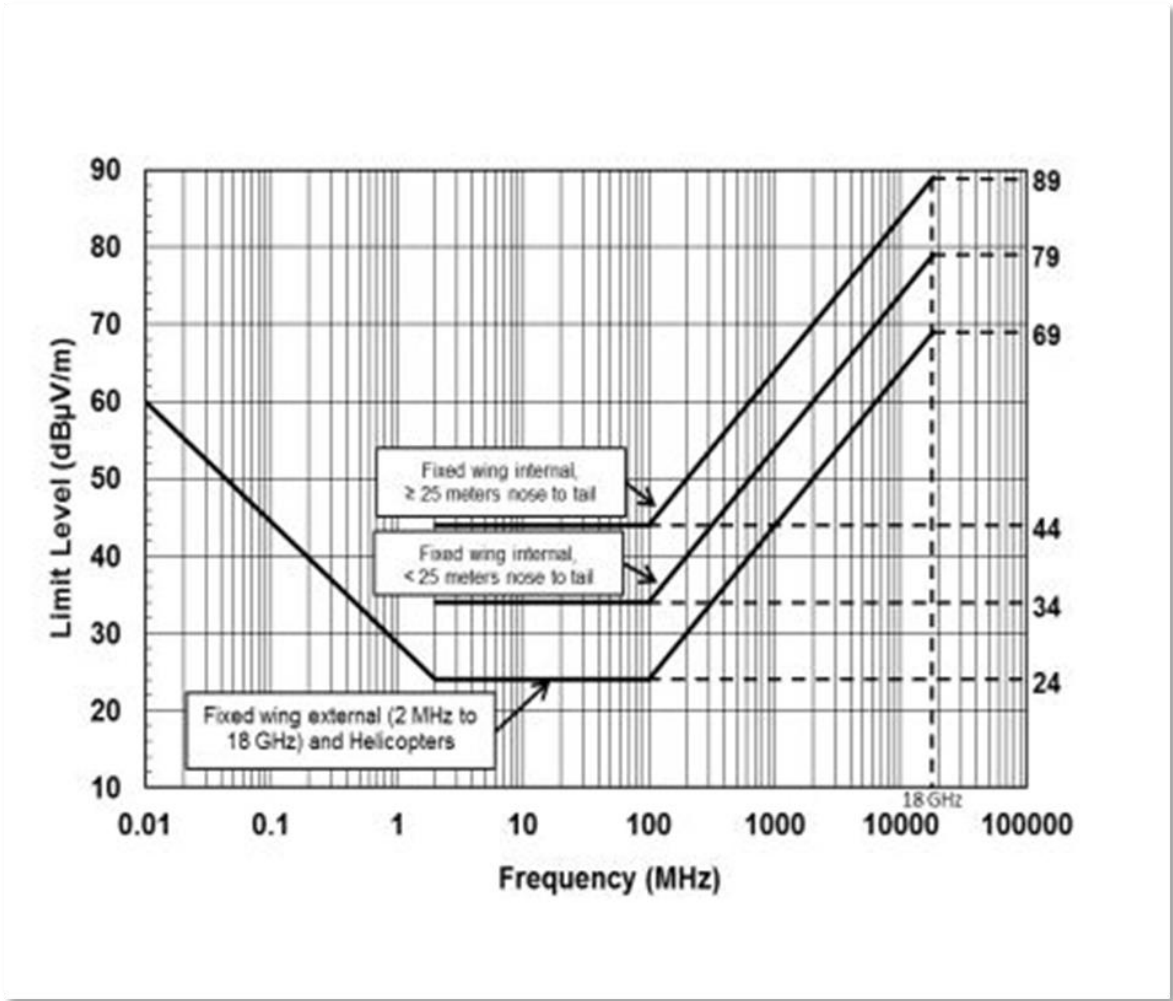
$$E_{dBV/m} = V_{dBV} + AF_{dBm^{-1}} + CL_{dB}$$

Η μετατροπή των τιμών των διαγραμμάτων που λαμβάνει ο χρήστης από τον δέκτη είναι απολύτως αναγκαία, προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν οι εκπομπές του εξαρτήματος που ελέγχεται με τα επιτρεπτά όρια εκπομπών. Ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το εν λόγω εξάρτημα αλλάζουν οι τιμές των ορίων. Τα ισχύοντα διαγράμματα των ορίων (μέγιστες τιμές έντασης πεδίου ανά συχνότητα) δίνονται στο MIL-STD-461G για πληθώρα εφαρμογών και για τα αντίστοιχα εύρη συχνοτήτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, στην οποία μελετώνται οι ακτινοβολούμενες εκπομπές (ηλεκτρικό πεδίο) ενός καλωδίου SpaceWire, οι εκπομπές που προκύπτουν πειραματικά συγκρίνονται με το παρακάτω διάγραμμα ορίων, το οποίο ισχύει για εύρος συχνοτήτων 10kHz έως 18GHz.

Γενικά, το εύρος συχνοτήτων στο οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις εκπομπής ενός εξαρτήματος προσδιορίζεται από το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του δέκτη που χρησιμοποιείται.

Συγκεκριμένα, για τις μετρήσεις μας στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε ο δέκτης μέτρησης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής Schaffner SMR 4530, ο οποίος λειτουργεί σε εύρος συχνοτήτων 9kHz έως 2.75GHz.[10]



Εικόνα 2-2: Limit for aircraft and space system applications

3 Κεφάλαιο 3: SpaceWire

3.1 Εισαγωγή

Το SpaceWire είναι ένα πρότυπο δικτύου δεδομένων, σχεδιασμένο έτσι ώστε να συνδέει μονάδες επεξεργασίας και μνήμης, συστήματα τηλεμετρίας και αισθητήρες σε ένα διαστημικό σκάφος. Παρέχει ζεύξεις δεδομένων υψηλής ταχύτητας (μέχρι και 200Mbps), πλήρως αμφίδρομες με δυνατότητα σύνδεσης εξοπλισμού μέσω καλωδίου SpaceWire.

Δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά από την Ευρωπαϊκή Συνεργασία Διαστημικής Προτυποποίησης (European Cooperation for Space Standardization, ECSS) το 2003.

Σκοπός του προτύπου αυτού είναι η εξασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας του εξοπλισμού και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης σε διάφορες διαστημικές αποστολές.

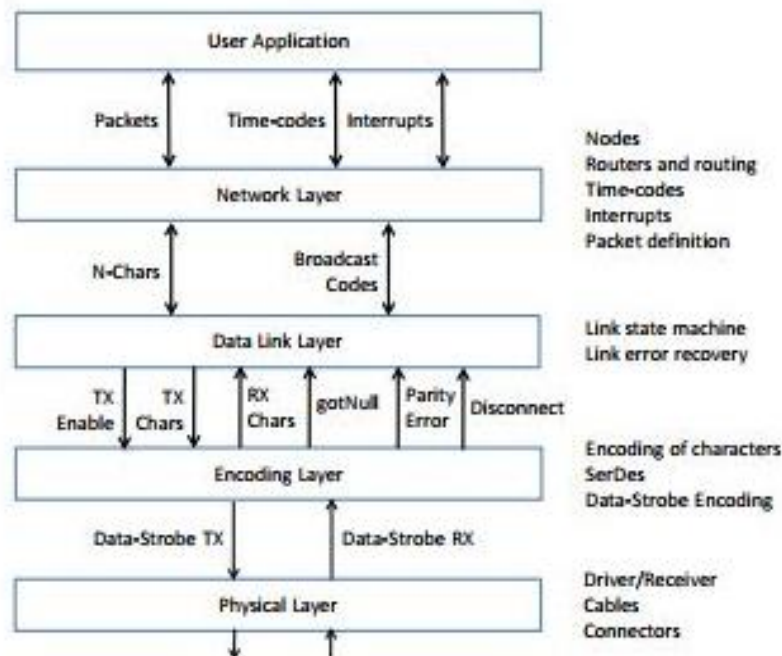
Η χαμηλή του πολυπλοκότητα διευκολύνει την κατασκευή συστημάτων χειρισμού δεδομένων υψηλής απόδοσης,

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του προτύπου SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C.

Είναι ένα από τις σειρές προτύπων ECSS, που έχουν στόχο τη διαχείριση και διασφάλιση διαστημικών έργων και εφαρμογών. Αποτελούν πρωτοβουλία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος με σκοπό την ανάπτυξη και διατήρηση κοινών προτύπων.

3.2 Αναλυτική περιγραφή του προτύπου

Το πρότυπο SpaceWire είναι υλοποιημένο στα εξής επίπεδα:



Εικόνα 3-1: SpaceWire protocol stack

Το φυσικό επίπεδο παρέχει τα εξής:

- Υπηρεσία μετάδοσης δεδομένων και σημάτων στροβοσκοπίου από το επίπεδο κωδικοποίησης πάνω στο φυσικό μέσο
- Υπηρεσία λήψης δεδομένων και στροβοσκοπικών σημάτων από το φυσικό μέσο, τα οποία μεταδίδει στο επίπεδο κωδικοποίησης

Επίσης, δέχεται αιτήσεις παροχής υπηρεσιών από το επίπεδο κωδικοποίησης και είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων και σημάτων στροβοσκοπίου σε συνδέσμους και συγκροτήματα καλωδίων.

Το επίπεδο κωδικοποίησης υλοποιεί τα παρακάτω:

- Κωδικοποίηση χαρακτήρων σε σύμβολα, τα οποία είναι έτοιμα προς μετάδοση στο φυσικό επίπεδο
- Ανάκτηση ροών δεδομένων λαμβανόμενα από το φυσικό επίπεδο και αποκωδικοποίηση αυτών σε χαρακτήρες

Δέχεται, επίσης, αιτήματα εξυπηρέτησης από το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων.

Το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων παρέχει τα εξής:

- Αποστέλλει και λαμβάνει N-chars (συστατικά των πακέτων) μέσω μίας ζεύξης SpaceWire
- Αποστέλλει και λαμβάνει κωδικούς (κωδικούς χρόνου και κωδικούς διανεμημένων διακοπών) σε μία διασύνδεση SpaceWire

Ακόμη, δέχεται αιτήσεις εξυπηρέτησης από το επίπεδο δικτύου.

Τέλος, το επίπεδο δικτύου:

- αποστέλλει και λαμβάνει πακέτα σε ένα δίκτυο SpaceWire
- αποστέλλει και λαμβάνει κωδικούς χρόνου σε ένα δίκτυο SpaceWire
- και αποστέλλει και λαμβάνει διανεμημένες διακοπές σε ένα δίκτυο SpaceWire

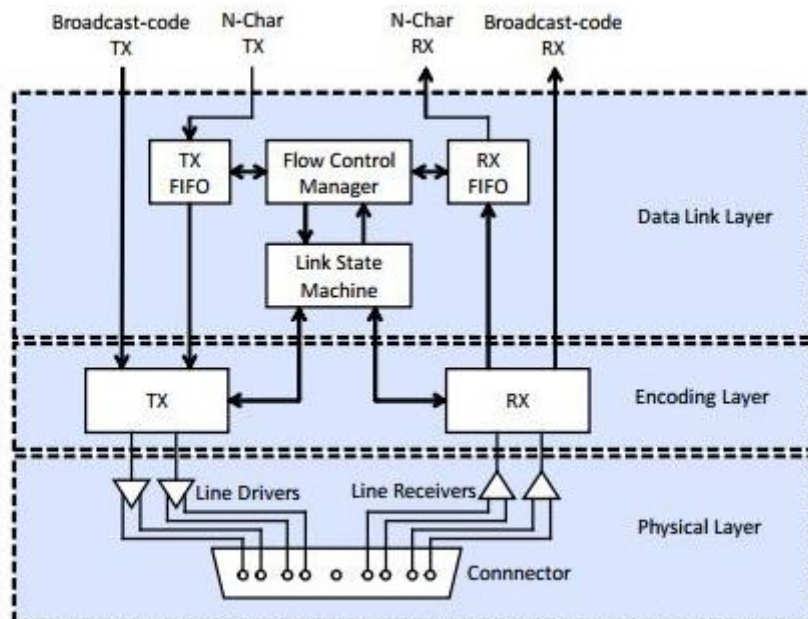
Επίσης, δέχεται αιτήσεις παροχής υπηρεσιών από τον χρήστη εφαρμογών.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αρχιτεκτονική μιας θύρας SpaceWire.

Αυτή περιλαμβάνει:

- μία διεπαφή θύρας SpaceWire για μετάδοση πακέτων, μία διεπαφή για λήψη πακέτων, μία διεπαφή μετάδοσης κωδικού εκπομπής και μία διεπαφή λήψης κωδικού εκπομπής
- μία ουρά μετάδοσης (TX FIFO) η οποία αποθηκεύει τα N-Chars που παρέχονται από την εφαρμογή μέσω της διεπαφής θύρας SpaceWire μέχρι να μπορέσουν να σταλούν μέσω της ζεύξης

- μία ουρά λήψης (RX FIFO) η οποία αποθηκεύει τα λαμβανόμενα N-Chars μέχρι αυτά να μπορούν να διαβαστούν από την εφαρμογή μέσω μιας διεπαφής θύρας SpaceWire
- έναν διαχειριστή ελέγχου ροής δεδομένων, που θα εμποδίζει την αποστολή δεδομένων όταν δεν υπάρχει χώρος στη FIFO λήψης
- μία μηχανή κατάστασης σύνδεσης η οποία θα είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της εκκίνησης μίας σύνδεσης και την ανάκτηση σφαλμάτων
- έναν πομπό που είναι υπεύθυνος για την κωδικοποίηση των χαρακτήρων που θα αποσταλούν μέσω της σύνδεσης σε σύμβολα, για τη σειριοποίηση αυτών των συμβόλων σε μία ροή δυαδικών ψηφίων και την κωδικοποίηση της ροής δυαδικών ψηφίων σε δεδομένα και ζεύγη σημάτων στροβοσκοπίου
- έναν δέκτη ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αποκωδικοποίηση των λαμβανόμενων δεδομένων και ζευγών σημάτων στροβοσκοπίου σε μία ροή δυαδικών ψηφίων δεδομένων, για την απελευθέρωση της ροής των δυαδικών ψηφίων σε σύμβολα και την αποκωδικοποίηση των λαμβανόμενων συμβόλων σε χαρακτήρες
- ένα ζεύγος οδηγών γραμμής που μετατρέπει τα δεδομένα και τα σήματα στροβοσκοπίου σε σήματα LVDS για να τα οδηγήσει σε όλη τη σύνδεση
- ένα ζεύγος δεκτών γραμμής που δέχονται τα σήματα LVDS και ανακτούν τα δεδομένα και τα στροβοσκοπικά σήματα τα οποία οδηγούνται σε όλη τη σύνδεση



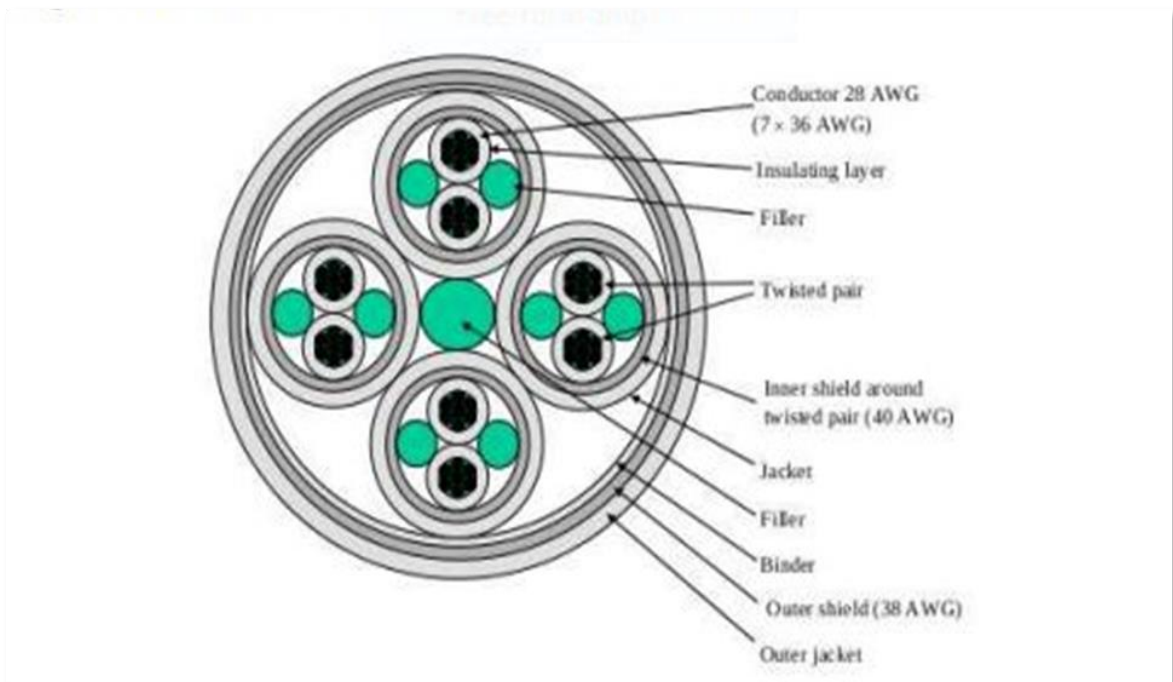
Εικόνα 3-2: SpaceWire port architecture

3.3 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο καθορίζει τους οδηγούς γραμμών και τους δέκτες για μετάδοση και λήψη των δεδομένων SpaceWire και των σημάτων στροβοσκοπίου στο φυσικό μέσο. Επίσης, καθορίζει τα καλώδια, τους συνδέσμους και τα κομμάτια PCB που συνθέτουν το φυσικό μέσο.

3.3.1 Καλώδια

Το καλώδιο SpaceWire αποτελείται από τέσσερα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων και μεταφέρει τέσσερα διαφορετικά σήματα.



Εικόνα 3-3: SpaceWire cable construction

Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση κάθε ζεύγους διαφορετικών σημάτων πρέπει να είναι $100 \pm 6 \Omega$.

Οι απώλειες ημιτονοειδούς σήματος μέσω του αφόρτιστου ισορροπημένου καλωδίου ακολουθούν τις τιμές του πίνακα:

Data rate	Frequency (3rd harmonic)	Insertion loss
10 Mbps	15 MHz	≤ 0.27 dB/m
100 Mbps	150 MHz	≤ 0.45 dB/m
200 Mbps	300 MHz	≤ 0.65 dB/m
400 Mbps	600 MHz	≤ 0.94 dB/m

Πίνακας 3.1: Insertion loss values to be respected for a cable

Οι απώλειες επιστροφής καλωδίου μέσω του αφόρτιστου ισορροπημένου καλωδίου πρέπει να είναι οι εξής:

Data rate	Frequency (3rd harmonic)	Return loss
10 Mbps	15 MHz	≤ 2 dB/m
100 Mbps	150 MHz	≤ 1.9 dB/m
200 Mbps	300 MHz	≤ 1.5 dB/m
400 Mbps	600 MHz	≤ 1.2 dB/m

Πίνακας 3.2: Return loss values to be respected for a cable

3.3.2 Σύνδεσμοι

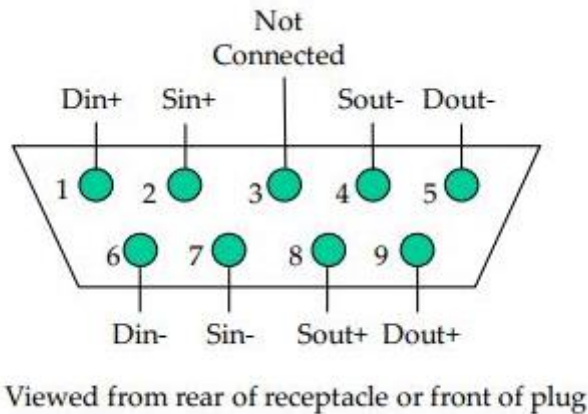
Οι σύνδεσμοι για ένα συγκρότημα καλωδίων SpaceWire πρέπει να είναι τύπου A ή τύπου B:

- ✓ Ο σύνδεσμος τύπου A πρέπει να είναι μικροσκοπικού τύπου D σύνδεσμος με εννέα επαφές πρεσαρίσματος ή συγκολλήσεως, όπως ορίζεται στο ESCC 3401/029 και στο ESCC 3401/071.
- ✓ Ο σύνδεσμος τύπου B είναι οποιουδήποτε τύπου σύνδεσμος με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 1. Ζεύγη επαφών με διαφορική αντίσταση $100 \pm 6 \Omega$
 2. Συμβατός με καλώδια ESCC 3902/003 ή ESCC 3902/002
 3. Συμβατός με το περιβάλλον χώρου όπως ορίζεται στο ESCC 3401

Οι υποδοχείς χρησιμοποιούνται στις πλακέτες κυκλωμάτων και στις μονάδες συναρμολόγησης στις οποίες τα καλώδια SpaceWire πρέπει να συνδεθούν. Οι υποδοχείς πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με θηλυκές επαφές. Οι αγωγοί SpaceWire πρέπει να συγκολληθούν απευθείας ή να επικαλυφθούν στις επαφές.

Επίσης, τα βύσματα χρησιμοποιούνται σε συγκροτήματα καλωδίων. Πρέπει να είναι εξοπλισμένα με αρσενικές επαφές. Οι αγωγοί SpaceWire πρέπει να συγκολληθούν απευθείας ή να επικαλυφθούν στις επαφές.

Οι επαφές των συνδέσμων φαίνονται στην επόμενη εικόνα:



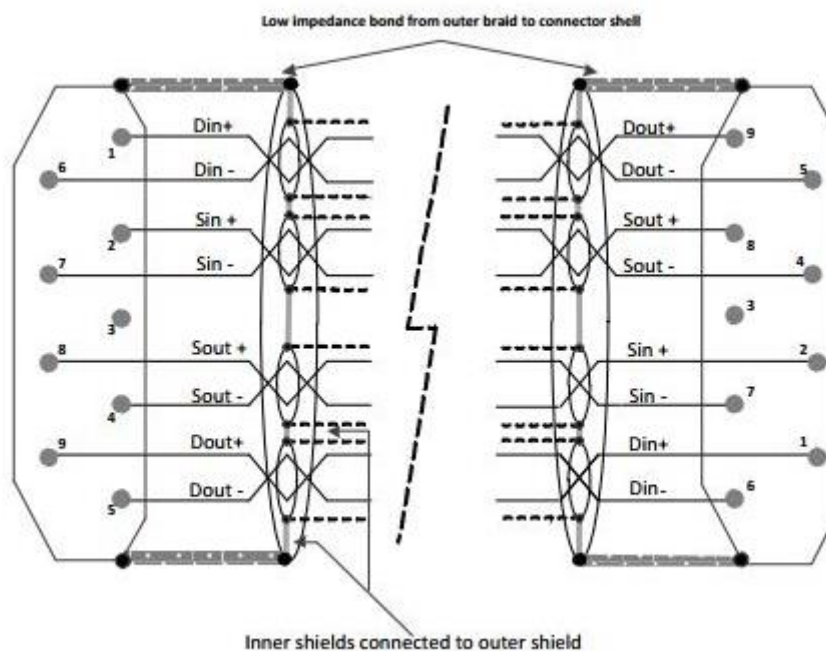
Εικόνα 3-4: SpaceWire connector contact identification

3.3.3 Συγκροτήματα καλωδίων

Αποτελούνται από δύο πανομοιότυπα βύσματα που συνδέονται με κάποιο κομμάτι καλωδίου.

Η ημιτονοειδής απώλεια εισαγωγής μέσω ενός αφόρτιστου ισορροπημένου συγκροτήματος καλωδίων πρέπει να είναι μικρότερη από 6dB.

Οι επαφές των συνδέσμων τύπου A ενός συγκροτήματος καλωδίων φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 3-5: SpaceWire cable assembly type A

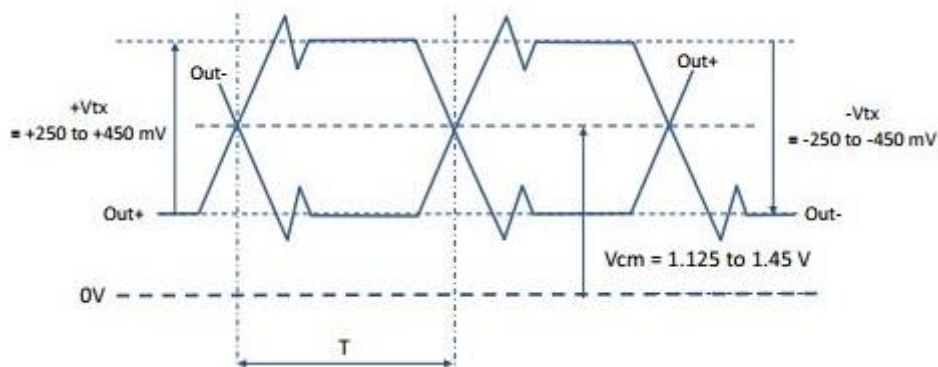
3.3.4 LVDS PCB tracks

Όταν χρησιμοποιούνται σήματα LVDS, τα κομμάτια των PCB πρέπει να είναι διαφορεικά με μία διαφορική αντίσταση $100 \pm 6 \Omega$.

Επίσης, η διαφορά μήκους μεταξύ των δύο διαδρομών που σχηματίζουν ένα διαφορικό ζεύγος πρέπει να είναι μικρότερη από 3mm.

3.3.5 Οδηγοί γραμμών και δέκτες

Το SpaceWire χρησιμοποιεί σήματα LVDS για μεταφορά δεδομένων. Όπως αναφέρεται στο πρότυπο ANSI / TIA / EIA-644-A-2001, η LVDS χρησιμοποιεί ισορροπημένα σήματα για να παρέχει πολύ υψηλής ταχύτητας διασύνδεση χρησιμοποιώντας μία ταλάντευση χαμηλής τάσης (350mV τυπικά). Η ισορροπημένη ή διαφορική σηματοδότηση παρέχει επαρκές περιθώριο θορύβου για χρήση χαμηλών τάσεων σε πρακτικά συστήματα. Ταλάντευση χαμηλής τάσης σημαίνει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας με υψηλή ταχύτητα. Η LVDS είναι κατάλληλη για διασυνδέσεις μονάδων σε αποστάσεις άνω των 10m ανάλογα με τον ρυθμό σηματοδότησης.



Εικόνα 3-6: LVDS transmitter output signals

3.4 Επίπεδο κωδικοποίησης

Το επίπεδο κωδικοποίησης καθορίζει την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση χαρακτήρων σε σύμβολα, τη σειριοποίηση/απο-σειριοποίηση των κωδικοποιημένων συμβόλων σε μία ροή δυαδικών ψηφίων και την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση δεδομένων στροβοσκοπίου σε σειριακή ροή δυαδικών ψηφίων.

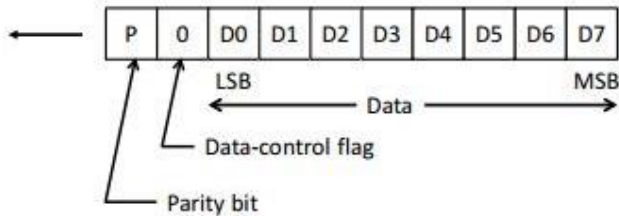
3.4.1 Σειριοποίηση και απο-σειριοποίηση

Οι χαρακτήρες και οι κωδικοί ελέγχου κωδικοποιούνται και σειριοποιούνται. Τα στροβοσκοπικά δεδομένα κωδικοποιούνται και διαβιβάζονται με τη σειρά με την οποία παραλαμβάνονται από το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων.

Οι εισερχόμενοι χαρακτήρες και κωδικοί ελέγχου διαβιβάζονται στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων με τη σειρά με την οποία έχουν ληφθεί. Μόνο χαρακτήρες και κωδικοί ελέγχου που δεν περιέχουν σφάλμα ισοτιμίας μεταβιβάζονται στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων.

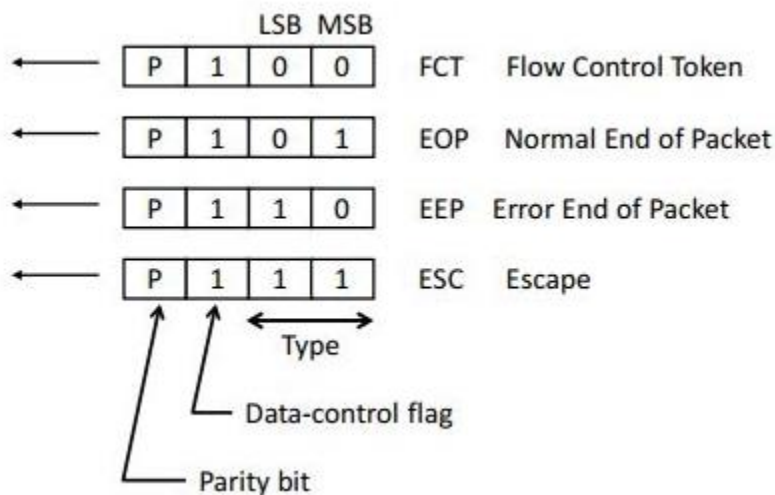
3.4.2 Κωδικοποίηση χαρακτήρων και κωδικών ελέγχου

Αρχικά, ένας χαρακτήρας δεδομένων κωδικοποιείται σε 10 bits με το προκύπτον σύμβολο δεδομένων να περιέχει ένα bit ισοτιμίας, μία σημαία ελέγχου δεδομένων και οκτώ δυαδικά ψηφία δεδομένων όπως απεικονίζεται παρακάτω:



Εικόνα 3-7: Data character encoding

Ένας χαρακτήρας ελέγχου κωδικοποιείται σε τέσσερα δυαδικά ψηφία με το τελικό σύμβολο ελέγχου να περιέχει ένα bit ισοτιμίας, μία σημαία ελέγχου δεδομένων και ένα δυαδικό bit όπως φαίνεται στο σχήμα:



Εικόνα 3-8: Control character encoding

3.4.3 Ρυθμός σηματοδότησης δεδομένων

Η θύρα εξόδου του SpaceWire πρέπει να λειτουργεί σε 10 ± 1 Mbps μέχρι να τεθεί σε λειτουργία με διαφορετικό ρυθμό σηματοδότησης δεδομένων.

Ο ελάχιστος ρυθμός σηματοδότησης δεδομένων στον οποίο πρέπει να λειτουργεί μία θύρα εξόδου είναι 2Mbps.

3.5 Επίπεδο σύνδεσης δεδομένων

Το στρώμα σύνδεσης δεδομένων λαμβάνει N-Chars και κωδικούς εκπομπής από το επίπεδο δικτύου. (Τα N-Chars και οι κωδικοί εκπομπής κωδικοποιούνται από το επίπεδο κωδικοποίησης και αποστέλλονται μέσω της σύνδεσης SpaceWire.)

Επίσης, περνά μία ακολουθία χαρακτήρων δεδομένων, χαρακτήρες ελέγχου και κωδικούς ελέγχου στο επίπεδο κωδικοποίησης.

Το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων ελέγχεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη διαχείριση με τις εξής παραμέτρους:

1. Ενεργοποίηση, η οποία όταν επιβεβαιωθεί επιτρέπει τη λειτουργία θύρας SpaceWire.
2. Το LinkStart, το οποίο όταν επιβεβαιωθεί προκαλεί ενεργοποίηση μίας θύρας SpaceWire για να ξεκινήσει η σύνδεση SpaceWire στέλνοντας Nulls.
3. Αυτόματη εκκίνηση, η οποία όταν επιβεβαιωθεί προκαλεί ενεργοποίηση μίας θύρας SpaceWire για να ξεκινήσει η σύνδεση SpaceWire μόλις ληφθεί ένα Null.

Ακόμη, πρέπει να παρέχει τις ακόλουθες πληροφορίες κατάστασης:

1. Τρέχουσα κατάσταση της μηχανής καταστάσεων επιπέδου σύνδεσης δεδομένων
2. Σημείες λάθους:
 - (α) Αποσύνδεση
 - (β) Σφάλμα ισοτιμίας
 - (γ) Σφάλμα ESC
 - (δ) Πιστωτικό λάθος

3.6 Επίπεδο δικτύου

3.6.1 Πακέτα SpaceWire

Ένα πακέτο SpaceWire περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους χαρακτήρες δεδομένων που ακολουθούνται από τον δείκτη τέλους πακέτων (EOP) ή από τον δείκτη εσφαλμένου τέλους πακέτων (EEP).

Η έναρξη ενός πακέτου είναι είτε:

1. Ο πρώτος χαρακτήρας δεδομένων που αποστέλλεται μετά την αρχικοποίηση ή επανεγκατάσταση μετά από αποσύνδεση μίας σύνδεσης.
2. Ο χαρακτήρας δεδομένων που ακολουθεί αμέσως μετά από EOP ή EEP, δηλαδή ο πρώτος χαρακτήρας δεδομένων μετά το τέλος του προηγούμενου πακέτου.

Η μορφή ενός πακέτου φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 3-9: SpaceWire packet format

3.6.2 Κόμβος SpaceWire

Ένας κόμβος SpaceWire ενεργεί ως:

1. Μία πηγή πακέτων που αποστέλλονται μέσω ενός δικτύου SpaceWire
2. Ένας προορισμός για πακέτα που έχουν ληφθεί μέσω ενός δικτύου SpaceWire ή
3. Και η πηγή και ο προορισμός των πακέτων

Ένας κόμβος SpaceWire μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ακραία σημεία έκαστο των οποίων παρέχει μία διασύνδεση μεταξύ μίας θύρας και ενός συστήματος κεντρικού υπολογιστή.

3.6.3 Δρομολογητές SpaceWire

Ένας διακόπτης δρομολόγησης SpaceWire προωθεί ένα πακέτο που φτάνει σε μία θύρα προς τον απαιτούμενο προορισμό του, μέσω μίας άλλης θύρας, όπως καθορίζεται από τον πρώτο χαρακτήρα δεδομένων του πακέτου και το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης.

3.6.4 Δίκτυο SpaceWire

Ένα δίκτυο SpaceWire περιλαμβάνει δύο ή περισσότερους κόμβους και μηδέν ή περισσότερους διακόπτες δρομολόγησης διασυνδεδεμένους με συνδέσεις SpaceWire.

Αποστέλλει πακέτα από κάθε κόμβο πηγής σε έναν ή περισσότερους κόμβους προορισμού.

3.6.5 Μονάδες και συσκευές SpaceWire

Μία μονάδα SpaceWire περιλαμβάνει μηδέν ή περισσότερους κόμβους και μηδέν ή περισσότερους δρομολογητές. Πρέπει να περιέχει μία εφαρμογή που χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες ενός δικτύου SpaceWire.

Συσκευή SpaceWire είναι ένας κόμβος ή δρομολογητής με αναγνωριστικό συσκευής.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, όλα τα παραπάνω είναι σύμφωνα με το πρότυπο ECSS-E-ST-50-12C.[11]

Η σειρά ECSS-E-ST-50-5x δημοσιεύθηκε το 2010. Τα πρότυπα αυτά καθορίζουν μία σειρά από πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα οποία χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το πρότυπο SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C, ώστε να προσφέρουν ένα ολοκληρωμένο σύνολο υπηρεσιών στους χρήστες.

Μία άλλη έκδοση των προτύπων είναι αυτή που καθορίζει το πρωτόκολλο Remote Memory Access (RMA), το οποίο λειτουργεί στο SpaceWire. Υποστηρίζει την ανάγνωση και την εγγραφή στη μνήμη σε έναν απομακρυσμένο κόμβο SpaceWire. Επίσης, είναι ικανό να ρυθμίζει ένα δίκτυο, να ελέγχει τις επιμέρους μονάδες και να συλλέγει δεδομένα και πληροφορίες για αυτές. Τέλος, είναι δυνατή η λειτουργία του παράλληλα με άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας που εφαρμόζονται στο SpaceWire.[12]

3.7 Τρέχουσα κατάσταση - Εξελίξεις

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία εξέλιξη στον επιστημονικό τομέα, που έχει ως κύριο αντικείμενο μελέτης την τεχνολογία SpaceWire. Εξελίχθηκε πολύ γρήγορα σε παγκόσμιο πρότυπο για δίκτυα δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε διαστημικά αεροσκάφη.

Από το 2007, χρονιά κατά την οποία πραγματοποιήθηκε το 1^ο Διεθνές Συνέδριο SpaceWire, αρχίζουν κιόλας να μελετώνται νέες τεχνικές για βελτίωση της απόδοσης του SpaceWire, για αποτελεσματικότερη διάγνωση σφαλμάτων, για αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων αλλά και για οικονομικότερη χρησιμοποίηση των πόρων χωρίς όμως αυξημένες απώλειες. Επίσης, αναδύονται νέες γενιές SpaceWire, οι λεγόμενες SpaceFibre, αλλά και εμπλουτισμένα πρότυπα ώστε να εξυπηρετούν ικανοποιητικά τις ανάγκες του κλάδου της Ρομποτικής στο Διάστημα.

Παρακάτω αναφέρονται πιο συγκεκριμένα ενδεικτικές ερευνητικές τάσεις που έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια στο θεσμό του Διεθνούς Συνεδρίου SpaceWire, που λαμβάνει χώρα σχεδόν κάθε χρόνο και δίνει το έναυσμα ώστε να έρθουν στο φως νέες ιδέες και επιτεύγματα σχετικά με την τεχνολογία SpaceWire.

Στα πρώτα συνέδρια είναι εμφανής η ανάγκη ανεξαρτητοποίησης της φυσικής υλοποίησης του SpaceWire από το περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, το ωφέλιμο φορτίο ενός δορυφόρου ενσωματώνεται σε ένα δίαυλο διαστημικού σκάφους και τα δύο μαζί αποτελούν το διαστημικό όχημα. Τα ωφέλιμα φορτία και οι δίαυλοι αποθηκεύονται σε αποθήκες και όταν καθίσταται ανάγκη συνδέονται μεταξύ τους μέσω SpaceWire. Αυτά συνοψίζουν την έννοια του ORS (Operationally Responsive Space). Όμως, το πρότυπο SpaceWire δεν είναι επαρκές όσον αφορά τις καλωδιώσεις και τους συνδέσμους, γι' αυτό και εξετάστηκαν μη συνηθισμένοι σύνδεσμοι SpaceWire ως προς την καταλληλότητά τους για ORS.

Επίσης, ήρθαν στο προσκήνιο νέες τεχνικές για διάγνωση δικτύων SpaceWire με τη χρήση εξομοιωτών μεταδόσεων από κόμβο σε κόμβο χωρίς τη φυσική παρουσία των εξεταζόμενων συσκευών.

Ένα βασικό επίτευγμα, που μελετάται μέχρι και σήμερα, είναι η ανάπτυξη δομών πομπού - δέκτη υψηλής απόδοσης με οπτικές ίνες για διασύνδεση δεδομένων SpaceFibre. Πρόκειται ουσιαστικά για δύο ηλεκτρονικές μονάδες που συνδέονται με οπτική ζεύξη υψηλής ταχύτητας. Η ιδέα πρωτοεμφανίστηκε το 2010, ενώ το 2014 έγιναν σαφέστερα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει στις διαστημικές επικοινωνίες.

Η SpaceFibre, λοιπόν, είναι ζεύξη δεδομένων υψηλής ταχύτητας (της τάξης των Gbps), είναι συμβατή με το SpaceWire σε επίπεδο πακέτου και λειτουργεί μέσω ηλεκτρικών και οπτικών μέσων. Είναι ικανή να παρέχει υψηλής ποιότητας υπηρεσίες ενσωματώνοντας λειτουργίες ανίχνευσης και ανάκτησης σφαλμάτων. Μέχρι και σήμερα μελετάται η χρήση SpaceFibre σε ολοκληρωμένα δίκτυα για όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων τους.

Ένας βασικός πυλώνας των ερευνών είναι η κατά το δυνατόν μείωση των χρησιμοποιούμενων υλικών με σκοπό την κατασκευή Low-mass SpaceWire. Το βασικό ερώτημα που τέθηκε είναι το εάν είναι δυνατή η μείωση της μάζας του καλωδίου κατά 30-50 % χωρίς να αλλάζουν οι μηχανικές ιδιότητες, να μειώνονται οι ταχύτητες διάδοσης ή να αυξάνονται οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Για βραχείς συνδέσεις (3-5m) τα παραπάνω προβλήματα δεν προκαλούν σοβαρή ανησυχία.

Δεν θα πρέπει εδώ να παραλειφθούν οι συνεχείς προσπάθειες για αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Μία εφαρμογή αυτού είναι το Giga-SpaceWire, το οποίο παρέχει

συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων με ταχύτητες που φτάνουν τα 2.5 έως και 5 Gbps. Οι αλλαγές σε σχέση με το SpaceWire έχουν πραγματοποιηθεί στα χαμηλότερα στρώματα, οπότε είναι συμβατό με εφαρμογές SpaceWire μέσω κατάλληλων συνδέσμων.

Στο σημείο αυτό καλό είναι να αναφερθεί η ανάπτυξη ενός εργαλείου προσομοίωσης και παρακολούθησης δικτύων δεδομένων που υποστηρίζουν τη χρήση SpaceWire. Πρόκειται για το εργαλείο iSAFT-PVS, το οποίο παρουσιάστηκε στο 6^ο Συνέδριο SpaceWire το 2014. Παρακάτω θα αναλυθεί η λειτουργία του iSAFT, διότι χρησιμοποιείται στην πειραματική διαδικασία της εργασίας αυτής.

Την τελευταία πενταετία, οι απαιτήσεις των δικτύων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα διαστημικής ρομποτικής έχουν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό. Η εξερεύνηση του διαστήματος και η λειτουργία των σκαφών σε τροχιά απαιτούν αυτόνομες και ακριβέστερες δεξιότητες των συστημάτων. Η μετάδοση εικόνων δεδομένων και δεδομένων προερχομένων από αισθητήρες απαιτεί μεγάλα εύρη ζώνης, ενώ η ανάγκη για απόκριση σε πραγματικό χρόνο καθιστά απαραίτητη την αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης.

Έτσι, λοιπόν, το αρχικό πρότυπο εξελίσσεται σιγά σιγά στην οικογένεια προτύπων SpaceWire-2, η οποία καλύπτει πλήρως τις τρέχουσες ανάγκες.

Μία εφαρμογή που βασίζεται στα παραπάνω είναι η SpaceFibre κάμερα, η οποία παρουσιάστηκε το 2018. Το SpaceFibre, το οποίο περιλαμβάνεται στο SpW-2, μπορεί να υποστηρίξει πολύ υψηλές ταχύτητες δεδομένων, που απαιτούνται από κάθε είδους αισθητήρα αλλά και τη σύνδεση πολλών μονάδων μνήμης, οι οποίες επίσης απαιτούν υψηλής απόδοσης διασυνδέσεις μεταξύ τους. Προφανώς, είναι απαραίτητος ένας αισθητήρας εικόνας, ο οποίος θα είναι σε θέση να παράγει δεδομένα με ρυθμούς άνω των 5Gbps. Έτσι, λοιπόν, η SpaceFibre κάμερα παρέχει υψηλή ανάλυση και ευκρίνεια, απολύτως αναγκαίες για εφαρμογές γεωλογικής παρατήρησης.[13]

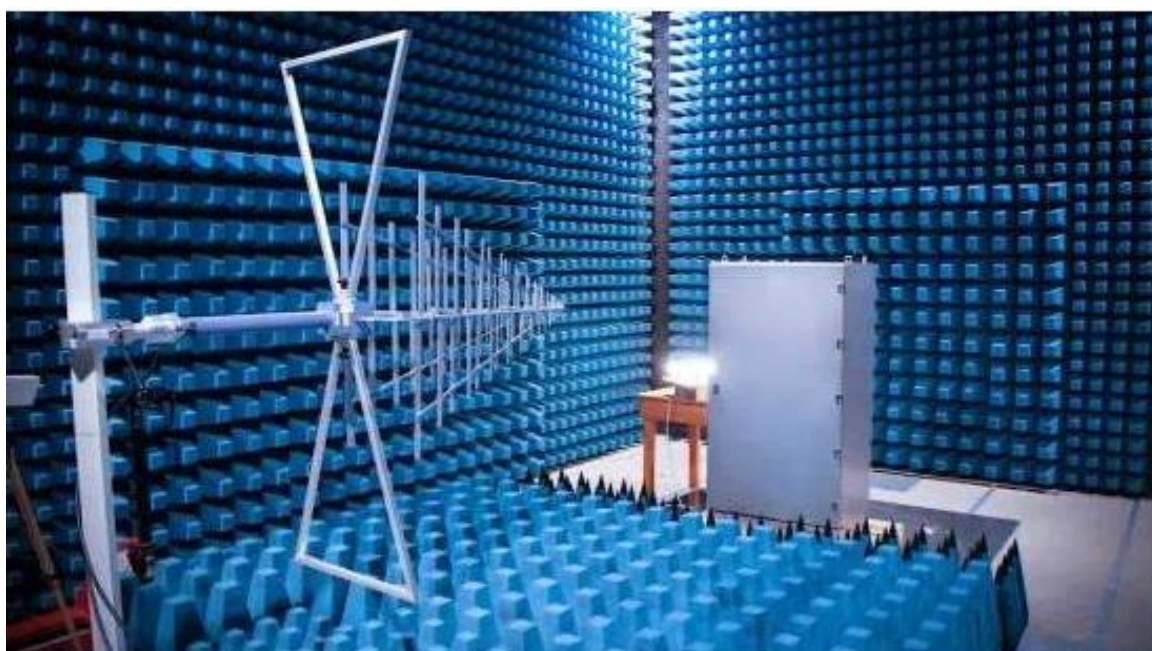
4 Κεφάλαιο 4: Πειραματικές συνιστώσες

4.1 Ανηχοϊκός θάλαμος

Η πειραματική διαδικασία της εργασίας αυτής πραγματοποιείται σε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο, τον ανηχοϊκό θάλαμο. Ο θάλαμος αυτός είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να απορροφά πλήρως τις ανακλάσεις είτε ηχητικών είτε ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Είναι, επίσης, πλήρως απομονωμένος από εξωτερικές πηγές σημάτων.

Αυτές είναι οι ιδιότητες στις οποίες βασίζονται οι αξιόπιστες μετρήσεις EMC. Ο εξωτερικός θόρυβος που υφίσταται πάντοτε σε μία διαδικασία δοκιμής δεν υπερτίθεται στις πραγματικές εκπομπές του EUT. Επίσης, είναι εύκολο να απομονωθεί το σήμα που μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε μέσω της σύγκρισης του τελικού λαμβανόμενου σήματος με τον εσωτερικό θόρυβο του ανηχοϊκού θαλάμου. Ο τελευταίος μπορεί να ληφθεί με την ίδια διαδικασία δοκιμής, χωρίς όμως το EUT να λειτουργεί.



Εικόνα 4-1: Πλήρης ανηχοϊκός θάλαμος

[15]

Το εσωτερικό του ανηχοϊκού θαλάμου καλύπτεται με πλακίδια φερρίτη ή με αφρώδες υλικό RAM (Radiation Absorbent Material), το οποίο διαμορφώνεται έτσι ώστε η προσπίπτουσα ακτινοβολία να απορροφάται όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα, και όσο το δυνατόν σε περισσότερες κατευθύνσεις πρόσπτωσης.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες ανηχοϊκών θαλάμων: οι πλήρεις και οι ημι-ανηχοϊκοί. Οι πρώτοι απορροφούν την ενέργεια σε όλες τις κατευθύνσεις. Στους ημι-ανηχοϊκούς το δάπεδο είναι συμπαγές και λειτουργεί ως επιφάνεια εργασίας.

Τέλος, το μέγεθος των ανηχοϊκών θαλάμων κυμαίνεται ανάλογα με το μέγεθος του EUT που πρόκειται να ελεγχθεί, αλλά και με το εύρος συχνοτήτων δοκιμής. Για χαμηλές συχνότητες, η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται.[14]



Εικόνα 4-2: Μοντέλο διαστημικού σκάφους Juice κατά τη διάρκεια δοκιμών EMC

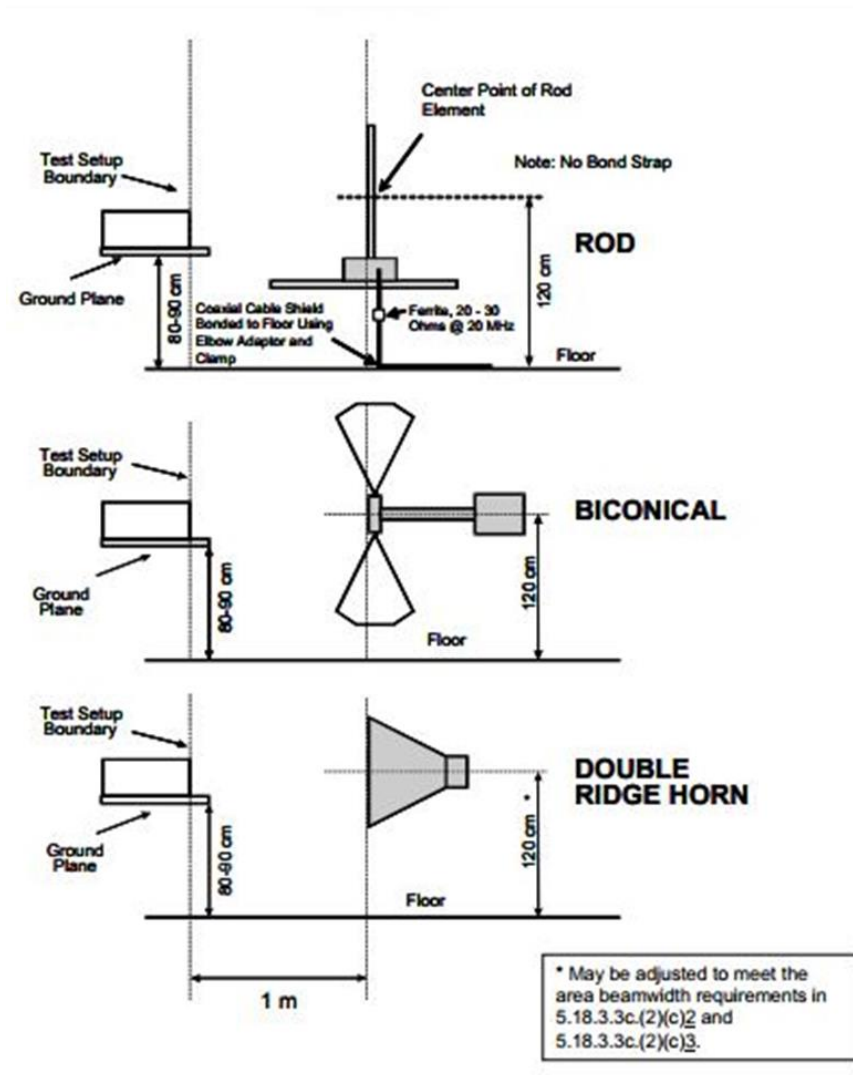
[16]

4.2 Απαιτήσεις MIL-STD 461G

Σύμφωνα με το πρότυπο MIL-STD-461G, η βασική διάταξη στον ανηχοϊκό θάλαμο, ώστε να πραγματοποιηθούν με συνέπεια οι μετρήσεις των ακτινοβολούμενων εκπομπών του SpaceWire είναι η εξής:

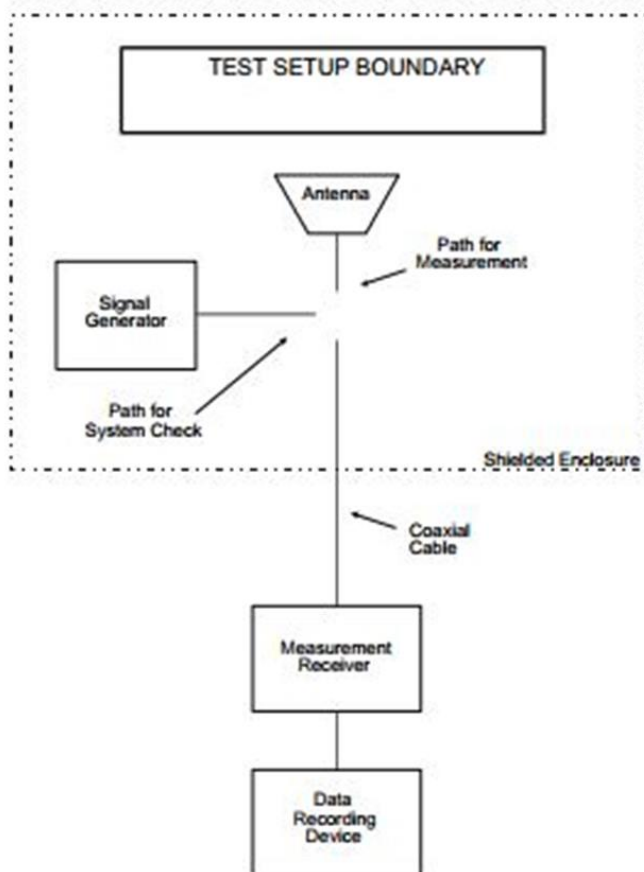
Το EUT, και στην προκειμένη περίπτωση το SpaceWire, τοποθετείται σε ένα γειωμένο επίπεδο. Σε συγκεκριμένη απόσταση τοποθετείται η κεραία λήψης, η οποία συνδέεται με ομοαξονικό καλώδιο με τον δέκτη, ο οποίος βρίσκεται εκτός του ανηχοϊκού θαλάμου.

Όπως φαίνεται παρακάτω, το επίπεδο στο οποίο τοποθετείται το EUT απέχει απόσταση 80-90cm από το δάπεδο, το κέντρο της κεραίας απέχει 120cm από το δάπεδο αλλά και 1m από το EUT.



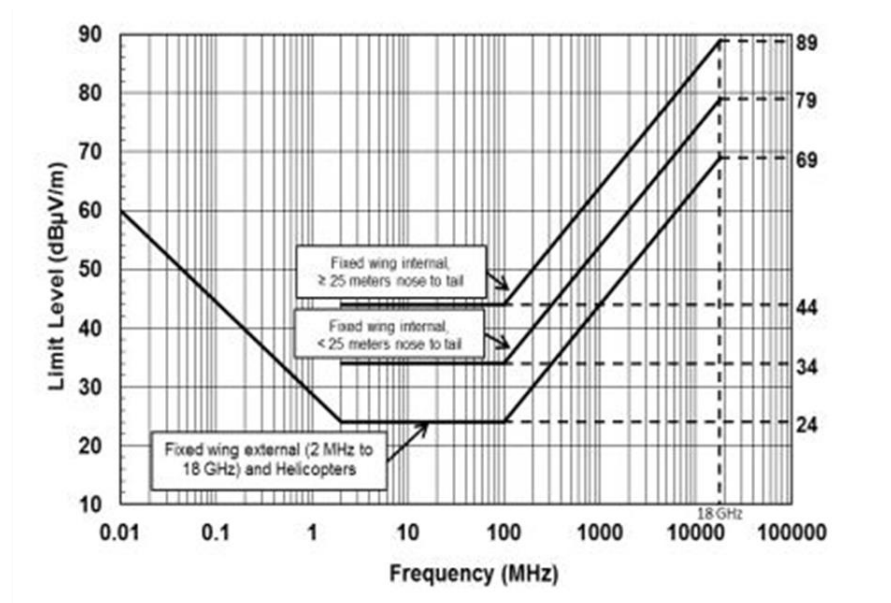
Εικόνα 4-3: Basic test setup

Η τοποθέτηση του SpaceWire πάνω στο επίπεδο γίνεται ως εξής: βρίσκεται κατά 5cm ανυψωμένο σε σχέση με το γειωμένο τραπέζι, απέχει 10cm από την άκρη του τραπεζιού και το μήκος του είναι 1m.



Εικόνα 4-4: Antenna positioning

Για πληρότητα, παρατίθεται ξανά το διάγραμμα ορίων που ορίζει το πρότυπο για ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο σε διαστημικές εφαρμογές.



Εικόνα 4-5: Limit for aircraft and space system applications

4.3 Κεραίες

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε εύρος συχνοτήτων 30MHz έως 2GHz. Για το εύρος αυτό, το πρότυπο ορίζει μία δικωνική κεραία (30MHz έως 200MHz) και δύο διαφορετικές χοανοειδείς κεραίες (200MHz έως 1GHz και 1GHz έως 2GHz).

Στην πράξη χρησιμοποιούνται οι εξής κεραίες:

- Compact X-Wing® BiLog® Antenna CBL 6141 [17] για συχνότητες 30MHz έως 1GHz
- χοανοειδής EM 6961 [18] για συχνότητες 1GHz έως 2GHz

Από τους κατασκευαστές των κεραιών είναι γνωστές οι τιμές του AF για τα επιθυμητά εύρη συχνοτήτων.

4.4 Δέκτης μέτρησης

Όπως προαναφέρθηκε, ο δέκτης που χρησιμοποιείται για τη λήψη των εκπομπών είναι ο Schaffner SMR 4530.



Εικόνα 4-6: Schaffner SMR 4530

Δημιουργείται αρχικά ένα προφίλ μέτρησης, όπως φαίνεται παρακάτω:

SMR4503 SN:038		Selected Test: MIL-REmag-1G..3G.cfg			Date: 9/25/19 Time: 11:24:28 AM	
Preselected Test Table				Page: 2 of 2		
Num. Key	Config File	Test Title			Transducer Title	
0	MIL-REmag-10k..150k.cfg	MIL-REmag-10kHz...150kHz			none	
1	MIL-REmag-150k..30M.cfg	MIL-REmag-150kHz...30MHz			none	
2	MIL-REmag-30M..1G.cfg	MIL-REmag-30MHz...1GHz			none	
3	MIL-REmag-1G..3G.cfg	MIL-REmag-1GHz...3GHz			none	
4	Empty	---			none	
5	Empty	---			none	
6	Empty	---			none	
7	Empty	---			none	
8	Empty	---			none	
9	Empty	---			none	

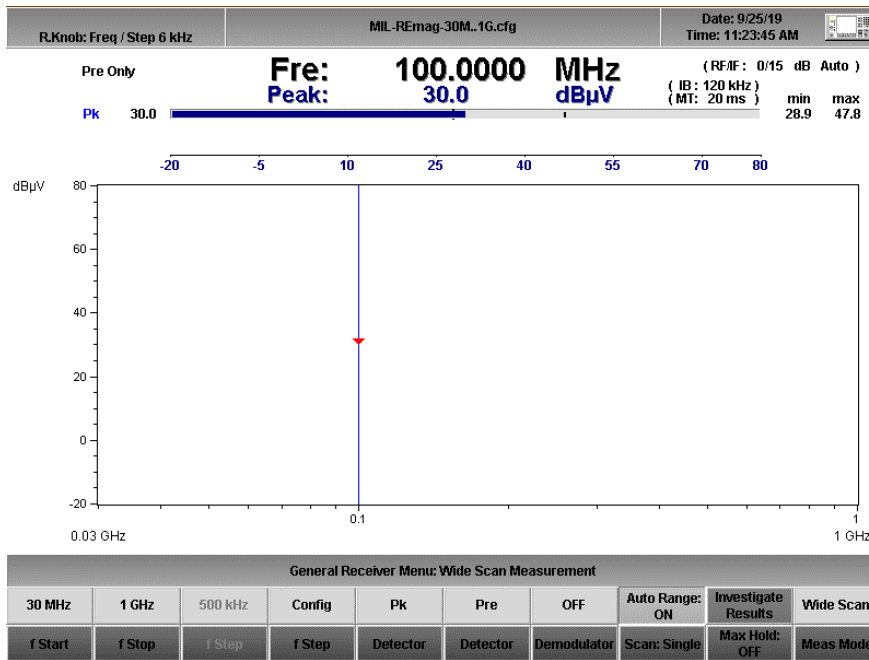
Device Main Menu: Selection of Tests								
Restore Last Power Down			Clear		Target Curve 1	Target Curve 2	Target Curve 3	Page Up
	Simple Test	Load Results	Edit	Utility				Page Down

Εικόνα 4-7: Διάφορα προφίλ μέτρησης

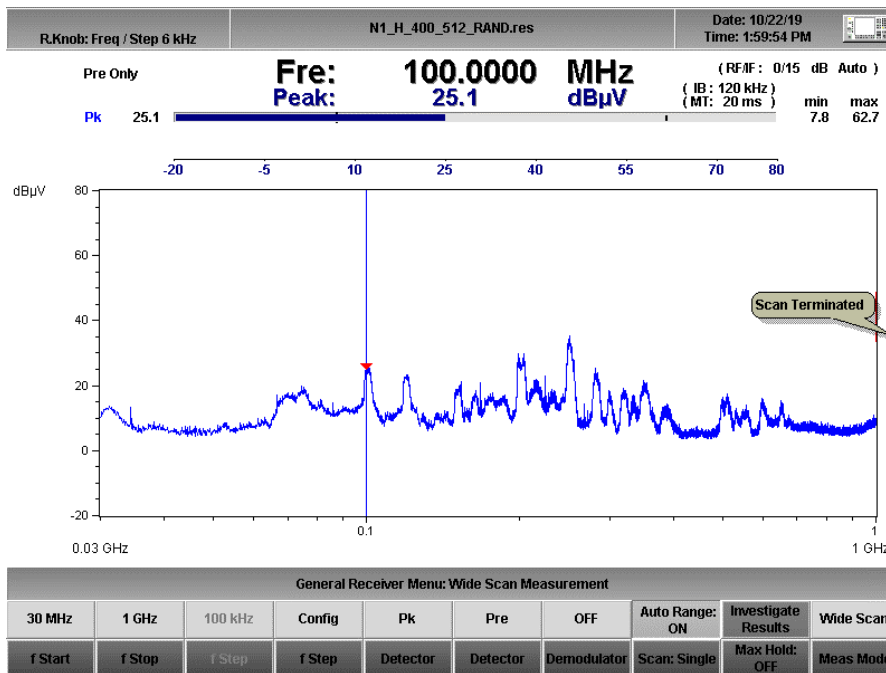
Items Unchanged		MIL-REmag-30M..1G.cfg			Date: 10/22/19 Time: 9:33:13 AM	
Title	MIL-REmag-30MHz...1GHz					
Type						
EUT / Ser.No.						
Manufacturer						
Condition						
Operator						
Specification						
Comment						
Transducer:						
Limit Line:						
Diagram: Level Axis:	Frequency Axis:	Margin To Limit:	Pre/Final Procedure:	Transducer Control:	Remote OFF	
min. -20 dBμV	Logarithmic	0 dB	Pre Only	Pre Procedure :---		
max. 80 dBμV			Confirm Final : OFF	Final Procedure :---		
Start Frequency	Range 1	Range 2	Range 3	Range 4	Range 5	
Stop Frequency	30 MHz					
Step Frequency	1 GHz					
Attenuator	100 kHz					
(Pre) Detector	Auto					
(Pre) IF Bandwidth	Peak					
(Pre) Measure Time	120 kHz					
(Final) Detector	20 ms					
(Final) IF Bandwidth	Peak					
(Final) Measure Time	120 kHz					
(Final) Sub Ranges	20 ms					
	1					

Test Configuration Menu: Edit Config Items								
Copy Titles	Empty	Empty			Checked		Load	Cancel
Title	Transducer	Limit Line	Misc.	Range	Range Item	Duplicate Range	Save As	Save

Εικόνα 4-8: Παράμετροι του προφίλ μέτρησης της εργασίας



Εικόνα 4-9: Έναρξη λήψης μέτρησης

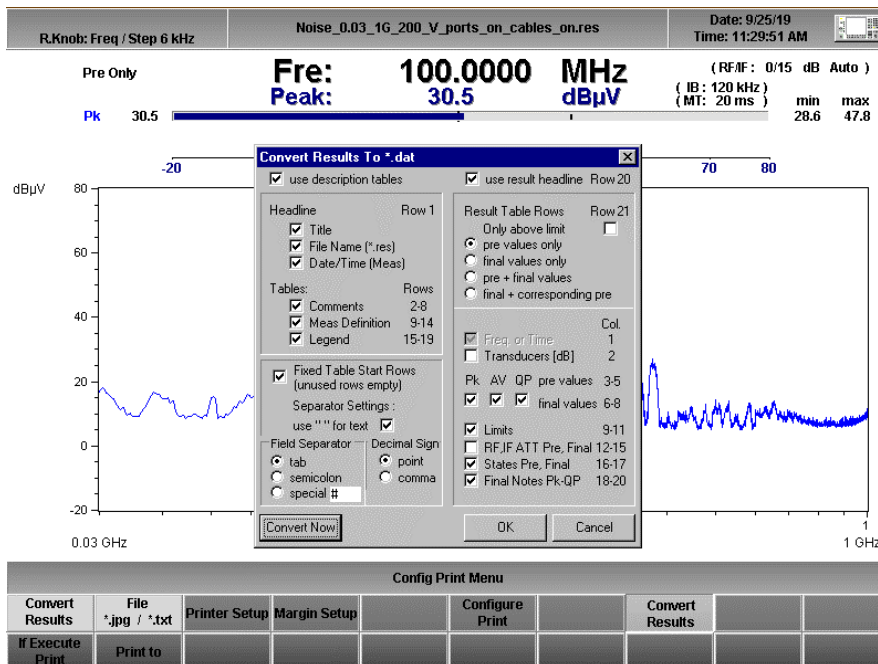


Εικόνα 4-10: Ολοκλήρωση λήψης μέτρησης

Μόλις ολοκληρώνεται η σάρωση ολόκληρου του εύρους ζώνης αποθηκεύεται η μέτρηση και μετατρέπεται σε κατάλληλο προς επεξεργασία αρχείο.



Εικόνα 4-11: Αποθήκευση αρχείου



Εικόνα 4-12: Μετατροπή αρχείου

Όπως φαίνεται και στις εικόνες, τα διαγράμματα αναπαριστούν τιμές τάσης ανά συχνότητα. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η επεξεργασία των αρχείων ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου.

4.5 *iSAFT*

Ο *iSAFT* είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον Hardware/Software κατάλληλο για προσομοίωση και παρακολούθηση δορυφορικών/διαστημικών δικτύων δεδομένων, το οποίο υποστηρίζει χρήση του καλωδίου SpaceWire.[13]

Ο *iSAFT* περιλαμβάνει 4 θύρες SpaceWire, οι οποίες λειτουργούν πλήρως αμφίδρομα. Υπάρχει η δυνατότητα διαμόρφωσης των πακέτων προς αποστολή ως προς το περιεχόμενό τους (zeros, ones, random) και ως προς το μέγεθός τους (έως 2048 bytes). Η ταχύτητα μετάδοσης των πακέτων μπορεί να φτάσει έως 400Mbps.

Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει για να πραγματοποιηθεί μία προσομοίωση είναι η επιλογή των θυρών διαμέσου των οποίων θα γίνει η μετάδοση. Ενεργοποιούνται οι θύρες αυτές και επιλέγεται η επιθυμητή ταχύτητα. Στη συνέχεια, για κάθε θύρα ξεχωριστά διαμορφώνεται το φορτίο που θέλουμε να αποσταλεί, δηλαδή τα χαρακτηριστικά των πακέτων, και επιλέγεται ο τρόπος αποστολής, δηλαδή συνεχόμενα ή άπαξ. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης της κατάστασης των θυρών, δηλαδή πόσα bytes αποστέλλονται και λαμβάνονται από κάθε θύρα κάθε στιγμή. Με τον τρόπο αυτό είναι εύκολο να εντοπιστούν πιθανά σφάλματα ή παραλείψεις σε μια προσομοίωση.

Στην εργασία αυτή, ο *iSAFT* χρησιμοποιείται ώστε να δημιουργεί την επιθυμητή κίνηση πακέτων στο εξεταζόμενο καλώδιο SpaceWire, ο ένας ακροδέκτης του οποίου συνδέεται στη θύρα 1, ενώ ο άλλος στη θύρα 3 του *iSAFT*. Τοποθετείται μέσα στον ανηχοϊκό θάλαμο και μέσω της διεπαφής του σε υπολογιστή του εργαστηρίου, είναι δυνατή η διαχείρισή του. Η σύνδεση αυτών γίνεται με καλώδιο Ethernet.

4.6 *Διάταξη*

Μέσα στον ανηχοϊκό θάλαμο ο *iSAFT* θωρακίζεται με κομμάτια υλικού RAM, το οποίο υπάρχει και στα τοιχώματα του θαλάμου. Αυτό γίνεται ώστε να απορροφώνται οι εκπομπές του *iSAFT* και η κεραία να λαμβάνει τις ζητούμενες εκπομπές που οφείλονται στο SpaceWire.

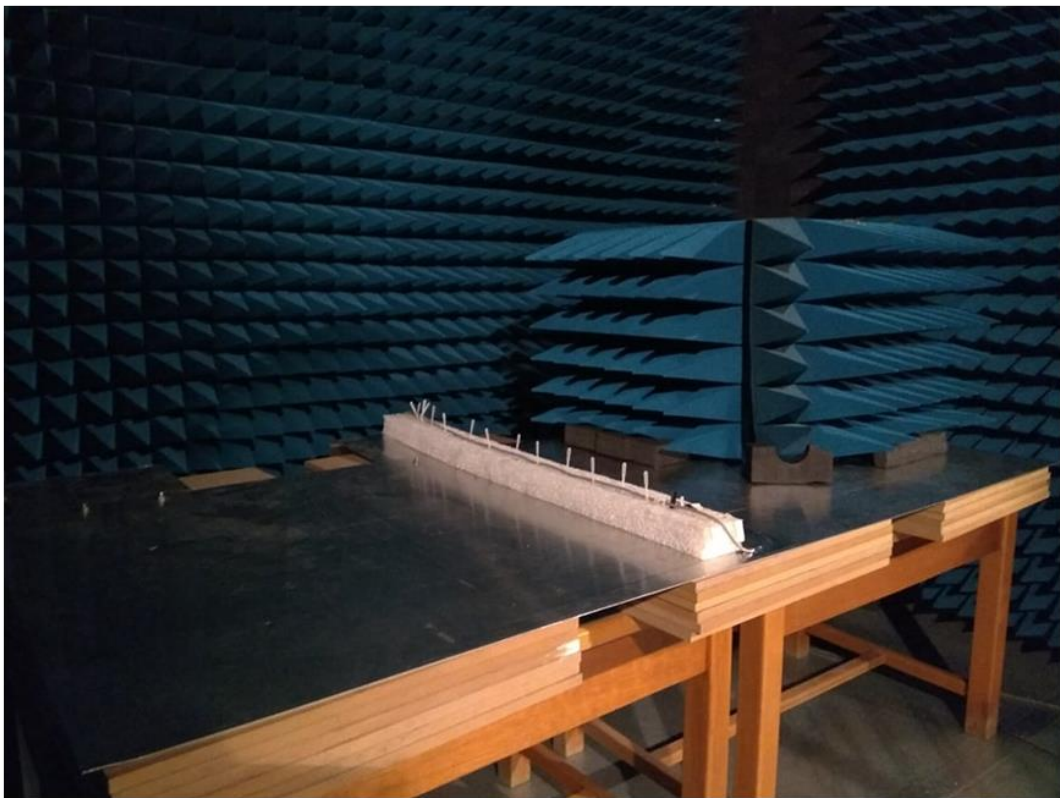
Επίσης, το SpaceWire τοποθετείται πάνω στο γειωμένο επίπεδο σε δύο διαφορετικές διατάξεις στη διάρκεια των μετρήσεων. Αρχικά, τοποθετείται σε οριζόντια διάταξη (normal setup), δηλαδή παράλληλα στη μεγαλύτερη πλευρά του τραπεζιού και στη συνέχεια κάθετα σε αυτή (perpendicular setup).

Η κεραία λήψης τοποθετείται σε απόσταση 1m, 1.5m και 2m από το EUT τόσο σε κατακόρυφη (vertical) όσο και σε οριζόντια (horizontal) θέση. Το καλώδιο που συνδέει την κεραία με τον δέκτη, ο οποίος βρίσκεται εκτός ανηχοϊκού θαλάμου, είναι μονωμένο με αλουμινοταινία πάνω στο δάπεδο, οπότε δεν επηρεάζει τις μετρήσεις μας.

Όπως παρατηρείται και στις φωτογραφίες, το κέντρο της κεραίας βρίσκεται στο μέσο του SpaceWire όταν αυτό είναι σε οριζόντια διάταξη, ενώ είναι ευθυγραμμισμένο με αυτό στην κάθετη διάταξη.

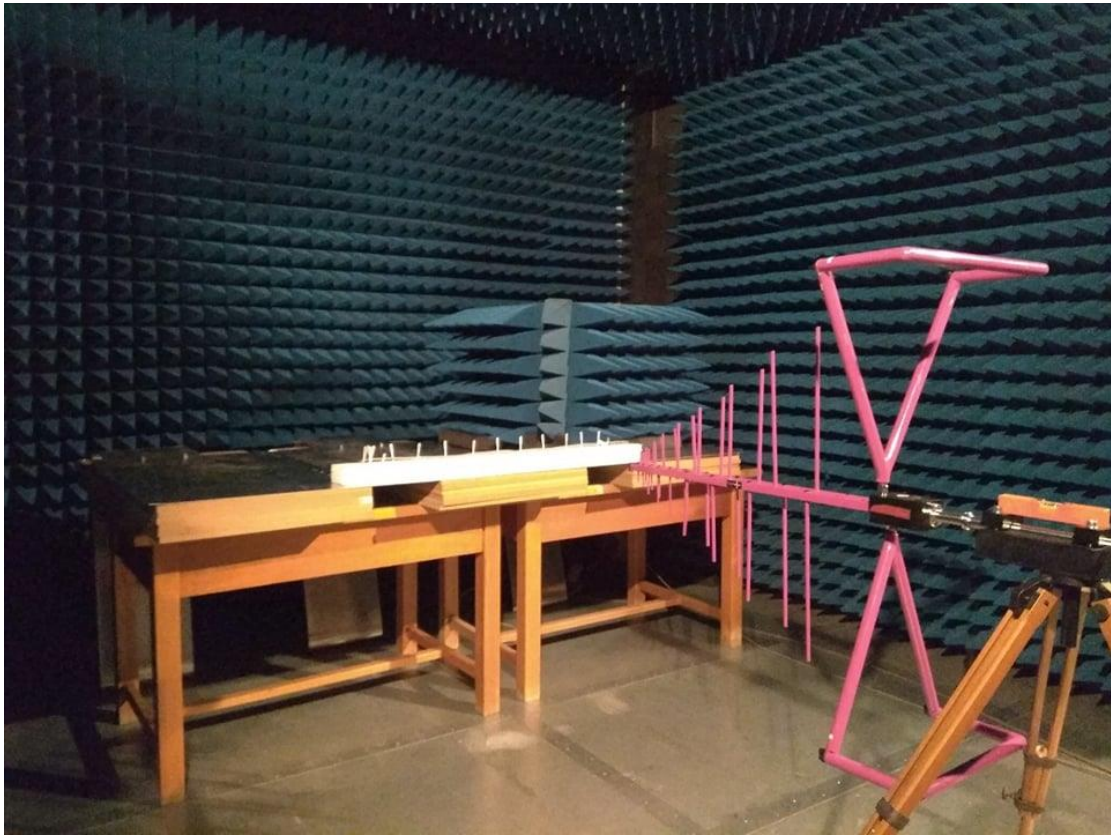


Εικόνα 4-13: Normal setup

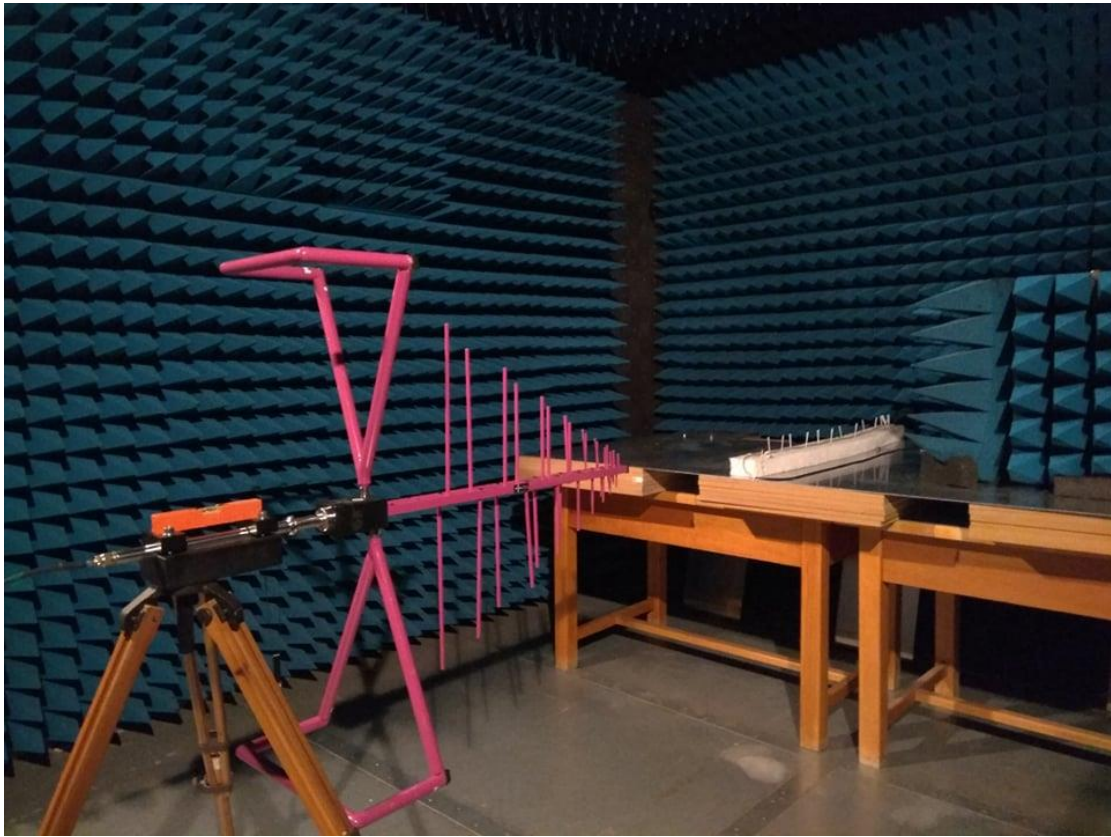


Εικόνα 4-14: Perpendicular setup

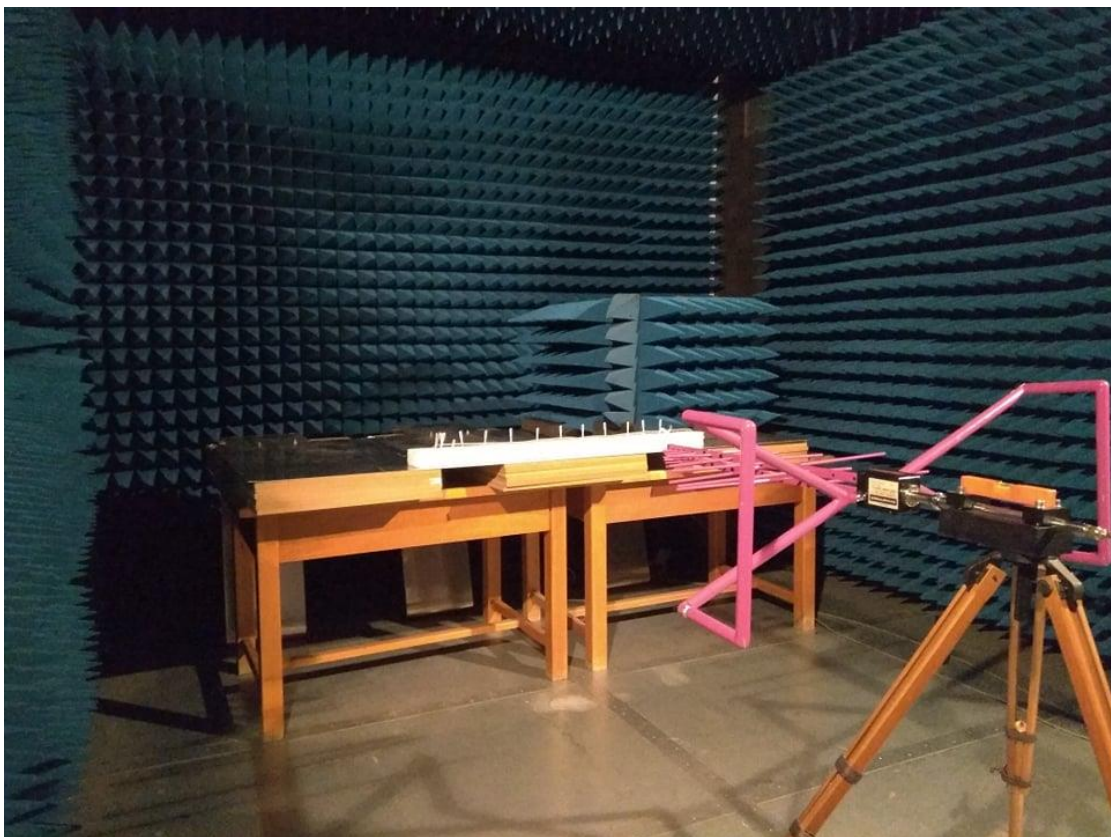
Δεξιά στις εικόνες διακρίνεται η θωράκιση εσωτερικά της οποίας βρίσκεται ο iSAFT.



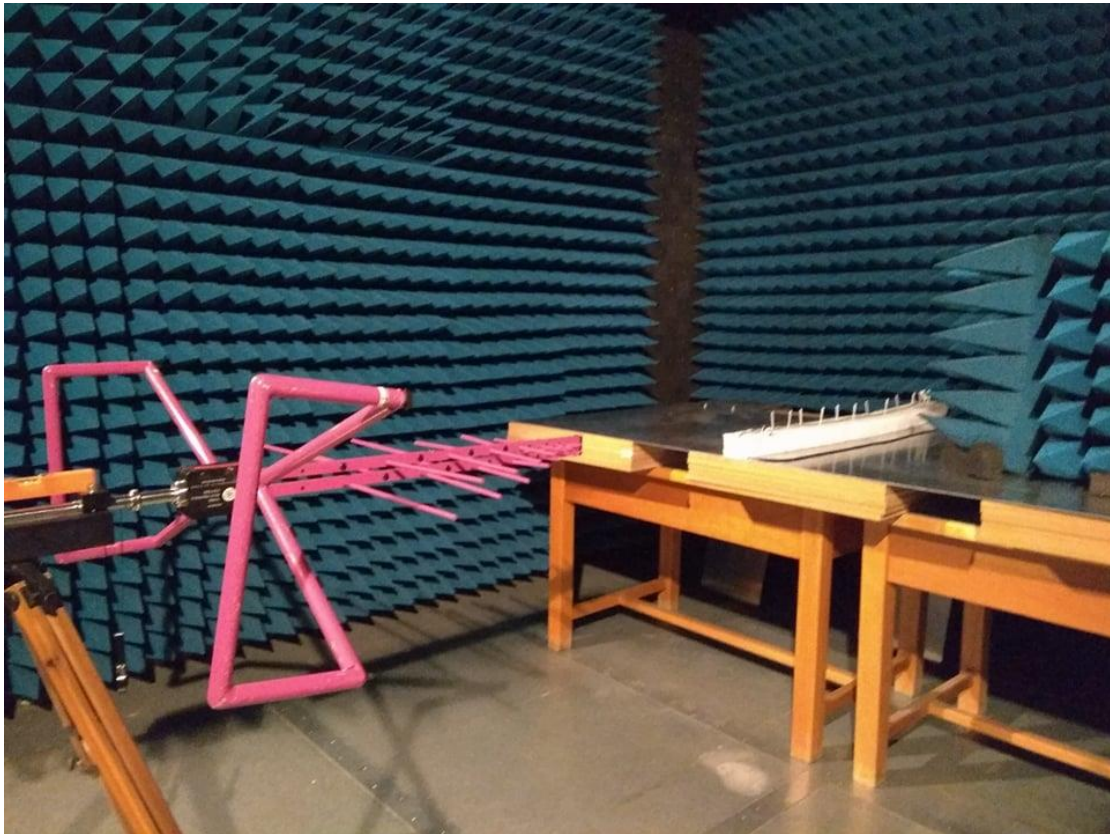
Εικόνα 4-15: Vertical antenna - Normal SpaceWire



Εικόνα 4-16: Vertical antenna - Perpendicular SpaceWire



Εικόνα 4-17: Horizontal antenna - Normal SpaceWire



Εικόνα 4-18: Horizontal antenna - Perpendicular SpaceWire

4.7 Παράμετροι

Στην πρώτη φάση, οι μετρήσεις λαμβάνονται σε εύρος συχνοτήτων 30MHz έως 1GHz.

Πριν από κάθε μέτρηση εκπομπής γίνεται και μέτρηση θορύβου στον ανηχοϊκό θάλαμο. Συγκεκριμένα, το SpaceWire αποσυνδέεται από τον iSAFT και οι αντίστοιχες θύρες απενεργοποιούνται. Ακολουθεί, έπειτα, η σάρωση σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε μία ξεκάθαρη εικόνα των πραγματικών εκπομπών του SpaceWire, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται ο θόρυβος του θαλάμου την προκειμένη στιγμή.

Έπειτα, επιλέγονται τα χαρακτηριστικά των πακέτων προς αποστολή μέσω του iSAFT και ξεκινά η λήψη της μέτρησης.

Συγκεκριμένα, η διαδικασία επαναλαμβάνεται για 8 διαφορετικά πακέτα:

- 1, 32, 512 και 2048 bytes με περιεχόμενο μηδενικά (zeros)
- 1, 32, 512 και 2048 bytes με τυχαίο περιεχόμενο (random)

με 3 διαφορετικές ταχύτητες 400Mbps, 100Mbps και 10Mbps για οριζόντια και κάθετη διάταξη του SpaceWire και για οριζόντιο και κάθετο προσανατολισμό της κεραίας λήψης.

Μόλις ολοκληρώνεται η σάρωση για τη μέτρηση του θορύβου, το αρχείο είναι διαθέσιμο με την εξής ονομασία:

“Noise-N1-V-400” : θόρυβος όταν το SpaceWire βρίσκεται σε οριζόντια διάταξη, η κεραία απέχει απόσταση 1m και έχει κατακόρυφο προσανατολισμό, ενώ η ταχύτητα ορισμού των θυρών είναι 400Mbps.

Με παρόμοιο τρόπο ονομάζονται και τα αρχεία εκπομπών. Για παράδειγμα:

“P1-H-100-32-RAND”: εκπομπές όταν το SpaceWire βρίσκεται σε κάθετη διάταξη, η κεραία απέχει απόσταση 1m και έχει οριζόντιο προσανατολισμό, η ταχύτητα είναι 100Mbps και τα πακέτα που στέλνονται έχουν μέγεθος 32bytes και τυχαίο περιεχόμενο.

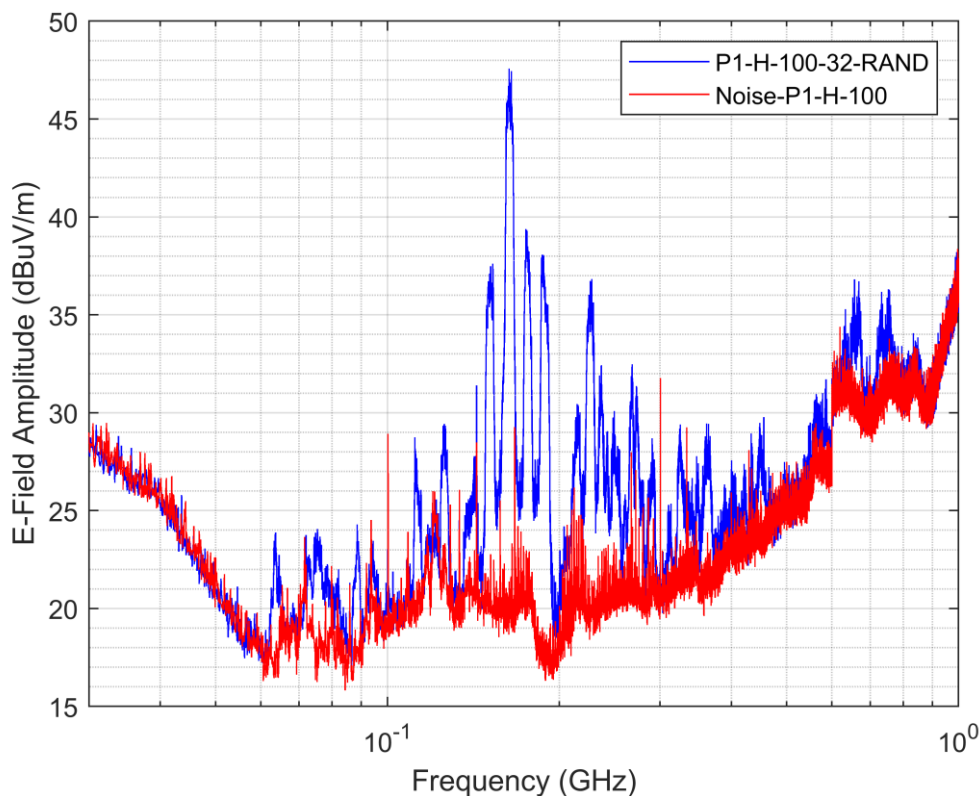
Παρατήρηση: Στα αρχεία θορύβου, σε αντίθεση με αυτά των εκπομπών, δεν αναφέρονται χαρακτηριστικά των πακέτων, αφού ουσιαστικά σε εκείνο το χρονικό διάστημα της σάρωσης δεν πραγματοποιείται αποστολή πακέτων.

Στη συνέχεια, γίνεται η μετατροπή των τιμών των λαμβανόμενων αρχείων με χρήση του AF μέσω κατάλληλου κώδικα MATLAB, και έτσι προκύπτουν τα συγκριτικά διαγράμματα.

Έστω, για παράδειγμα, ότι θέλουμε να συγκριθούν οι εκπομπές του SpaceWire με τον θόρυβο στις συνθήκες που αναφέραμε προ ολίγου, δηλαδή:

- ✓ Perpendicular SpaceWire
- ✓ Horizontal antenna (1m)
- ✓ 100Mbps
- ✓ 32 bytes, RANDOM

Το αντίστοιχο διάγραμμα είναι:



Εικόνα 4-19: Εκπομπή P1-H-100-32-RAND compared to Noise

5 Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα μετρήσεων

5.1 Συγκριτική παρουσίαση

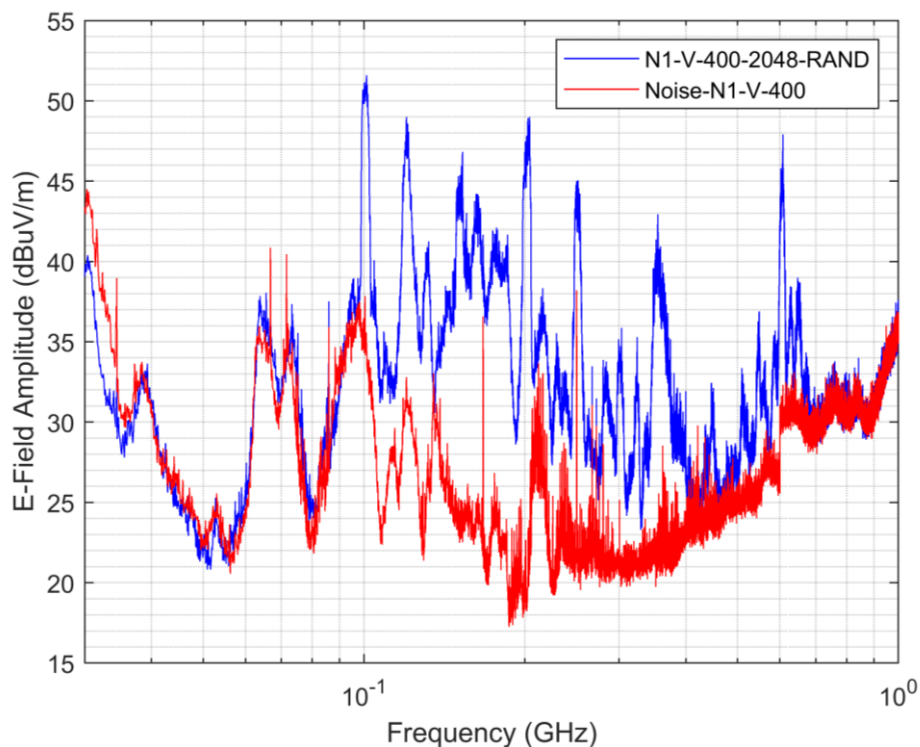
Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι μετρήσεις εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου του SpaceWire που εξετάζεται. Θα συμπεριληφθούν εδώ όλες οι μετρήσεις που λήφθηκαν, αλλά θα γίνει μία συγκριτική παρουσίαση ως προς τις παραμέτρους της διαδικασίας, ώστε να αναδειχθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των εκπομπών του SpaceWire.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τόσο την ένταση όσο και τη συχνοτική συμπεριφορά του ηλεκτρικού πεδίου που εκπέμπει το SpaceWire είναι οι εξής:

1. Ταχύτητα αποστολής πακέτων: 400, 100 και 10Mbps
2. Μέγεθος πακέτων: 1, 32, 512, 2048 bytes
3. Περιεχόμενο πακέτων: μηδενικά (ZEROS) και τυχαίο (RAND)
4. Προσανατολισμός κεραίας: Κατακόρυφη (Vertical) και Οριζόντια (Horizontal)
5. Διάταξη SpaceWire: Οριζόντια (Normal) και Κάθετη (Perpendicular)
6. Απόσταση κεραίας από το EUT: 1, 1.5 και 2 m
7. Εύρος συχνοτήτων μέτρησης: (30MHz - 1GHz) και (1GHz - 2GHz)

Στο πρώτο σετ μετρήσεων οι παράμετροι είχαν οριστεί ως εξής: οριζόντια διάταξη του SpaceWire, κατακόρυφη κεραία σε απόσταση 1m, ταχύτητα αποστολής 400Mbps. Έγινε μία μέτρηση θορύβου και έπειτα μετρήσεις και για τα 8 διαφορετικά πακέτα.

Συγκεκριμένα, για το πακέτο μήκους 2048 bytes και τυχαίου περιεχομένου έχουμε:

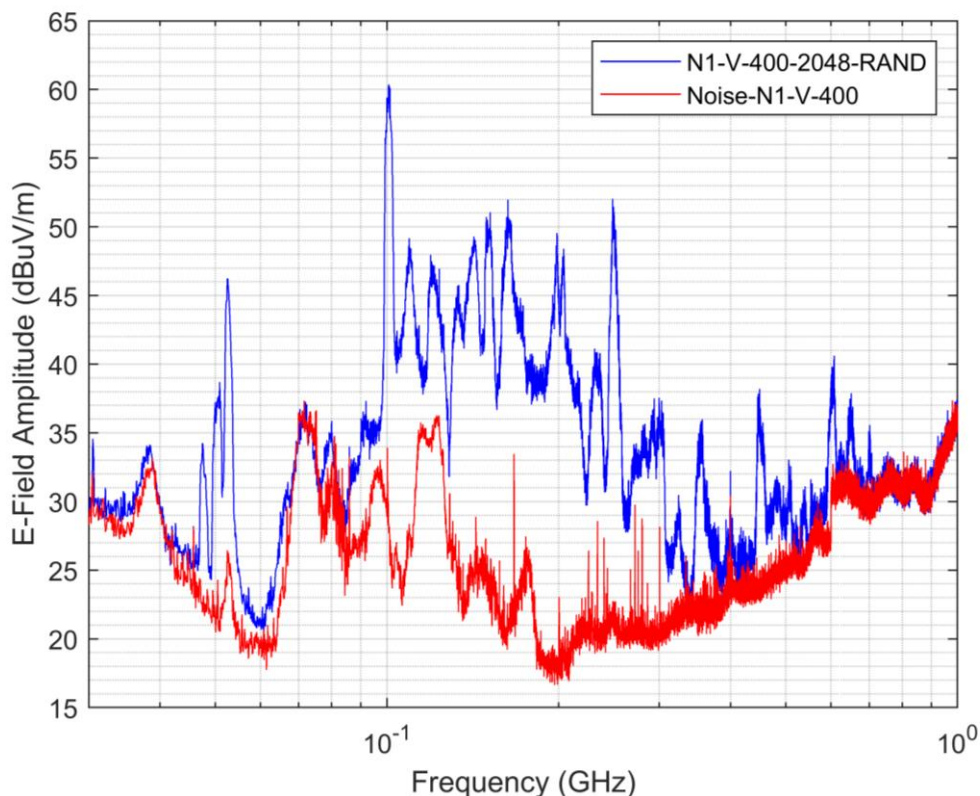


Εικόνα 5-1: Εκπομπή N1-V-400-2048-RAND compared to Noise (Ethernet ON)

Παρατηρείται στο διάγραμμα ότι το επίπεδο θορύβου είναι αρκετά υψηλό για συχνότητες έως και τα 250MHz. Η παρατήρηση είναι κοινή στις μετρήσεις όλων των πακέτων. Πιθανότατα, λοιπόν, κάποια συσκευή ή εξάρτημα μέσα στον ανηχοϊκό θάλαμο παράγει ανεπιθύμητες εκπομπές. Τελικά, η βασική πηγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών είναι το καλώδιο Ethernet, μέσω του οποίου συνδέεται ο iSAFT με τον υπολογιστή εκτός του θαλάμου. Μπορεί η κατασκευή του να είναι τέτοια που να εξουδετερώνει τις παρεμβολές των εσωτερικών αγωγών του μεταξύ τους, αλλά ως καλώδιο που διαρρέεται από ρεύμα δεν παύει να παράγει ακτινοβολία στο περιβάλλον του.

Έτσι, λοιπόν για να ληφθούν οι πραγματικές εκπομπές του SpaceWire, το Ethernet αποσυνδέεται από τον υπολογιστή του εργαστηρίου πριν από κάθε μέτρηση, χωρίς αυτό όμως να επηρεάζει τη λειτουργία του iSAFT.

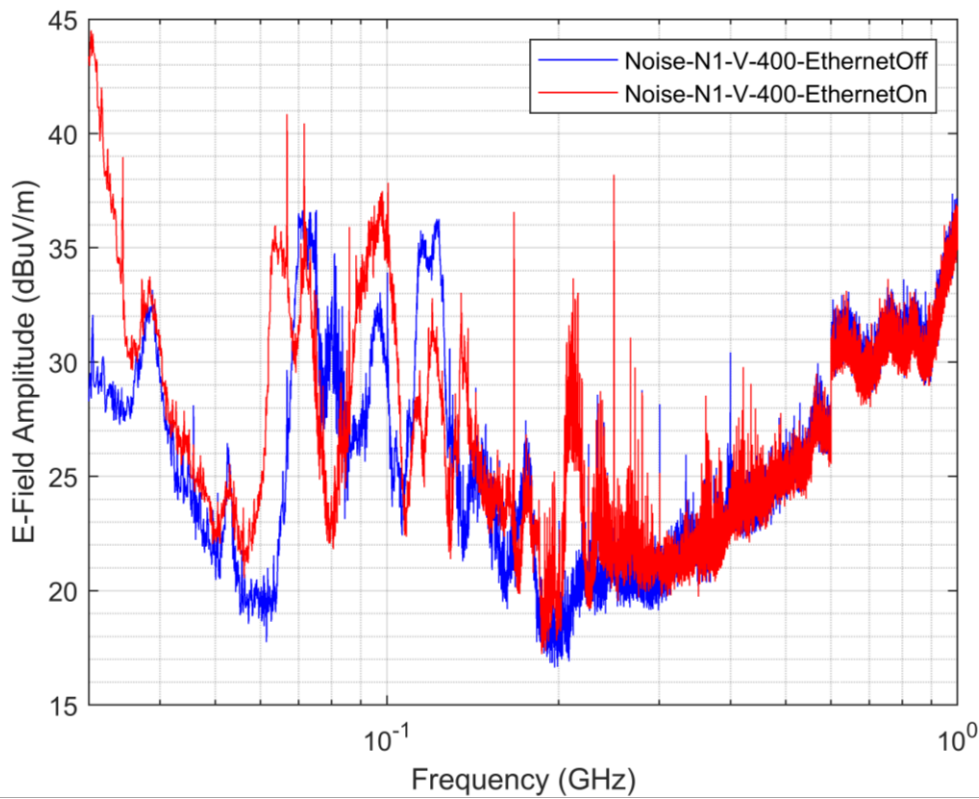
Επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις με το Ethernet αποσυνδεδεμένο και έχουμε:



Εικόνα 5-2: Εκπομπή N1-V-400-2048-RAND compared to Noise (Ethernet OFF)

Τώρα είναι περισσότερο ξεκάθαρο σε ποιες συχνότητες υπάρχουν πραγματικές εκπομπές του SpaceWire, και σε ποιες εγγενής θόρυβος του ανηχοϊκού θαλάμου.

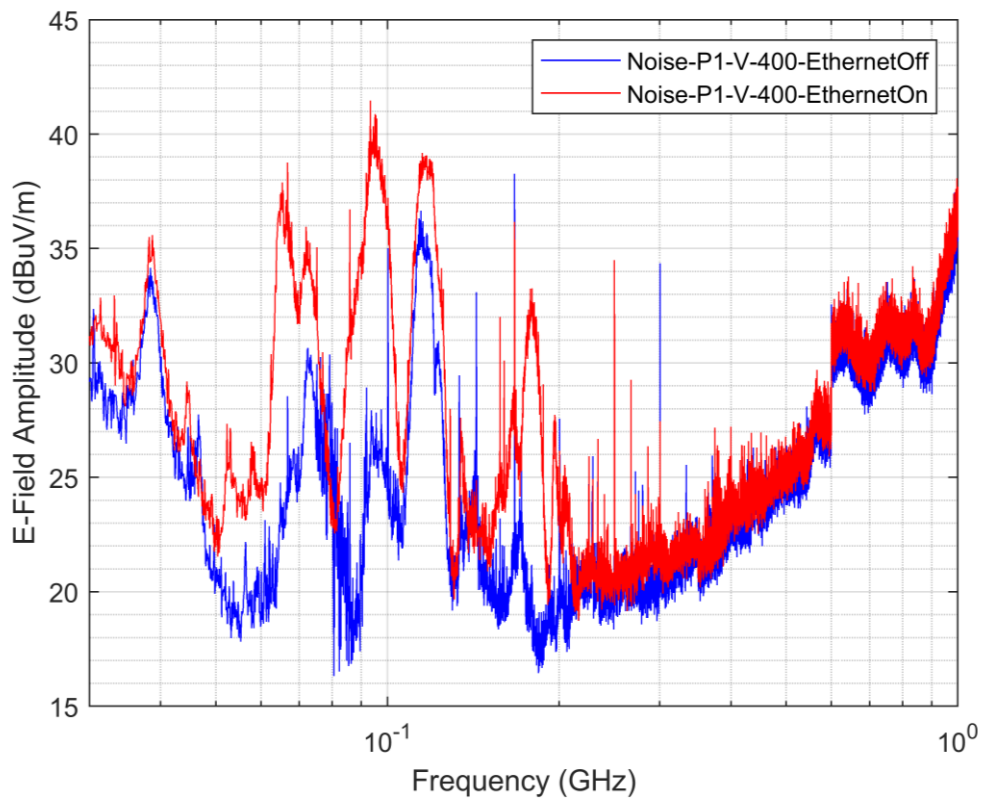
Θα συγκριθούν τώρα οι μετρήσεις θορύβου που λήφθηκαν, αρχικά με συνδεδεμένο το Ethernet και έπειτα αποσυνδεδεμένο, ώστε να γίνουν ξεκάθαρα τα χαρακτηριστικά της παρεμβολής που παράγει.



Εικόνα 5-3: Σύγκριση θορύβων N1-V-400 με Ethernet ON και Ethernet OFF

Αρχικά, υπάρχουν σημαντικές κορυφές θορύβου με υψηλότερες γύρω στα 70MHz, στις οποίες η ένταση φτάνει μέχρι και τα 41dBμV/m. Όταν, όμως, παύει η επίδραση του καλωδίου Ethernet η μέγιστη τιμή έντασης δεν ξεπερνά τα 37dBμV/m. Για κάποιες συχνότητες, η διαφορά των εντάσεων πλησιάζει στα 20dBμV/m. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι η επίδραση του Ethernet είναι καθοριστική για την πορεία της πειραματικής διαδικασίας. Γενικότερα, η αξιολόγηση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας ενός οποιουδήποτε συστήματος μπορεί να δυσχεραίνεται από τυχαίους παράγοντες. Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η προσεκτική αξιολόγηση όλων των παραγόντων μίας ηλεκτρομαγνητικής δοκιμής.

Παρατίθεται, επίσης, η σύγκριση των θορύβων όταν η διάταξη του SpaceWire είναι κάθετη (Perpendicular). Η επίδραση, λοιπόν, του Ethernet είναι ανεξάρτητη από τη διάταξη των στοιχείων μέσα στον ανηχοϊκό θάλαμο. Εξακολουθεί να υπάρχει διαφορά 10-20dBμV/m στις συχνότητες που εξετάζονται.



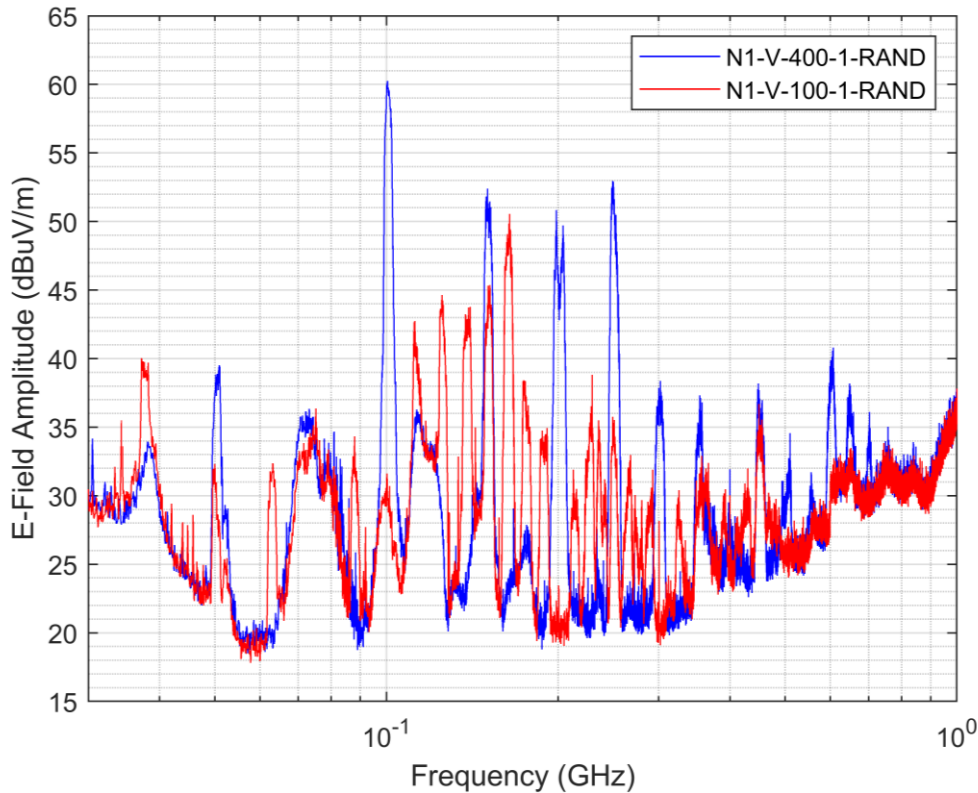
Εικόνα 5-4: Σύγκριση θορύβων P1-V-400 με Ethernet ON και Ethernet OFF

Από εδώ και στο εξής, θα συνεχιστούν οι μετρήσεις χωρίς να υφίσταται η παρεμβολή του Ethernet.

5.2 Σύγκριση ως προς την ταχύτητα αποστολής πακέτων

Στην ενότητα αυτή, θα αναδειχθεί η επίδραση της ταχύτητας αποστολής στο εκπεμπόμενο ηλεκτρικό πεδίο από το SpaceWire. Η μοναδική παράμετρος που αλλάζει μεταξύ των συγκρινόμενων μετρήσεων είναι η ταχύτητα.

- Αρχικά, θα συγκριθούν μετρήσεις με ταχύτητες 400Mbps και 100Mbps.

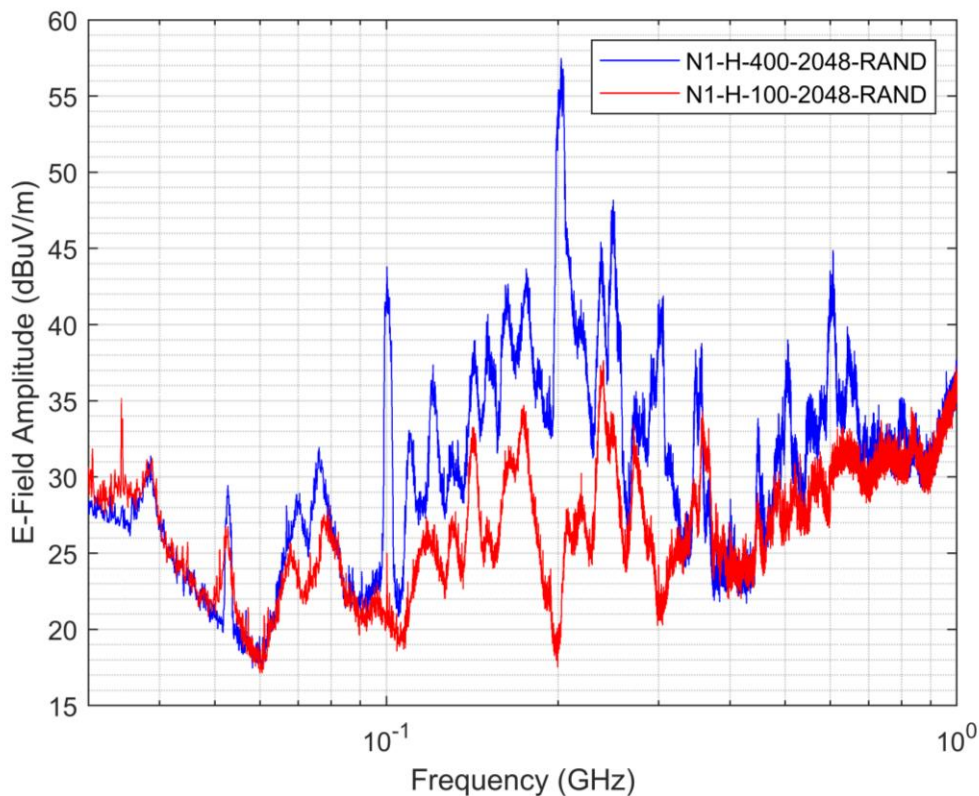


Εικόνα 5-5: Σύγκριση εκπομπών: 400/100Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 1 byte)

Μέχρι τη συχνότητα 90MHz, ουσιαστικά και τα δύο σήματα εκπομπών ταυτίζονται με τον θόρυβο.

Στο εύρος, όμως, 90MHz έως 350MHz υπάρχουν κορυφές, οι τιμές έντασης των οποίων είναι μεγαλύτερες για ταχύτητα 400Mbps. Αυτές εμφανίζονται στις συχνότητες 100.4MHz, 150.3MHz, 198.5MHz και 249.1MHz. Το πλήθος των κορυφών, όμως, είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση των 100Mbps.

Για συχνότητες από 350MHz έως 1GHz, το σήμα των 100Mbps ταυτίζεται με τον θόρυβο, ενώ των 400Mbps εμφανίζει μικρές κορυφές με πλάτος το πολύ 10dBμV/m μεγαλύτερο από αυτό του θορύβου.



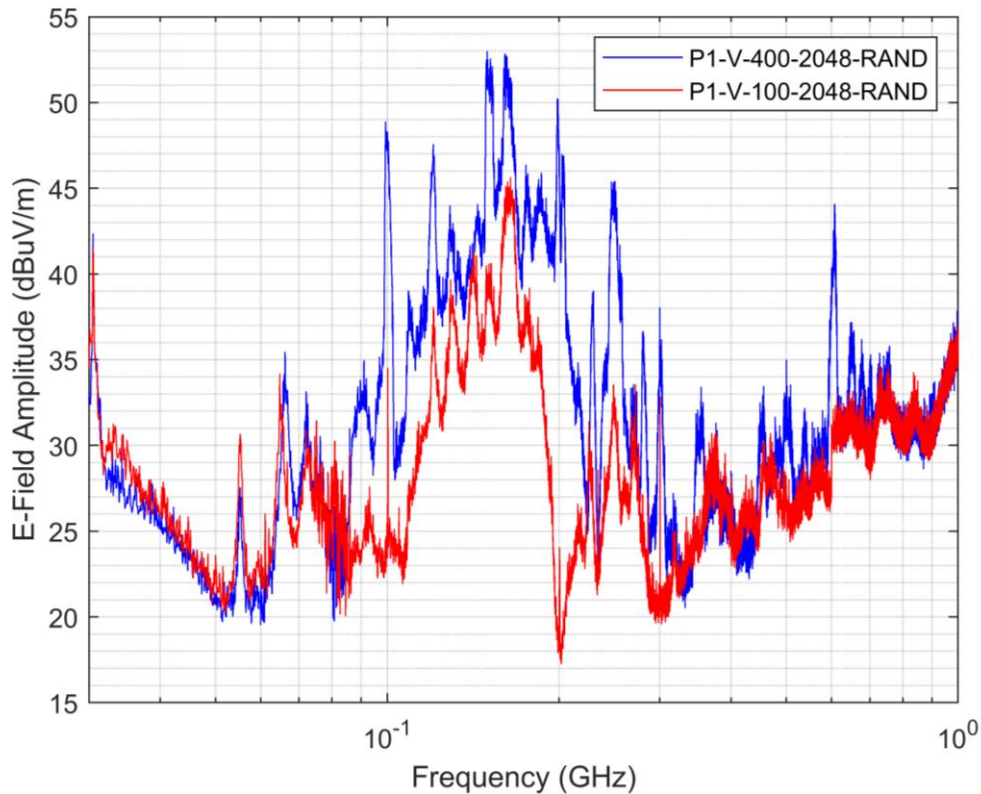
Εικόνα 5-6: Σύγκριση εκπομπών: 400/100Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)

Παρατηρείται ότι κυρίως η διαφορά των μετρήσεων υφίσταται στο εύρος συχνοτήτων 90MHz έως 350MHz.

Για συχνότητες μικρότερες των 90MHz τα σήματα ταυτίζονται με τον θόρυβο.

Μεταξύ 90MHz και 350MHz, οι κορυφές του σήματος 400Mbps είναι και πάλι μεγαλύτερης έντασης.

Για μεγαλύτερες συχνότητες, οι εκπομπές των 400Mbps εμφανίζουν κορυφές μικρότερης διαφοράς, της τάξης των 5-15dBμV/m, σε σχέση με αυτές των 100Mbps, οι οποίες ταυτίζονται και πάλι με τον θόρυβο.



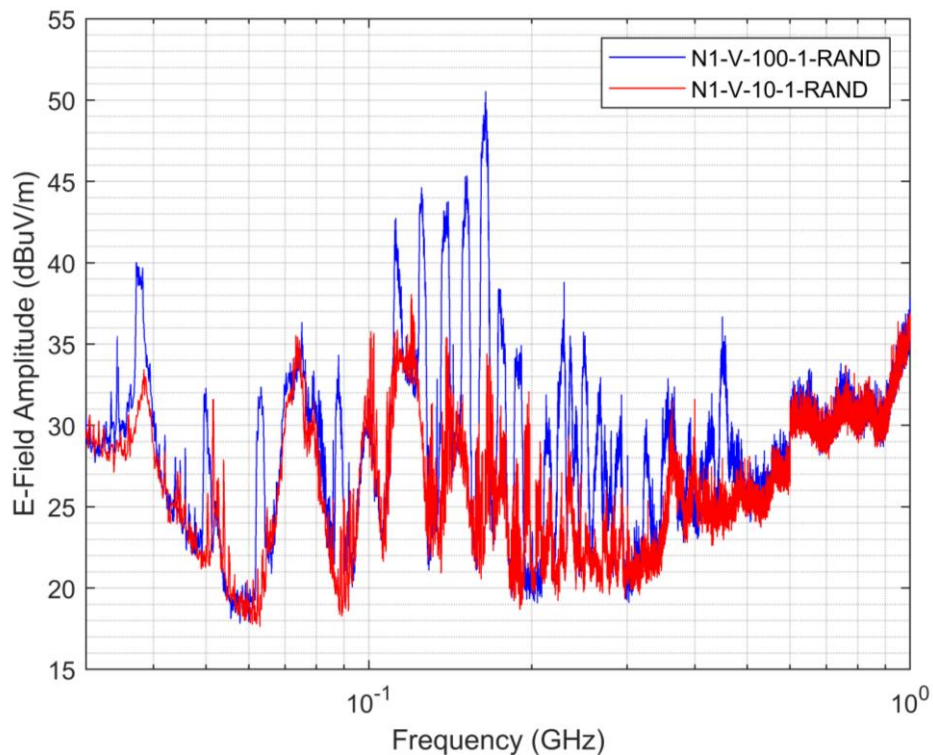
Εικόνα 5-7: Σύγκριση εκπομπών: 400/100Mbps (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)

Για συχνότητες μικρότερες των 80MHz, υπάρχει ταύτιση των σημάτων με τον θόρυβο.

Από τα 80MHz μέχρι τα 300MHz, και πάλι οι κορυφές του σήματος 400Mbps ξεπερνούν σε ένταση αυτές των 100Mbps.

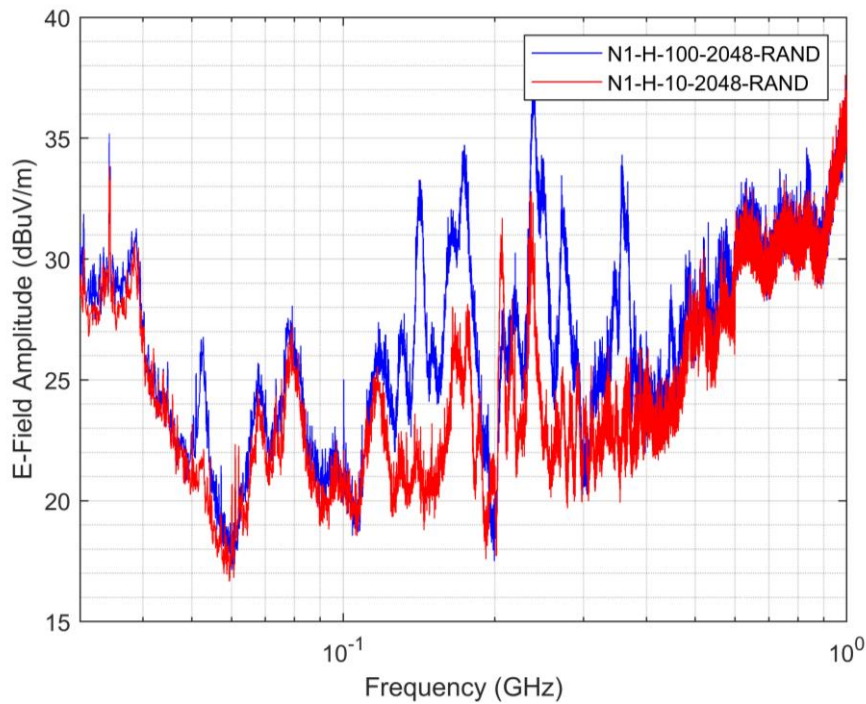
Αναμενόμενη συμπεριφορά εμφανίζουν τα σήματα στο εύρος 300-1000MHz, με το σήμα των 400Mbps να υπερισχύει μέχρι και για 15dBμV/m.

- Θα συγκριθούν τώρα μετρήσεις με ταχύτητες 100Mbps και 10Mbps.



Εικόνα 5-8: Σύγκριση εκπομπών: 100/10Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 1 byte)

Όσον αφορά το σήμα των 10Mbps, αυτό ξεπερνά τον θόρυβο σε ένα μικρό εύρος συχνοτήτων, από 100-200MHz. Στις υπόλοιπες συχνότητες ταυτίζεται με αυτόν. Αντίθετα, υπάρχουν κορυφές του σήματος των 100Mbps που αγγίζουν μέχρι και τα 50dBμV/m για συχνότητες από 100MHz έως 200MHz. Από εκεί και έπειτα, η διαφορά τους με τις εκπομπές των 10Mbps δεν ξεπερνά τα 10dBμV/m.

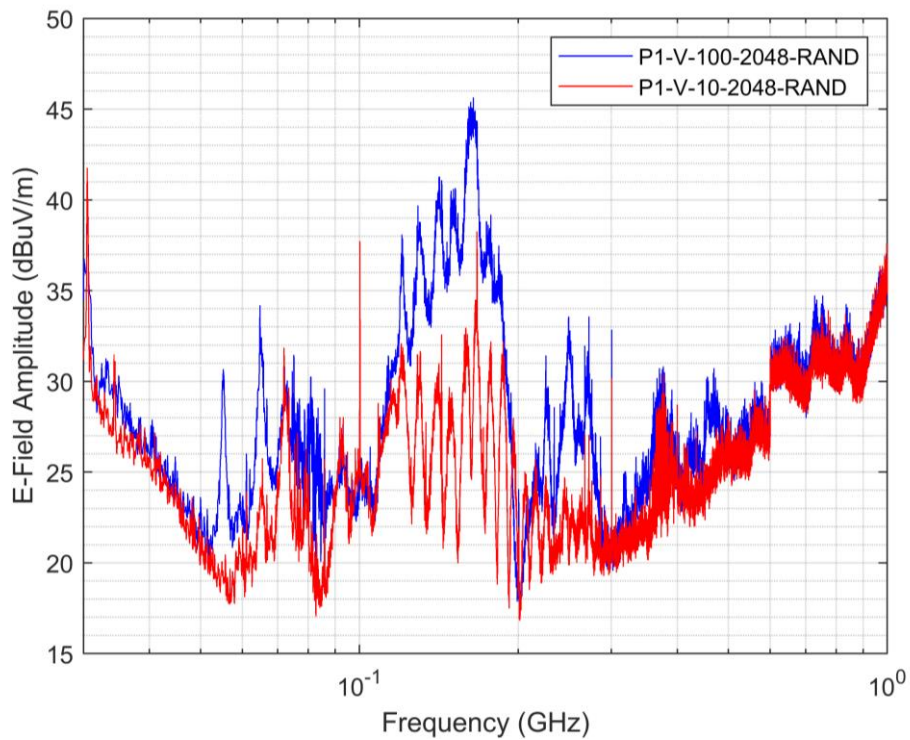


Εικόνα 5-9: Σύγκριση εκπομπών: 100/10Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά των σημάτων σε σχέση με προηγούμενα διαγράμματα.

Οι κορυφές του σήματος των 100Mbps έχουν τιμές έντασης μεγαλύτερες από αυτές των 10Mbps για συχνότητες από 100MHz έως 400MHz. Στο εύρος αυτό, οι εκπομπές των 10Mbps ξεπερνούν τον θόρυβο, με τον οποίο όμως ταυτίζονται εκτός του εύρους αυτού.

Για συχνότητες μεγαλύτερες των 400MHz, οι διαφορές των σημάτων είναι της τάξης των 5dBμV/m.



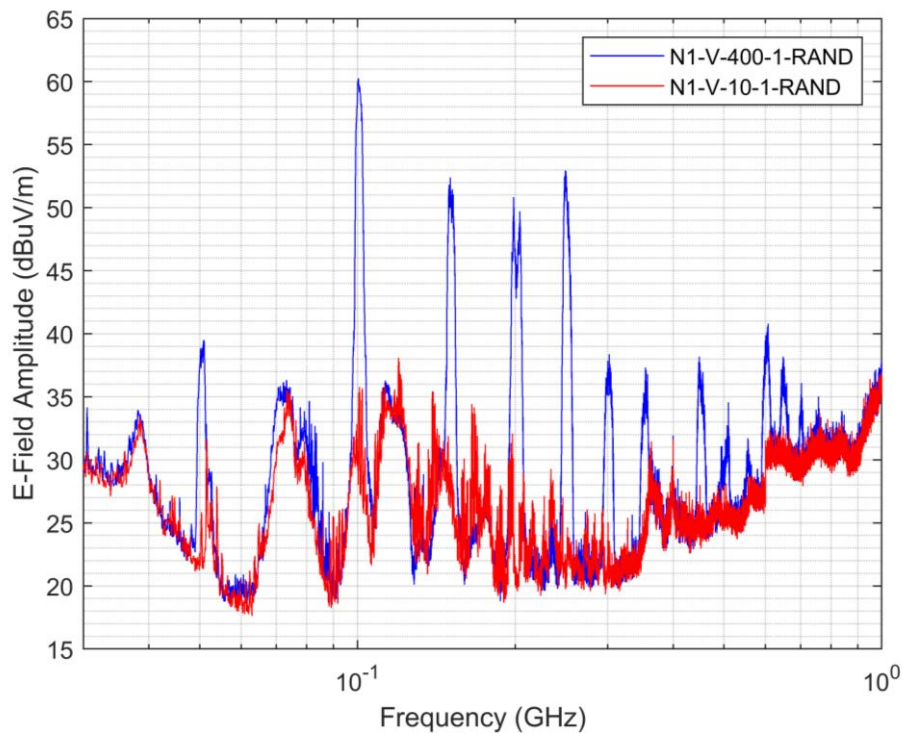
Εικόνα 5-10: Σύγκριση εκπομπών: 100/10Mbps (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)

Παρόμοια ποιοτικά συμπεράσματα προκύπτουν και από την Εικόνα 5-10.

Για συχνότητες 100-300MHz, οι εκπομπές των 100Mbps διαφέρουν από αυτές των 10Mbps κατά 10-15dBμV/m.

Για συχνότητες μεγαλύτερες των 300MHz, η διαφορά των σημάτων δε ξεπερνά τα 5dBμV/m.

- Ακολουθεί η σύγκριση μετρήσεων με ταχύτητες 400Mbps και 10Mbps.

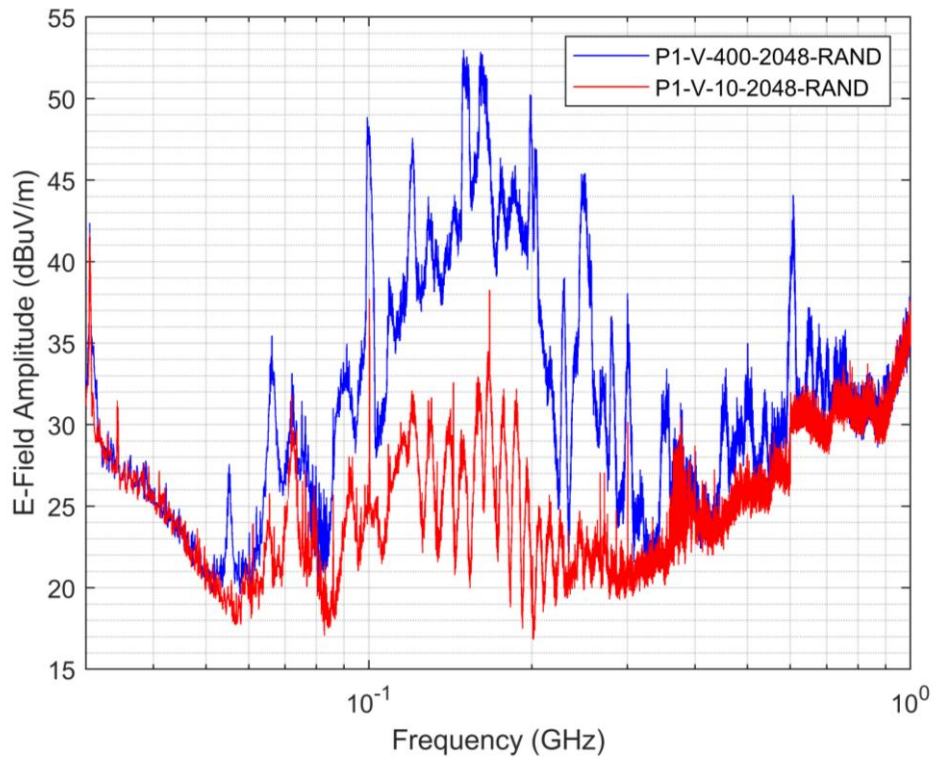


Εικόνα 5-11: Σύγκριση εκπομπών: 400/10Mbps (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 1 byte)

Στο εύρος συχνοτήτων από 30MHz έως 90MHz, τα σήματα εκπομπών ταυτίζονται με τον θόρυβο του ανηχοϊκού θαλάμου.

Για συχνότητες από 90MHz έως 300MHz, υπάρχουν κορυφές και των δύο σημάτων. Όμως, η διαφορά τους φτάνει μέχρι και τα 25dBμV/m.

Μετά τα 300MHz, η διαφορά των σημάτων δεν ξεπερνά τα 15dBμV/m.



Εικόνα 5-12: Σύγκριση εκπομπών: 400/10Mbps (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)

Όσον αφορά την τελευταία σύγκριση, παρατηρείται παρόμοιο πλήθος κορυφών των δύο σημάτων για συχνότητες από 90MHz έως 300MHz, αλλά η διαφορά αυτών αγγίζει και τα 30dBμV/m.

Για συχνότητες μεγαλύτερες των 300MHz, η διαφορά τους δεν ξεπερνά τα 15dBμV/m.

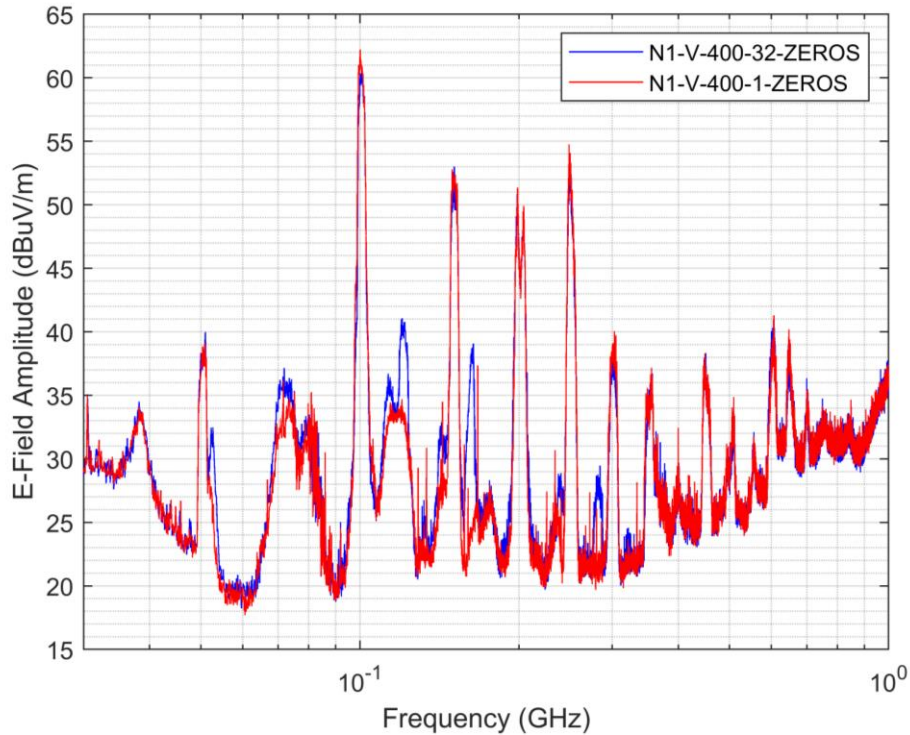
Από τη σύγκριση μετρήσεων με διαφορετικές ταχύτητες αποστολής δεδομένων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Για ταχύτητα 400Mbps, υπάρχουν υψηλές κορυφές εκπομπών, οι τιμές έντασης των οποίων μπορούν να φτάσουν μέχρι και 60dBμV/m.
- Για ταχύτητα 100Mbps, η ένταση των εκπομπών δεν ξεπερνά τα 50dBμV/m.
- Ενώ, οι εκπομπές για ταχύτητα 10Mbps είναι χαμηλές και μικρότερες από 35dBμV/m.
- Γενικά, το πλάτος των εκπομπών των 400Mbps είναι μεγαλύτερο από αυτό των 100Mbps, το οποίο με τη σειρά του ξεπερνά αυτό των 10Mbps.
- Επίσης, οι κύριες εκπομπές του SpaceWire καταλαμβάνουν μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων για 400Mbps σε σχέση με τις άλλες δύο ταχύτητες αποστολής.

5.3 Σύγκριση ως προς το μέγεθος των πακέτων

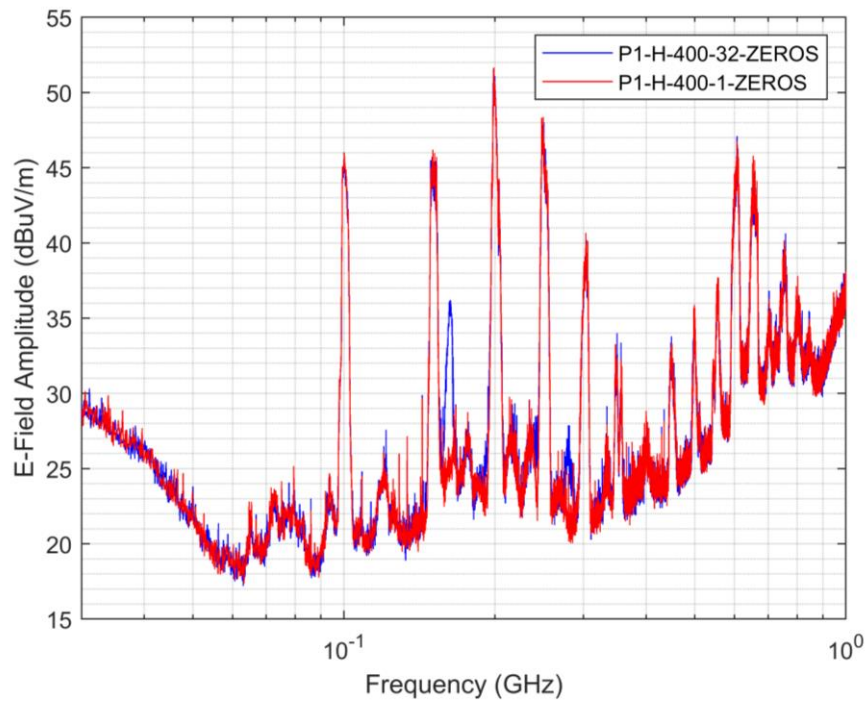
Θα αναδειχθεί τώρα το πώς επιδρά το μέγεθος των πακέτων αποστολής στο ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο από το SpaceWire.

- Αρχικά, συγκρίνονται μετρήσεις όταν αποστέλλονται πακέτα 1 και 32 bytes.



Εικόνα 5-13: Σύγκριση εκπομπών: 1/32 bytes (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)

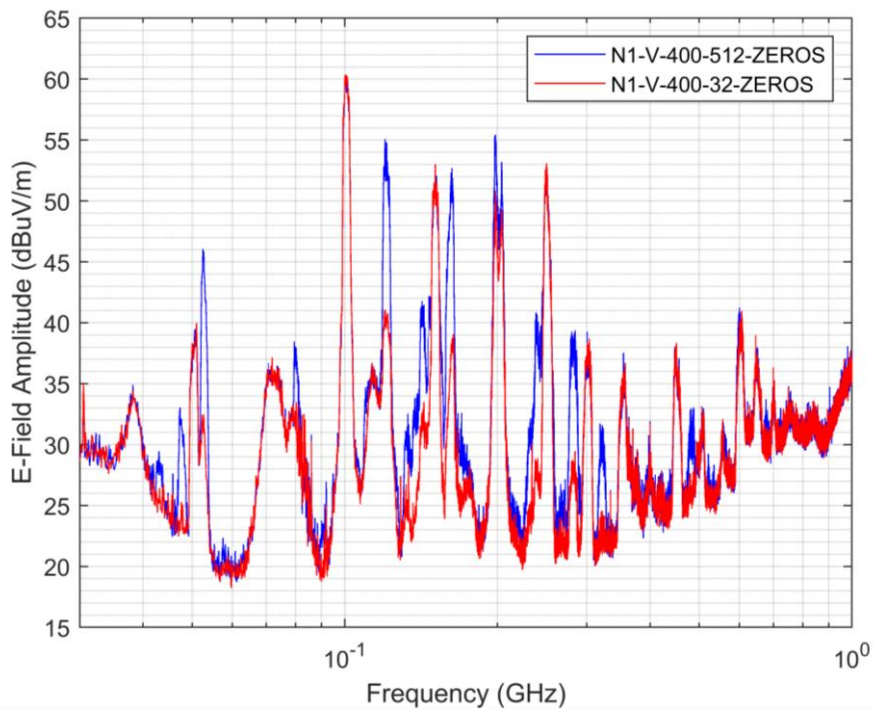
Παρατηρείται στο διάγραμμα ότι τα δύο σήματα παρουσιάζουν υψηλές κορυφές ίδιου σχεδόν πλάτους στις ίδιες συχνότητες. Όμως, στο σήμα των 32 bytes υπάρχουν κάποιες επιπλέον κορυφές, με υψηλότερη στη συχνότητα 119.8MHz πλάτους 41dBμV/m. Αυτές οι επιπλέον κορυφές είναι εντοπισμένες στο εύρος 112MHz έως 165MHz.



Εικόνα 5-14: Σύγκριση εκπομπών: 1/32 bytes (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)

Και στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ταύτιση των υψηλών κορυφών των δύο σημάτων, τόσο σε πλάτος όσο και σε συχνότητα. Υπάρχουν και εδώ κάποιες επιπλέον κορυφές του σήματος 32 bytes, με ξεκάθαρη αυτή των 36dBμV/m στα 163MHz.

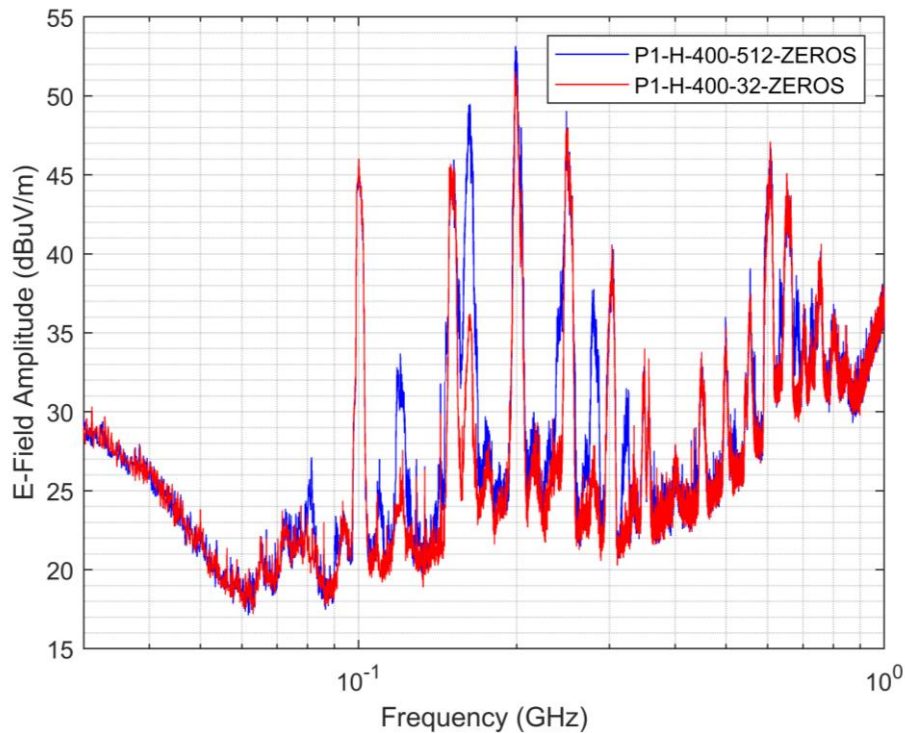
- Ακολουθεί η σύγκριση μετρήσεων για πακέτα μήκους 32 και 512 bytes



Εικόνα 5-15: Σύγκριση εκπομπών: 32/512 bytes (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)

Στη εικόνα 5-15 τα δύο σήματα εκπομπών έχουν παρόμοια συμπεριφορά με μικρές αποκλίσεις για συχνότητες από 30MHz έως 100MHz και από 300MHz έως 1GHz.

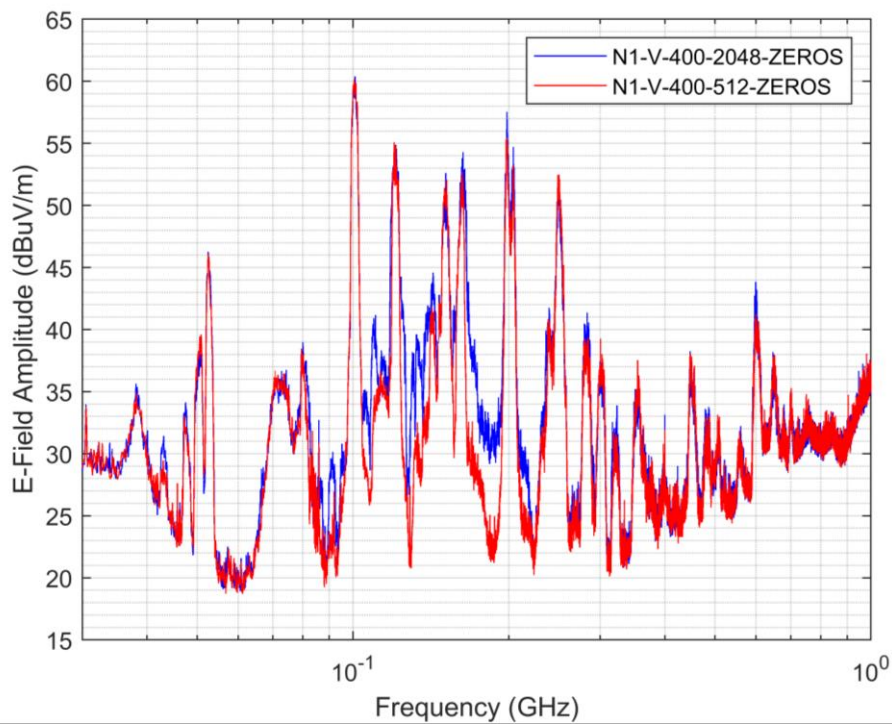
Στο ενδιάμεσο εύρος συχνοτήτων υπάρχουν κορυφές και των δύο σημάτων με υψηλή ένταση. Στις συχνότητες 100.7MHz, 150.8MHz και 249.8MHz τα δύο σήματα έχουν ίδιο πλάτος, ενώ στις συχνότητες 120.1MHz, 162.7MHz και 198.1MHz, το σήμα των 512 bytes ξεπερνά το άλλο κατά 14dBμV/m, 14dBμV/m και 6dBμV/m αντίστοιχα.



Εικόνα 5-16: Σύγκριση εκπομπών: 32/512 bytes (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)

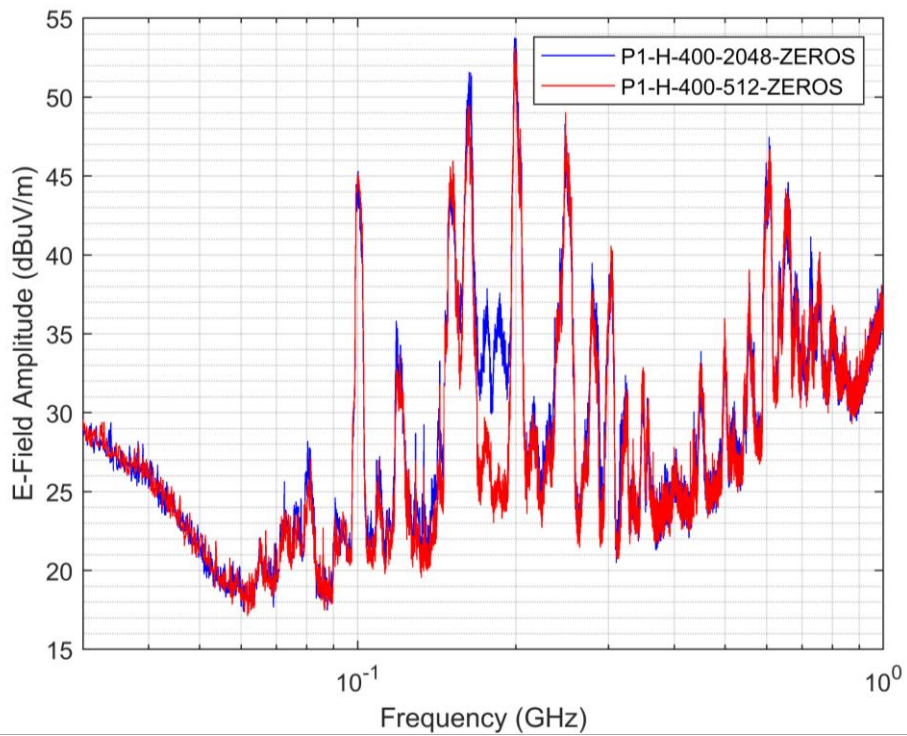
Παρόμοια με την προηγούμενη σύγκριση για πακέτα 32/512 bytes, οι σημαντικές κορυφές του σήματος των 32 bytes υπάρχουν και στο σήμα των 512 bytes στο εύρος 100MHz έως 300MHz. Συγκεκριμένα, βρίσκονται στις συχνότητες 100MHz, 149.8MHz, 250 MHz και 303.3MHz. Επίσης, στις συχνότητες 120.1MHz, 162.8MHz, 200.1MHz και 280.3MHz οι εκπομπές για πακέτα 512 bytes υπερτερούν κατά 7dBμV/m, 13dBμV/m, 3dBμV/m και 10dBμV/m αντίστοιχα.

- Θα συγκριθούν τώρα μετρήσεις με πακέτα 512 και 2048 bytes.



Εικόνα 5-17: Σύγκριση εκπομπών: 512/2048 bytes (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)

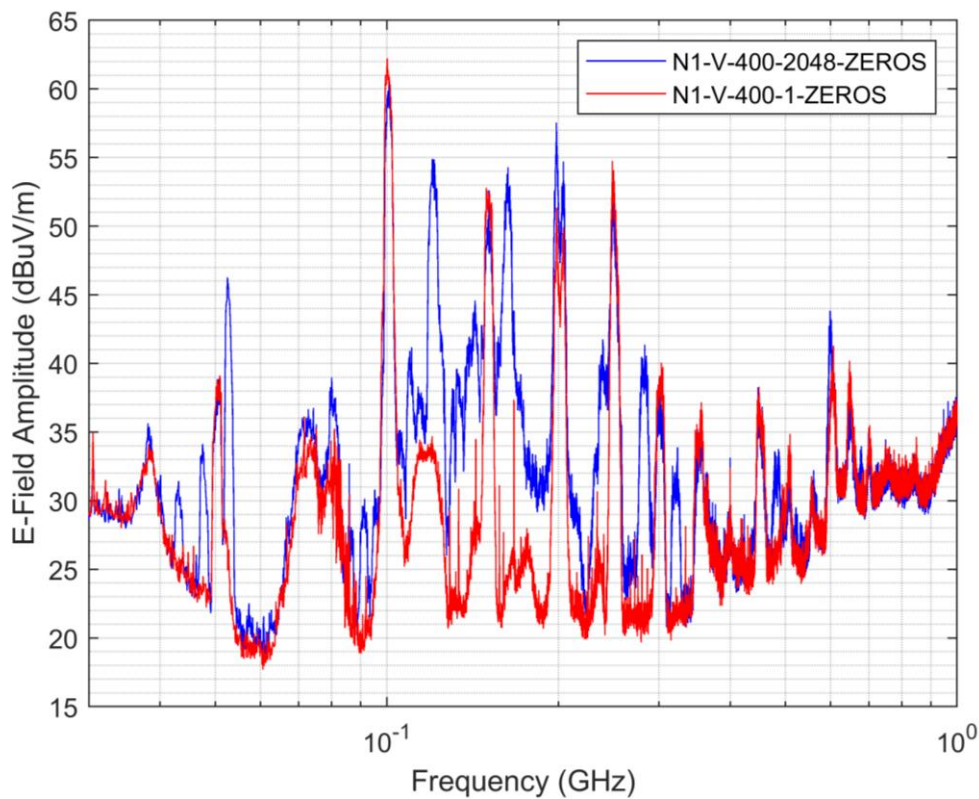
Στην Εικόνα 5-17 παρατηρείται ομοιομορφία των δύο σημάτων στο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Όμως, για συχνότητες από 105-220MHz εντοπίζονται διαφορές της τάξης των 10dBμV/m, με το σήμα των 2048 bytes να ξεπερνά αυτό των 512 bytes.



Εικόνα 5-18: Σύγκριση εκπομπών: 512/2048 bytes (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)

Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και σε αυτή την περίπτωση. Τώρα όμως οι διαφορές των δύο σημάτων υφίστανται σε πολύ μικρό εύρος συχνοτήτων, 179MHz έως 194MHz, και είναι της τάξης των 10dBμV/m.

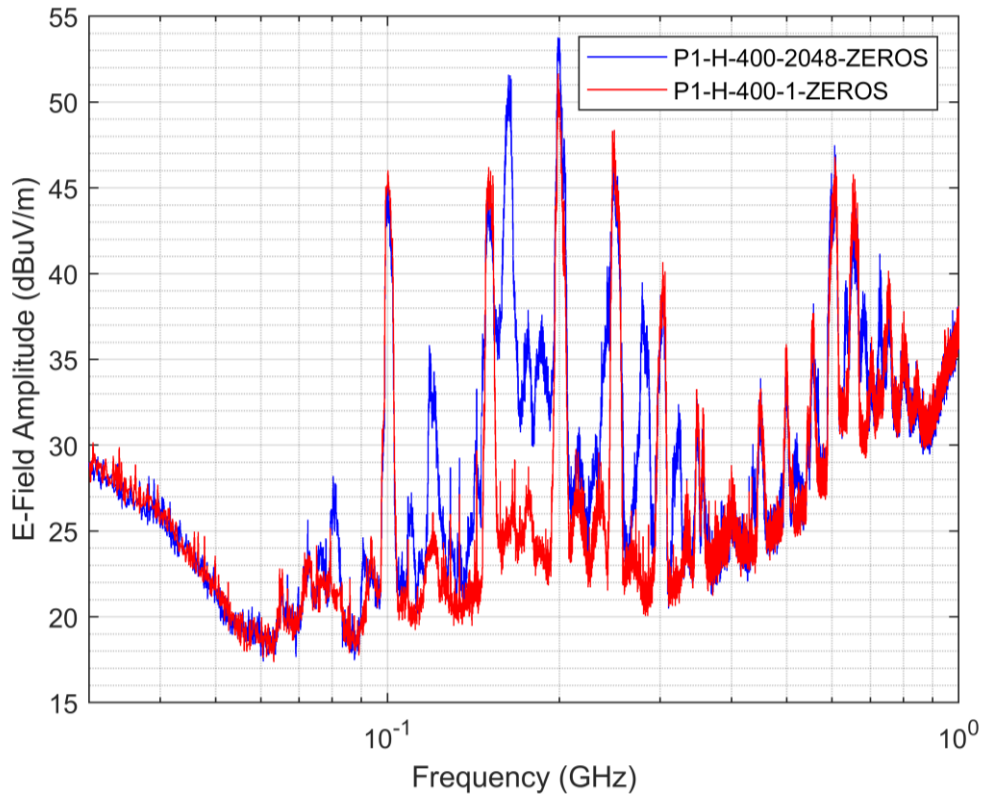
- Τέλος, συγκρίνονται μετρήσεις με πακέτα μήκους 1 και 2048 bytes.



Εικόνα 5-19: Σύγκριση εκπομπών: 1/2048 bytes (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)

Τα χαρακτηριστικά που εντοπίστηκαν στις προηγούμενες συγκρίσεις ως προς το μέγεθος των πακέτων, είναι εμφανή και εδώ. Υπάρχει σχετική ομοιομορφία για συχνότητες 30-100MHz και 300-1000MHz.

Οι κορυφές του σήματος του 1 byte υπάρχουν και στο σήμα των 2048 bytes στις συχνότητες 100MHz, 149.4MHz και 248.5MHz. Όμως, στο ενδιάμεσο εύρος συχνοτήτων, εμφανίζονται διαφορές μεταξύ των σημάτων που αγγίζουν μέχρι και τα 30dBμV/m.



Εικόνα 5-20: Σύγκριση εκπομπών: 1/2048 bytes (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο)

Με παρατήρηση και του τελευταίου διαγράμματος προκύπτουν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά της σύγκρισης. Και πάλι οι κύριες διαφορές των σημάτων εμφανίζονται στις συχνότητες 100-320MHz και φτάνουν μέχρι και τα 30dBμV/m.

Το τελικό, λοιπόν, συμπέρασμα είναι ότι το μήκος των πακέτων αποστολής επηρεάζει το ηλεκτρικό πεδίο που ακτινοβολείται από το SpaceWire, τόσο στο πλάτος του όσο και στη συχνοτική του συμπεριφορά.

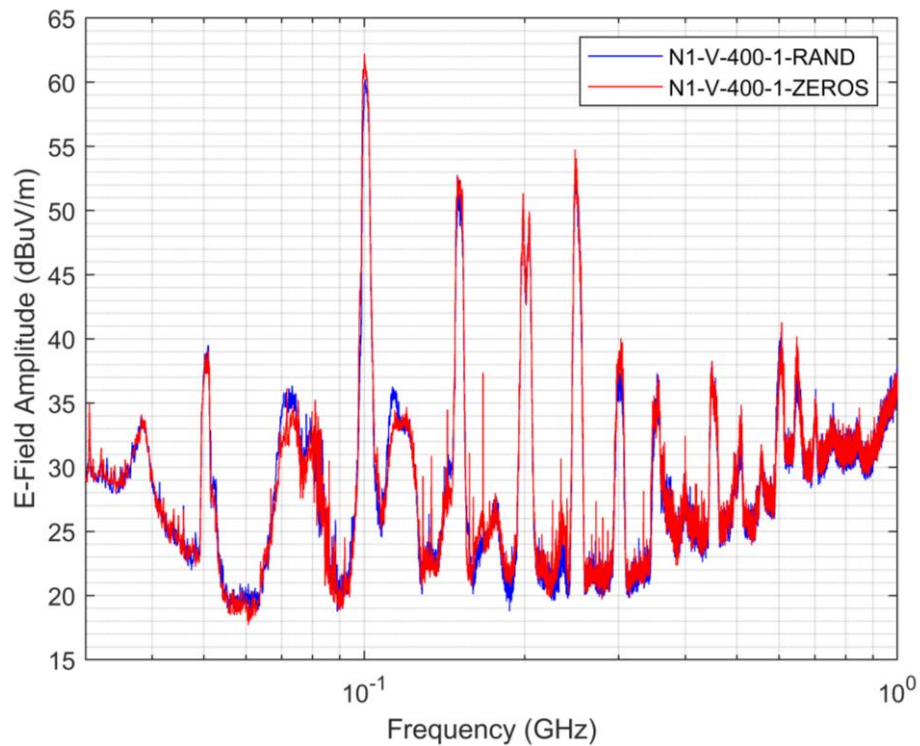
Κυρίως οι διαφορές εντοπίζονται σε ένα εύρος συχνοτήτων από 100MHz έως 300MHz. Καθώς αυξάνεται το μήκος των πακέτων, αυξάνεται και η ένταση του πεδίου. Ταυτόχρονα, όμως, πληθαίνουν και οι κορυφές του σήματος εκπομπής.

Γενικά, από σύγκριση σε σύγκριση διαφοροποιούνται τα «περιβάλλοντα» μέτρησης. (Φυσικά, σε κάθε μία σύγκριση, οι συνθήκες παραμένουν αναλλοίωτες.) Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται ότι οι ποιοτικές διαφορές των ηλεκτρικών πεδίων, ανάλογα με την παράμετρο σύγκρισης, είναι συνεπείς και όχι τυχαίες, δηλαδή είναι ανεξάρτητες από το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση.

Η ίδια λογική ακολουθείται σε όλο το παρόν κεφάλαιο.

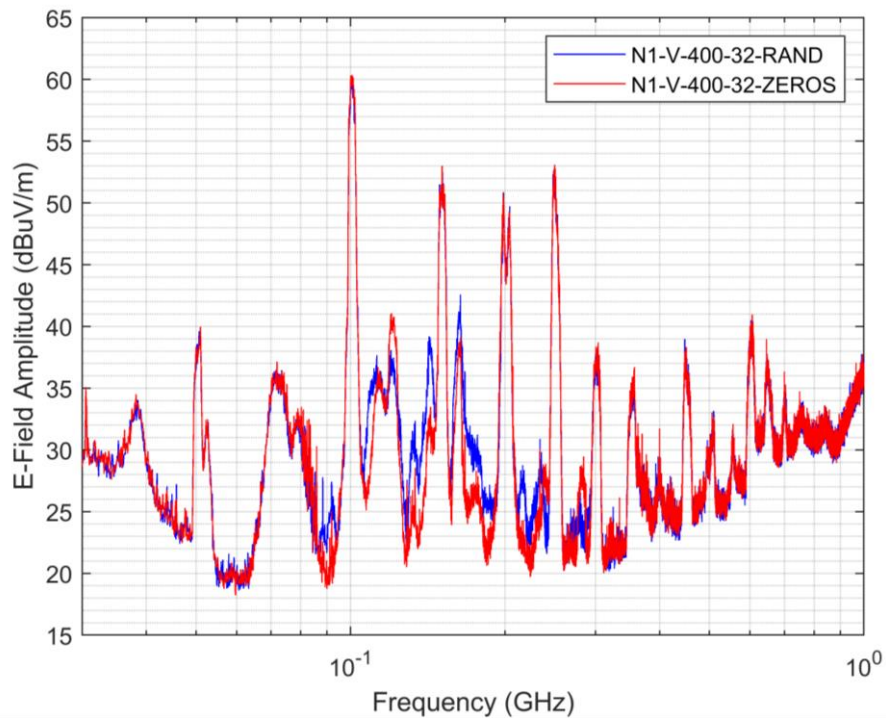
5.4 Σύγκριση ως προς το περιεχόμενο των πακέτων

Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται μετρήσεις όταν γίνεται αποστολή πακέτων τυχαίου και μηδενικού περιεχομένου.



Εικόνα 5-21: Σύγκριση εκπομπών: RAND/ZEROS (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, 1 byte)

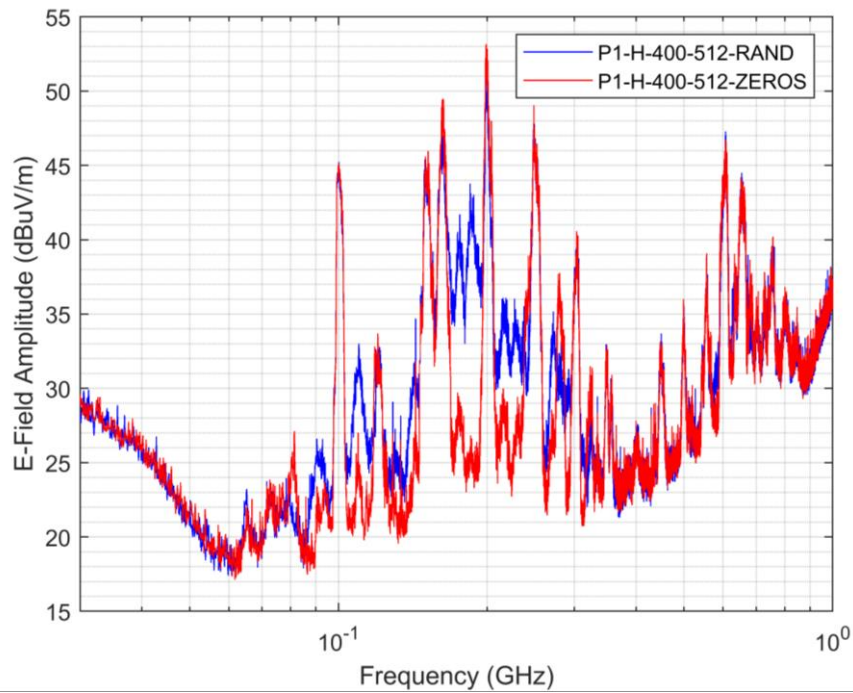
Στην Εικόνα 5-21 παρατηρείται ομοιομορφία των δύο σημάτων στο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Μικρή διαφοροποίηση του πλάτους υπάρχει στις συχνότητες 70-80MHz, με το σήμα των τυχαίων πακέτων να υπερτερεί.



Εικόνα 5-22: Σύγκριση εκπομπών: RAND/ZEROS (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, 32 bytes)

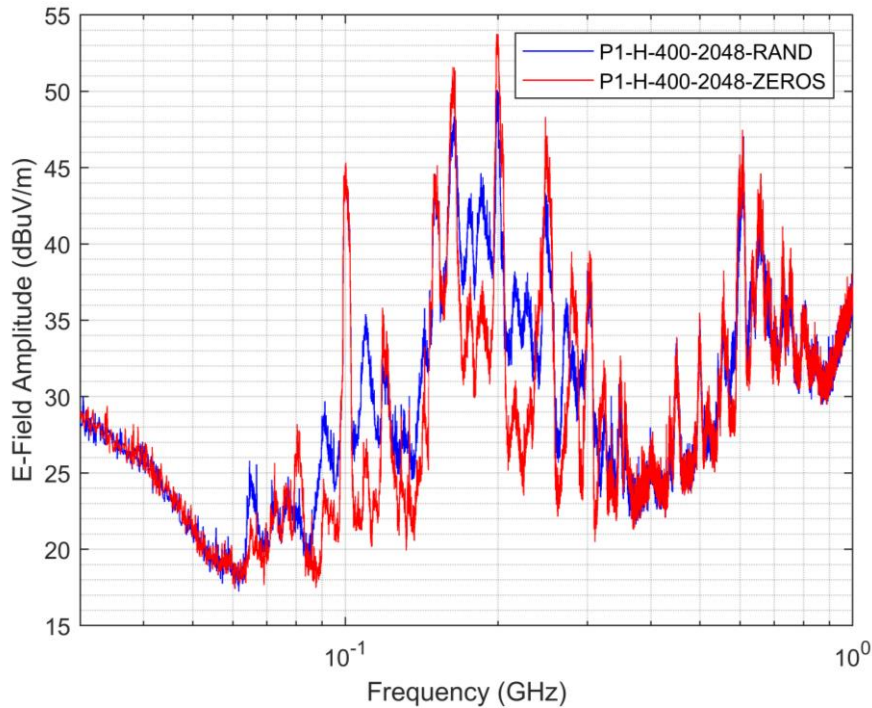
Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, τα δύο σήματα έχουν παρόμοια συμπεριφορά στις περισσότερες συχνότητες.

Υπάρχουν, όμως, και κάποιες κορυφές του σήματος για τα πακέτα τυχαίου περιεχομένου στο εύρος από 110MHz έως 220MHz, που υπερσχύουν το πολύ κατά 8dBμV/m.



Εικόνα 5-23: Σύγκριση εκπομπών: RAND/ZEROS (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, 512 bytes)

Και στην περίπτωση αυτή, τα δύο ηλεκτρικά πεδία έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Οι διαφορές τους υφίστανται για συχνότητες από 100MHz έως 300MHz και αγγίζουν μέχρι και τα 17dBμV/m.



Εικόνα 5-24: Σύγκριση εκπομπών: RAND/ZEROS (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, οριζόντια πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, 2048 bytes)

Στην τελευταία σύγκριση ως προς το περιεχόμενο των πακέτων, εξακολουθούν να ισχύουν τα χαρακτηριστικά της διαφοράς των δύο σημάτων. Εδώ, όμως, το εύρος εκτείνεται από τα 70MHz έως και 300MHz, ενώ το σήμα των τυχαίων πακέτων υπερτερεί το πολύ κατά 10dBμV/m.

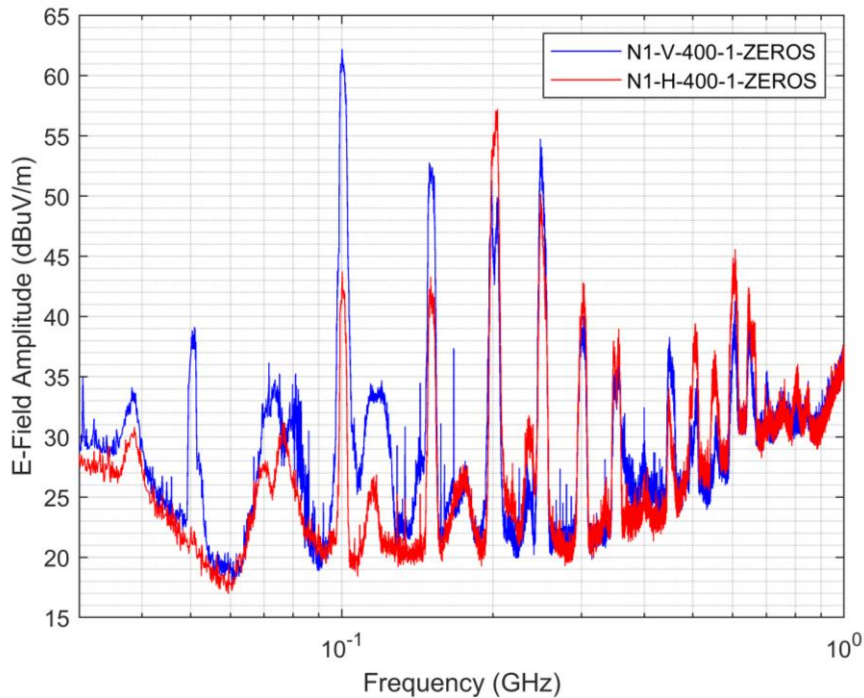
Είναι, τελικά, εμφανής η διαφοροποίηση των ηλεκτρικών πεδίων που ακτινοβολεί το καλώδιο SpaceWire, όταν διαμέσου αυτού μεταδίδονται πακέτα μηδενικού και τυχαίου περιεχομένου.

Γενικά, οι εκπομπές για τυχαία πακέτα σε ένα εύρος συχνοτήτων υπερσχύουν έναντι αυτών για μηδενικά πακέτα.

Επίσης, αυξανόμενου του μεγέθους των πακέτων προς αποστολή, οι διαφορές των εντάσεων μεταξύ των σημάτων τυχαίου και μηδενικού περιεχομένου κυμαίνονται σε υψηλότερα επίπεδα.

5.5 Σύγκριση ως προς την πόλωση της κεραίας

Παρακάτω συγκρίνονται μετρήσεις όταν η κεραία λήψης έχει κατακόρυφη (Vertical) ή οριζόντια (Horizontal) πόλωση.

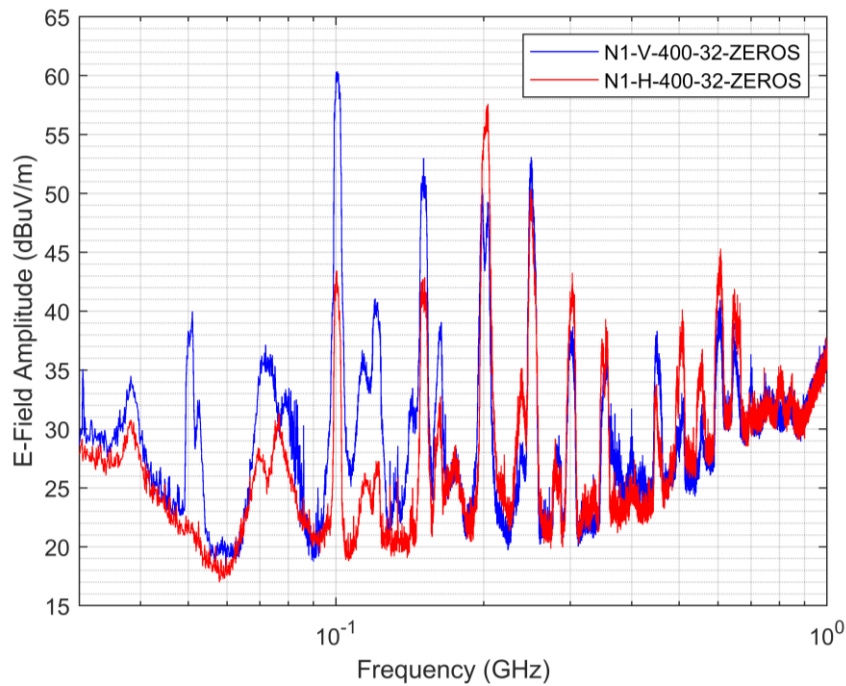


Εικόνα 5-25: Σύγκριση εκπομπών: Vertical/Horizontal (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte)

Στην Εικόνα 5-25, οι κορυφές των δύο σημάτων εμφανίζονται στις ίδιες συχνότητες με εξαίρεση μία επιπλέον κορυφή του σήματος κατακόρυφης πόλωσης στη συχνότητα 50.9MHz.

Στο εύρος από 30MHz έως 149.4MHz το σήμα κατακόρυφης πόλωσης έχει υψηλότερες τιμές έντασης. Η διαφορά τους φτάνει μέχρι και 19dBμV/m.

Το αντίθετο συμβαίνει στο υπόλοιπο φάσμα. Το σήμα οριζόντιας πόλωσης είναι ελαφρώς υψηλότερο.

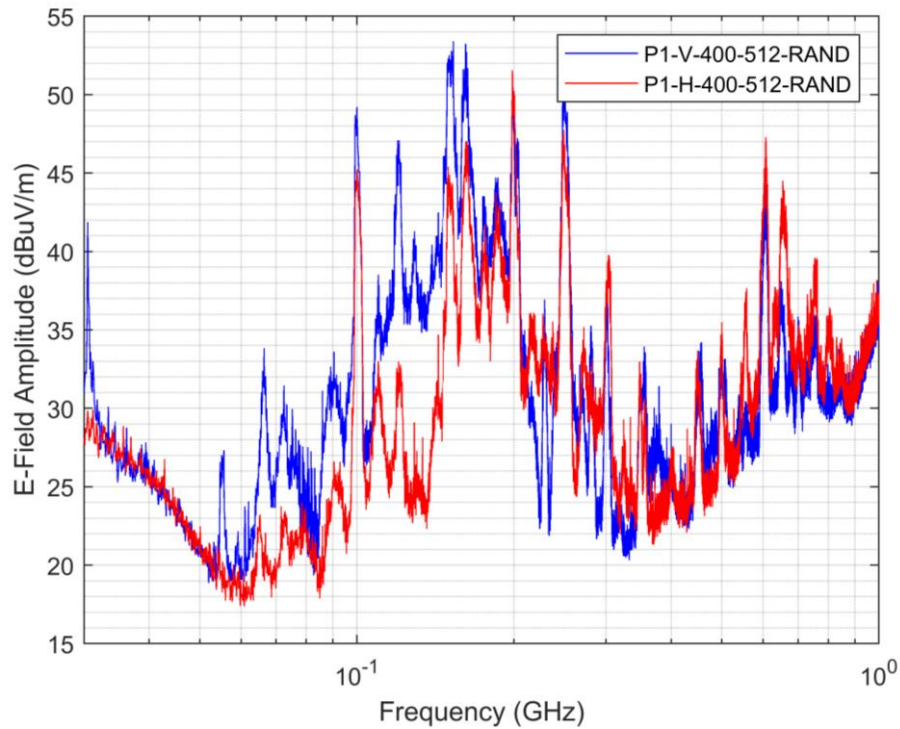


Εικόνα 5-26: Σύγκριση εκπομπών: Vertical/Horizontal (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 32 bytes)

Παρόμοια χαρακτηριστικά διακρίνονται και σε αυτό το συγκριτικό διάγραμμα.

Από τα 30MHz έως και τα 150.8MHz, το ηλεκτρικό πεδίο για κατακόρυφη πόλωση κεραίας λήψης έχει μεγαλύτερες τιμές έντασης, αλλά και περισσότερες κορυφές.

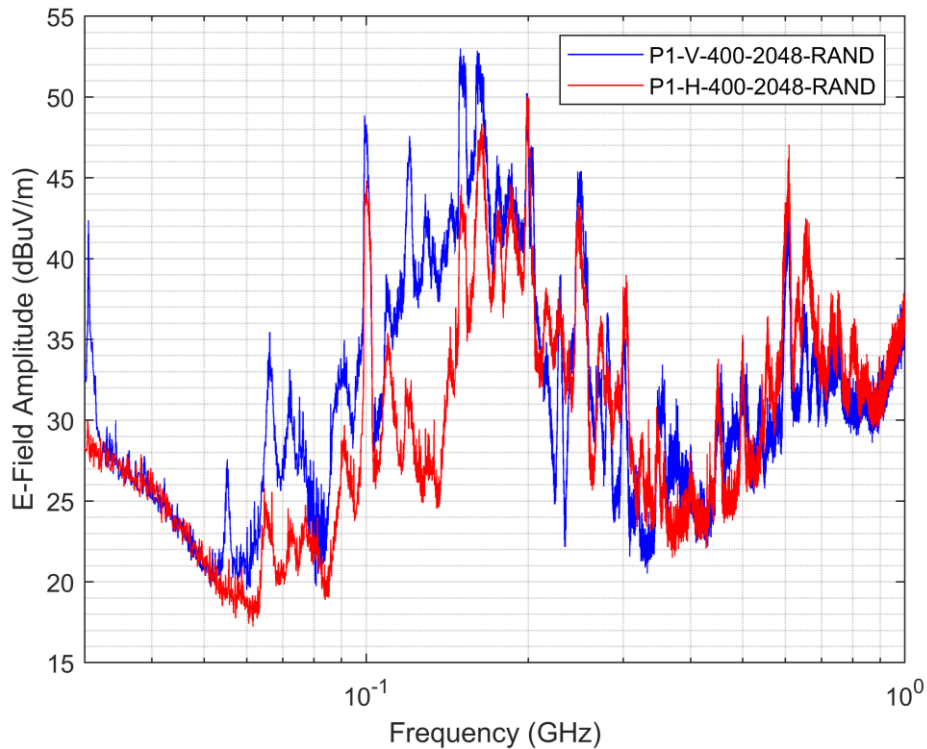
Για συχνότητες μεγαλύτερες των 150.8MHz, οι διαφοροποιήσεις πλάτους είναι μικρές.



Εικόνα 5-27: Σύγκριση εκπομπών: Vertical/Horizontal (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, τυχαίο πακέτο 512 bytes)

Στην Εικόνα 5-27 διαφοροποιείται η ένταση των ηλεκτρικών πεδίων. Οι διαφορές είναι μεγαλύτερες μέχρι τα 200MHz, με το σήμα της κατακόρυφης πόλωσης να υπερτερεί μέχρι και 14dBμV/m.

Στο υπόλοιπο φάσμα, τα δύο εκπεμπόμενα σήματα έχουν περίπου ίδιο πλάτος.



Εικόνα 5-28: Σύγκριση εκπομπών: Vertical/Horizontal (για κάθετη διάταξη SpaceWire, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)

Στο τελευταίο διάγραμμα, επίσης, παρατηρούνται μεγαλύτερες εκπομπές για κατακόρυφη πόλωση της κεραίας μέχρι και τα 200MHz.

Σε μεγαλύτερες συχνότητες, οι διαφορές έντασης των πεδίων δεν είναι ιδιαίτερα αισθητές.

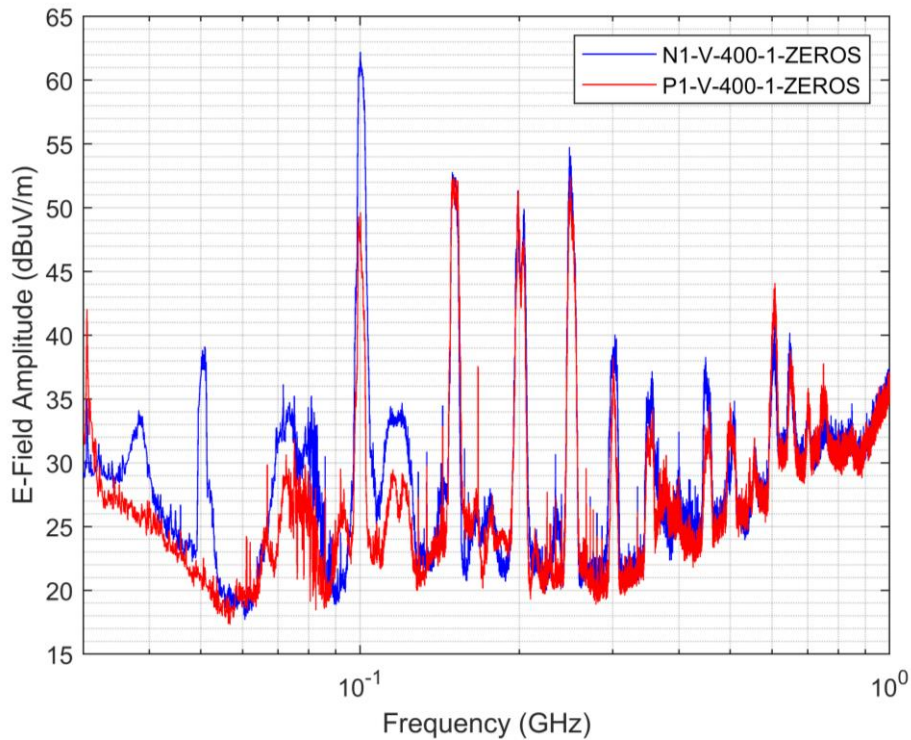
Συμπερασματικά, η πόλωση της κεραίας λήψης παίζει μεγάλο ρόλο όσον αφορά τα ηλεκτρικά πεδία που εκπέμπονται από το SpaceWire.

Όταν η κεραία τοποθετείται σε κατακόρυφη πόλωση λαμβάνονται μεγαλύτερες, πιθανόν μέχρι και κατά 20dBμV/m, εκπομπές σε σχέση με την οριζόντια πόλωση. Αυτό όμως συμβαίνει σε ένα φάσμα συχνοτήτων από 30MHz έως και 200MHz.

Στο υπόλοιπο φάσμα, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ των δύο σημάτων.

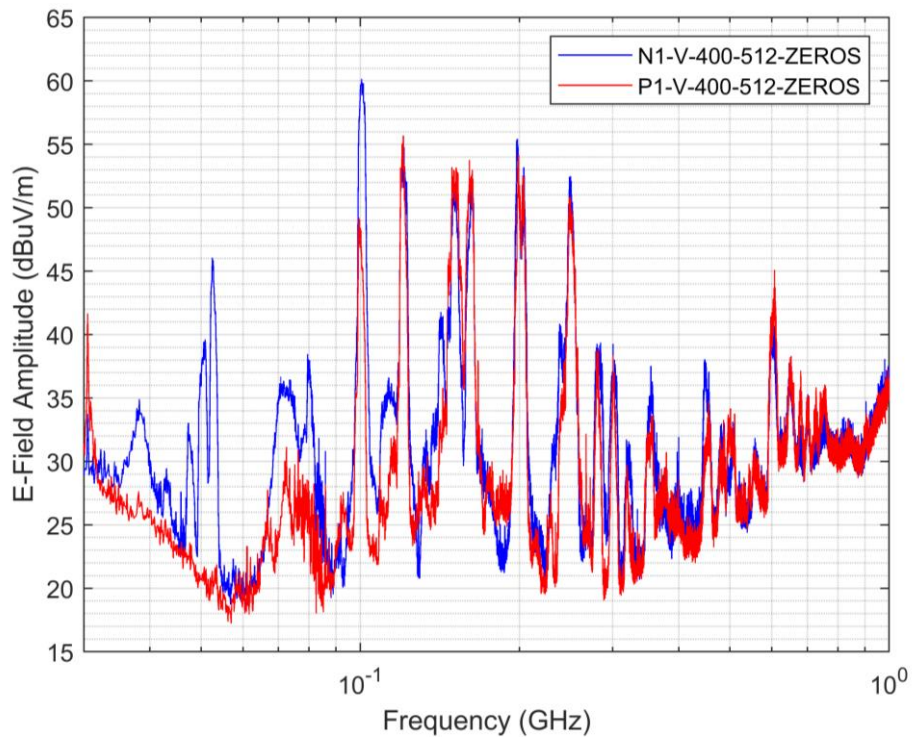
5.6 Σύγκριση ως προς τη διάταξη του SpaceWire

Θα ακολουθήσει σύγκριση μετρήσεων όταν το καλώδιο SpaceWire τοποθετείται σε οριζόντια (Normal) και σε κάθετη (Perpendicular) διάταξη.



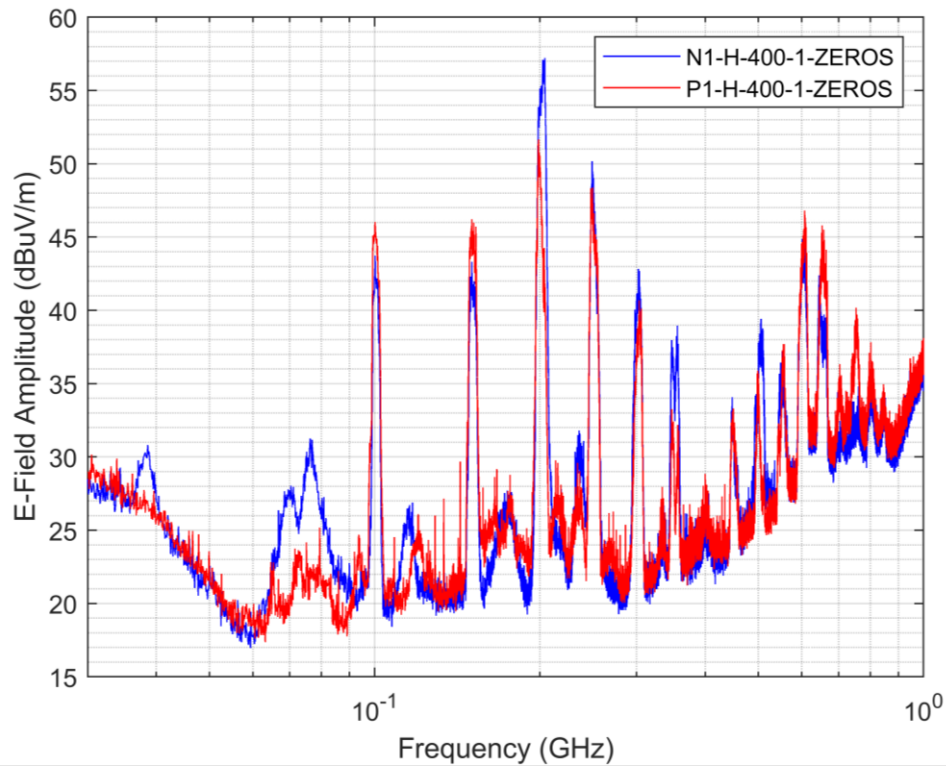
Εικόνα 5-29: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για κατακόρυφη πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte)

Στην Εικόνα 5-29 παρατηρείται ότι οι βασικές κορυφές των δύο σημάτων βρίσκονται στις ίδιες συχνότητες, σε εύρος από 100-250MHz. Μέχρι και τα 150MHz, υπερισχύει σε πλάτος το σήμα οριζόντιας διάταξης. Στη συχνότητα 50.9MHz η διαφορά τους είναι 17dBμV/m, ενώ στα 100.1MHz είναι 13dBμV/m. Στο υπόλοιπο φάσμα οι διαφορές είναι πολύ μικρές.



Εικόνα 5-30: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για κατακόρυφη πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 512 bytes)

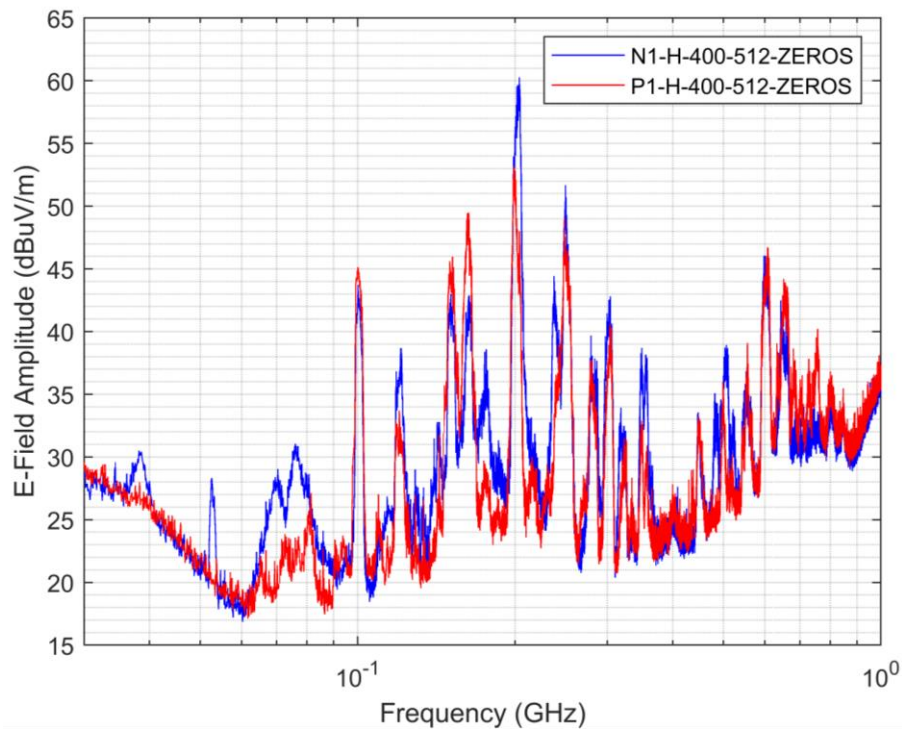
Παρόμοιες διαφορές υπάρχουν και στο παραπάνω διάγραμμα. Υπερισχύει το σήμα οριζόντιας διάταξης μέχρι και τη συχνότητα 120MHz, με τη μεγαλύτερη διαφορά των 26dBμV/m να εμφανίζεται στα 52.7MHz. Στο υπόλοιπο φάσμα συχνοτήτων δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές.



Εικόνα 5-31: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για οριζόντια πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte)

Στην παραπάνω περίπτωση παρατηρείται μία διαφορετική συμπεριφορά. Σε όλο το εύρος συχνοτήτων υπερिशύει το σήμα κάθετης διάταξης, εκτός από τη συχνότητα 204MHz, όπου το σήμα οριζόντιας διάταξης υπερτερεί κατά 15dBμV/m.

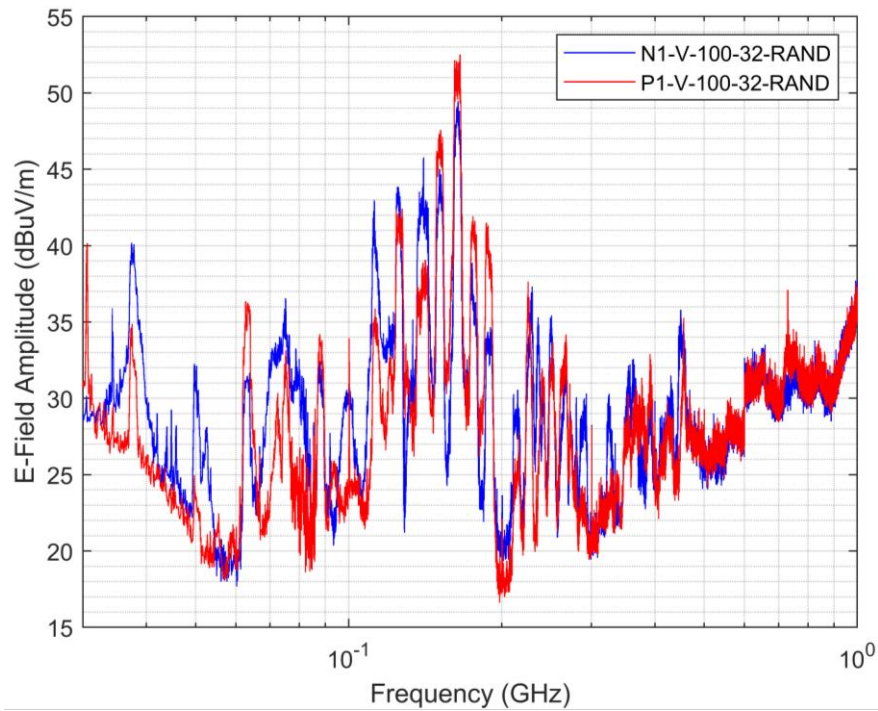
(Αμελούνται οι κορυφές πριν τα 90MHz, επειδή οφείλονται στον θόρυβο του θαλάμου.)



Εικόνα 5-32: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για οριζόντια πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 512 bytes)

Στην Εικόνα 5-32 «εναλλάσσονται» οι επικρατούσες κορυφές. Για παράδειγμα, στις συχνότητες 120.9MHz, 176.1MHz, 203.6MHz και 249.4MHz υπερिशύουν οι εκπομπές για οριζόντια διάταξη του SpaceWire. Ενώ, στις συχνότητες 151.8MHz και 162.8MHz η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για κάθετη διάταξη είναι μεγαλύτερη.

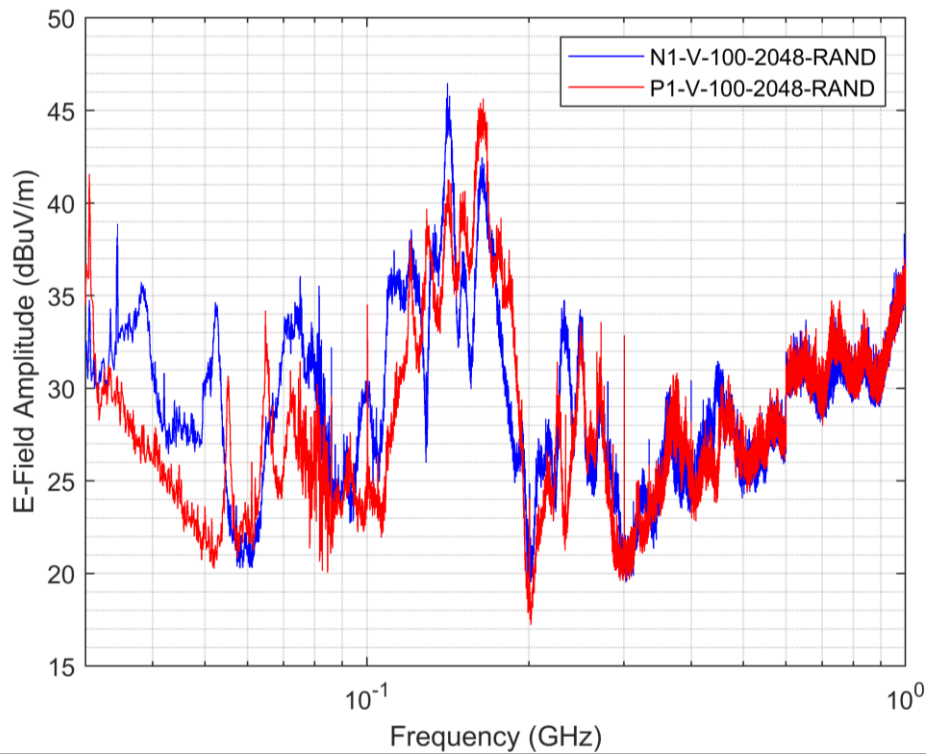
(Αμελούνται οι κορυφές πριν τα 90MHz, επειδή οφείλονται στον θόρυβο του θαλάμου.)



Εικόνα 5-33: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για κατακόρυφη πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 100Mbps, τυχαίο πακέτο 32 bytes)

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν με παρατήρηση του παραπάνω διαγράμματος. Ωστόσο, υπάρχει μία διαφορά. Οι κύριες εκπομπές μετατοπίζονται σε συχνότητες μικρότερες των 200MHz και για τα δύο σήματα.

(Και πάλι αμελούνται οι κορυφές που υπάρχουν πριν τα 90MHz.)

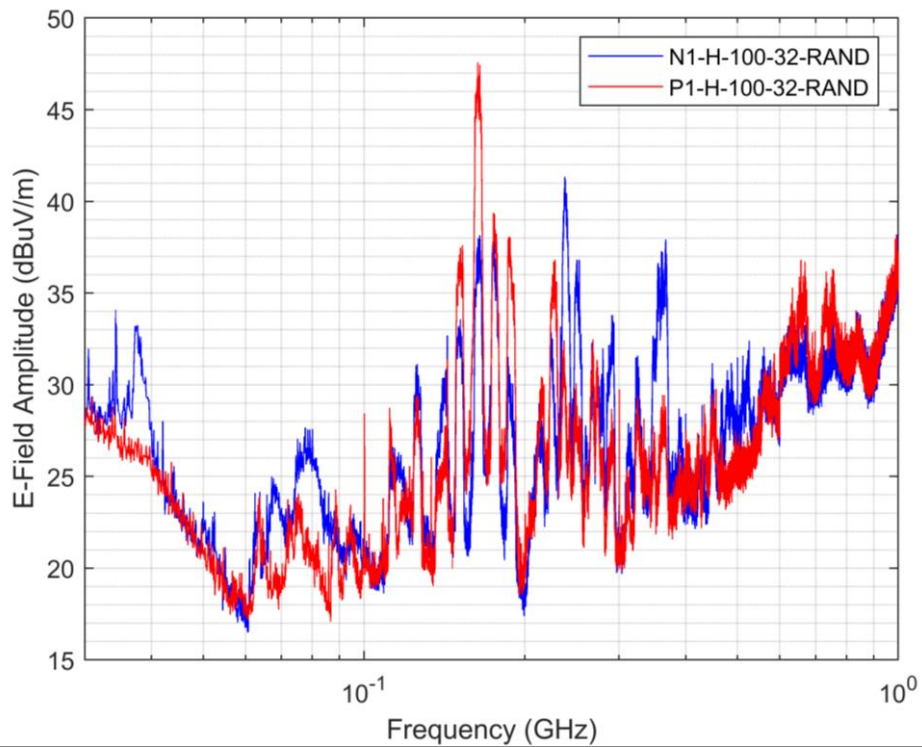


Εικόνα 5-34: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για κατακόρυφη πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 100Mbps, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)

Πανομοιότυπη συμπεριφορά διακρίνεται και σε αυτή την περίπτωση. Ομοιομορφία των δύο σημάτων παρατηρείται μετά τα 300MHz.

Στη συχνότητα 141.1MHz, εμφανίζεται η υψηλότερη κορυφή με ένταση 47dBμV/m για το σήμα οριζόντιας διάταξης, ενώ στα 164.3MHz υπάρχει κορυφή έντασης 46dBμV/m του σήματος κάθετης διάταξης.

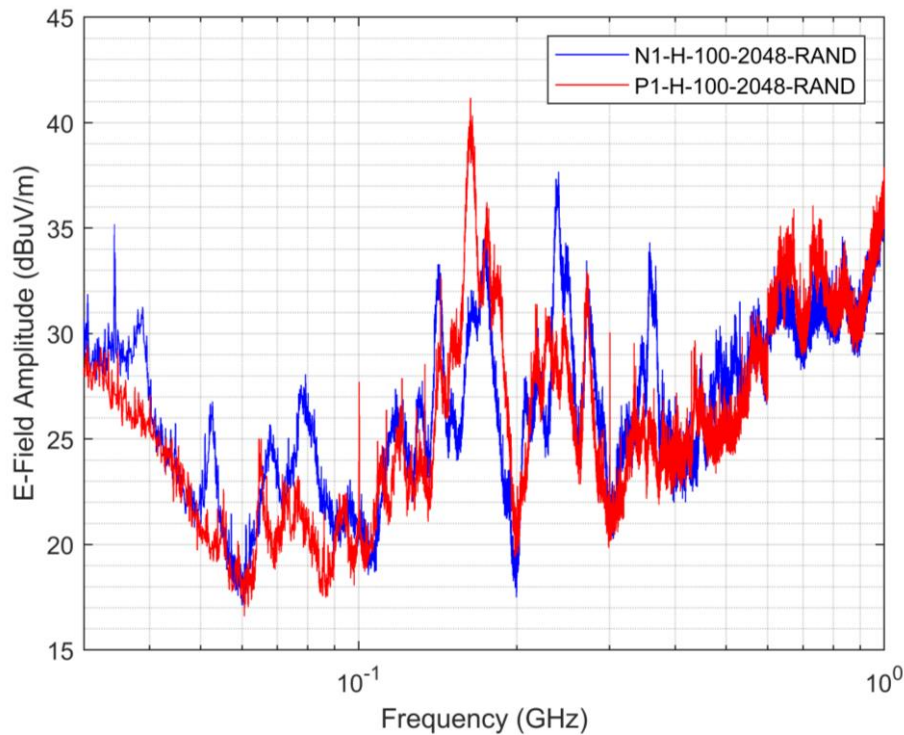
(Αμελούνται οι κορυφές που υπάρχουν πριν τα 90MHz.)



Εικόνα 5-35: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για οριζόντια πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 100Mbps, τυχαίο πακέτο 32 bytes)

Στην Εικόνα 5-35 κυριαρχεί η κορυφή του σήματος κάθετης διάταξης στη συχνότητα 163.3MHz με ένταση 48dBμV/m. Υψηλή ένταση του σήματος οριζόντιας διάταξης εμφανίζεται στη συχνότητα 237.6MHz.

(Αμελούνται οι κορυφές που υπάρχουν πριν τα 90MHz.)



Εικόνα 5-36: Σύγκριση εκπομπών: Normal/Perpendicular (για οριζόντια πόλωση, απόσταση 1m, ταχύτητα 100Mbps, τυχαίο πακέτο 2048 bytes)

Ολοκληρώνοντας τις συγκρίσεις της ενότητας, παρατηρείται σχετική ομοιομορφία των δύο σημάτων στο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Υπερισχύουν οι κορυφές στα 163.2MHz και στα 239.9MHz. Η πρώτη αφορά το σήμα κάθετης διάταξης και υπερτερεί κατά 10dBμV/m, ενώ η δεύτερη ανήκει στις εκπομπές για οριζόντια διάταξη και υπερτερεί κατά 8dBμV/m.

(Αμελούνται οι κορυφές που υπάρχουν πριν τα 90MHz.)

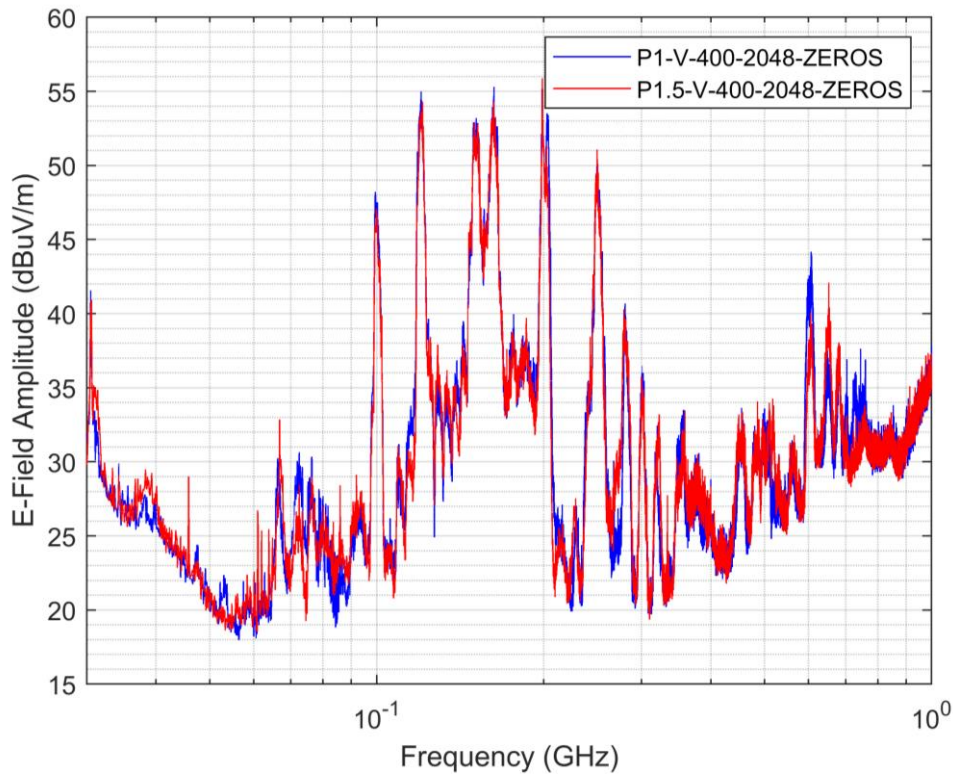
Όσον αφορά την επίδραση της διάταξης του SpaceWire στο ηλεκτρικό πεδίο που ακτινοβολεί, συμπεραίνουμε ότι εξαρτάται από τις παραμέτρους της δοκιμής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις υπερಿಸχύνουν ελάχιστα οι εκπομπές για οριζόντια διάταξη σε συχνότητες μεγαλύτερες των 200MHz.

Δεν υπάρχει όμως κάποιο χαρακτηριστικό που να εμφανίζεται με συνέπεια σε όλες τις συγκρίσεις.

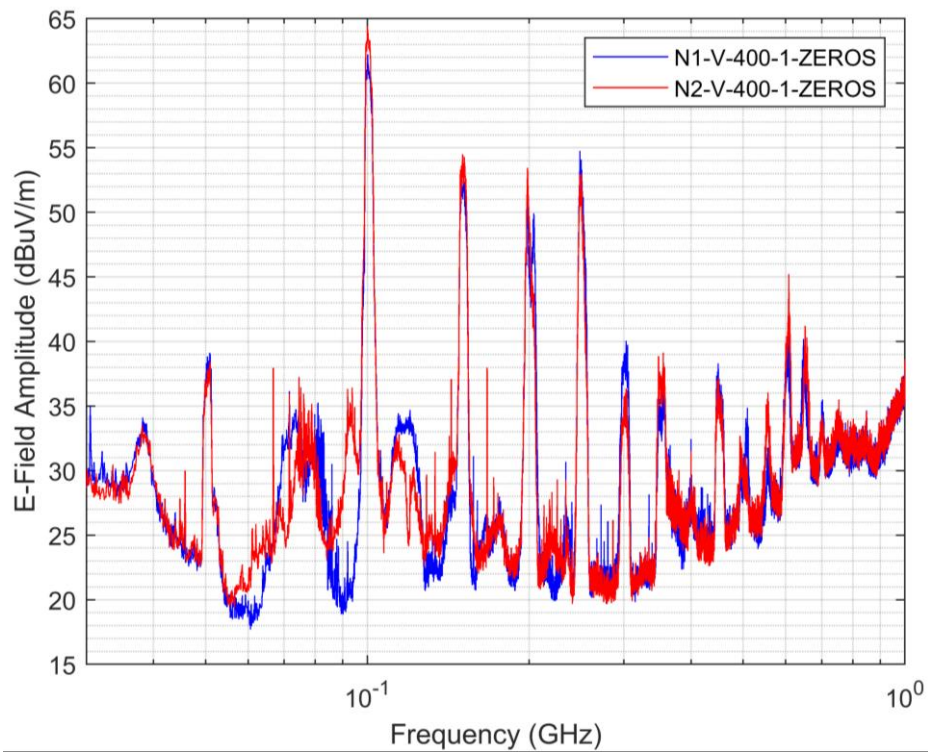
5.7 Σύγκριση ως προς την απόσταση της κεραίας

Για την ενότητα αυτή, η κεραία λήψης βρίσκεται σε απόσταση 1m, 1.5m και 2m από την άκρη του τραπεζιού, πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένο το SpaceWire.



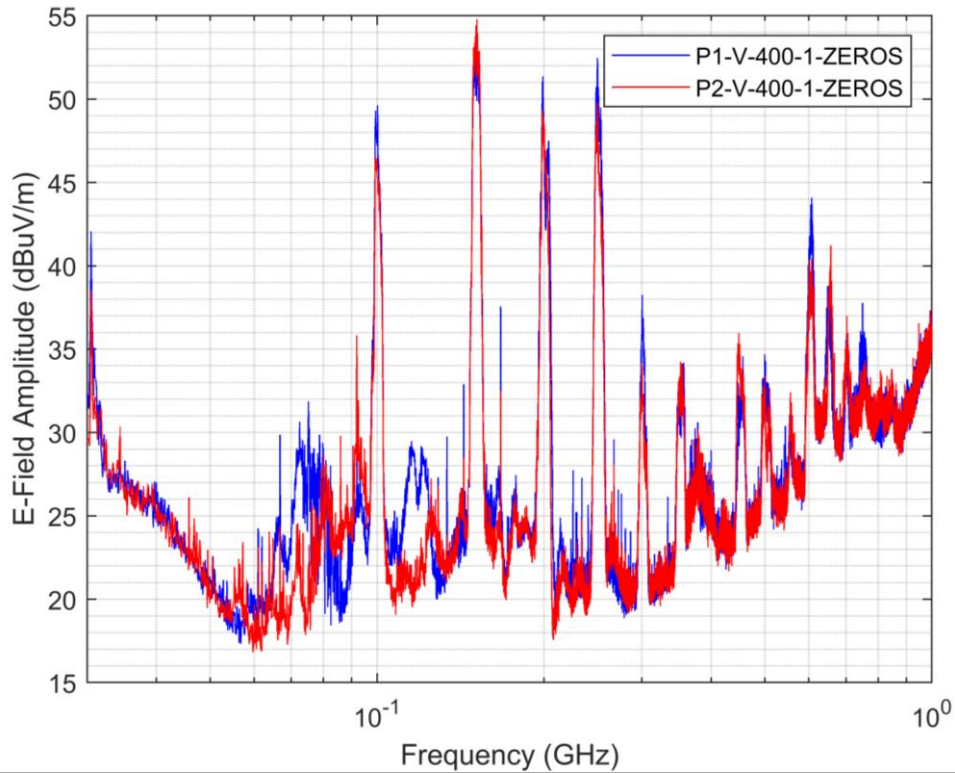
Εικόνα 5-37: Σύγκριση εκπομπών: 1/1.5m (για κάθετη διάταξη SpaceWire, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 2048 bytes)

Από την Εικόνα 5-37 είναι φανερό ότι σχεδόν σε όλο το εύρος συχνοτήτων οι διαφορές μεταξύ των δύο σημάτων είναι αμελητέες. Υπερισχύει το σήμα όταν η κεραία τοποθετείται σε απόσταση 1m. Αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού το ηλεκτρικό πεδίο που ακτινοβολείται μειώνεται με την απόσταση.



Εικόνα 5-38: Σύγκριση εκπομπών: 1/2m (για οριζόντια διάταξη SpaceWire, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte)

Παρατηρείται ότι σχεδόν σε όλο το εύρος συχνοτήτων το σήμα για απόσταση κεραίας 1m υπερیشχει κατά μέσο όρο 3dBμV/m έναντι του σήματος των 2m.

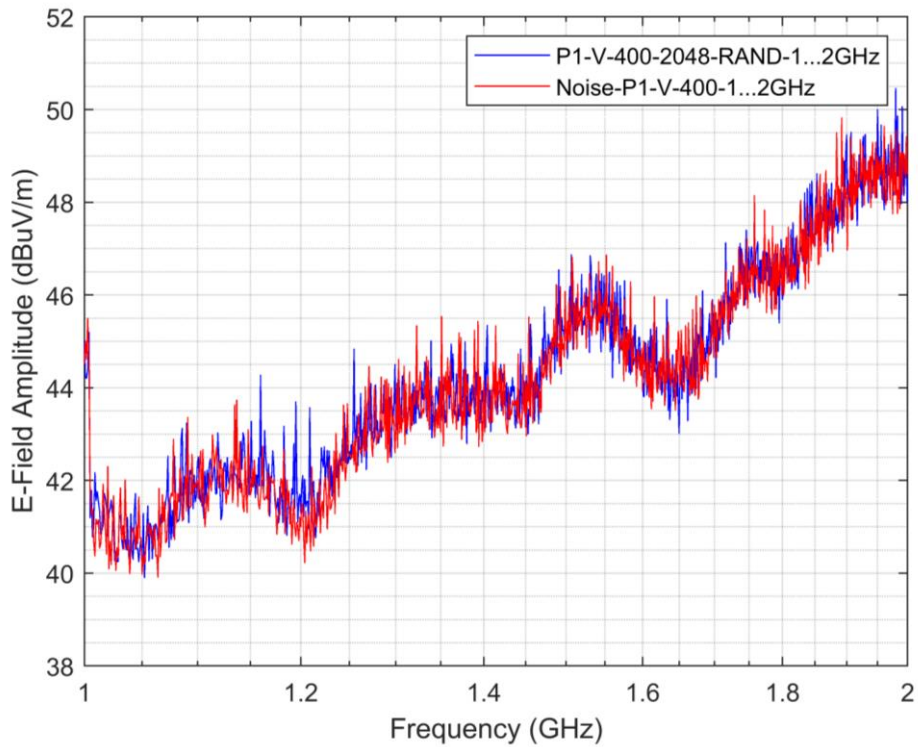


Εικόνα 5-39: Σύγκριση εκπομπών: 1/2m (για κάθετη διάταξη SpaceWire, κατακόρυφη πόλωση, ταχύτητα 400Mbps, μηδενικό πακέτο 1 byte)

Παρόμοια, ισχύει ότι η διαφορά των σημάτων κυμαίνεται στα 3dBμV/m με τις εκπομπές για απόσταση 2m να είναι χαμηλότερης έντασης σε όλο το συχνοτικό φάσμα. Σε ορισμένες συχνότητες δεν ισχύει το παραπάνω. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι τα επίπεδα θορύβου δεν είναι απολύτως όμοια σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Παρ' όλα αυτά, η γενική εικόνα είναι ότι το ηλεκτρικό πεδίο που ακτινοβολείται από το καλώδιο μειώνεται κατά 3dBμV/m όταν η απόσταση της κεραίας διπλασιάζεται. Το συμπέρασμα αυτό είναι απόλυτα συμβατό με τη θεωρία.

5.8 Σύγκριση ως προς τη συχνότητα

Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, επαναλαμβάνεται η διαδικασία για συχνότητες 1GHz έως 2GHz.



Εικόνα 5-40: Εκπομπή P1-V-400-2048-RAND-1...2GHz compared to Noise

Το παραπάνω διάγραμμα είναι ενδεικτικό. Σε όλες τις μετρήσεις που λήφθηκαν για αυτό το εύρος συχνοτήτων υπάρχει πλήρης ομοιομορφία του σήματος με τον θόρυβο του ανηχοϊκού θαλάμου. Δεν υπάρχουν, δηλαδή, ουσιαστικά αξιόλογες εκπομπές του SpaceWire στις συχνότητες 1 - 2GHz.

5.9 Συμπεράσματα

Μετά τη εκτέλεση όλων των πειραματικών δοκιμών της διπλωματικής αυτής εργασίας, προκύπτουν κάποια σημαντικά συμπεράσματα τόσο για την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του καλωδίου SpaceWire, όσο και για το πώς πρέπει να αντιμετωπίζονται οι προκλήσεις που αναδύονται σε κάθε διαδικασία αξιολόγησης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας ενός οποιουδήποτε συστήματος.

Αρχικά, οι συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον μίας μέτρησης επιδρούν σημαντικά στο αποτέλεσμα:

- ✓ Η πόλωση της κεραίας λήψης επηρεάζει τις λαμβανόμενες εκπομπές από το SpaceWire. Όταν η κεραία είναι προσανατολισμένη κατακόρυφα, οι εκπομπές είναι μεγαλύτερες μέχρι και κατά 20dBμV/m σε ένα εύρος συχνοτήτων 30MHz έως 200MHz. Σε μεγαλύτερες συχνότητες δεν υπάρχουν αξιόλογες διαφορές.
- ✓ Όσον αφορά τη διάταξη του SpaceWire επάνω στο τραπέζι (οριζόντια ή κάθετη), δεν εντοπίστηκε κάποιο συνεπές χαρακτηριστικό της διαφοράς των σημάτων. Το ηλεκτρικό πεδίο εξαρτάται ταυτόχρονα και από τις υπόλοιπες παραμέτρους.
- ✓ Ο διπλασιασμός της απόστασης της κεραίας λήψης από το EUT προκαλεί μείωση του ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου κατά 3dBμV/m, δηλαδή υποδιπλασιασμό αυτού. Το αποτέλεσμα είναι ορθό σύμφωνα με τη θεωρία.

Σημαντικό, επίσης, ρόλο παίζουν τα χαρακτηριστικά των πακέτων δεδομένων που αποστέλλονται μέσω του SpaceWire:

- ✓ Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα αποστολής των πακέτων, τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο εκπομπών του SpaceWire. Για ταχύτητα 400Mbps η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου φτάνει μέχρι και τα 60dBμV/m, για 100Mbps παραμένει μικρότερη των 50dBμV/m, ενώ για ταχύτητα 10Mbps οι εκπομπές είναι χαμηλότερες των 35dBμV/m. Για τη μεγαλύτερη ταχύτητα, το εύρος συχνοτήτων που καταλαμβάνουν οι κύριες εκπομπές είναι το μεγαλύτερο.
- ✓ Καθώς αυξάνεται το μήκος των πακέτων αποστολής, αυξάνεται τόσο το πλάτος των εκπομπών, όσο και το πλήθος των κορυφών του.
- ✓ Η αποστολή πακέτων τυχαίου περιεχομένου έναντι πακέτων μηδενικών προκαλεί ακτινοβολία ηλεκτρικού πεδίου μεγαλύτερης έντασης.

Επίσης, από τις μετρήσεις που λήφθηκαν για συχνότητες μεγαλύτερες του 1GHz, καταλήγουμε στο ότι το καλώδιο SpaceWire δεν ακτινοβολεί ηλεκτρικό πεδίο σε αυτό το φάσμα.

Σε όλη τη διάρκεια της μετρητικής διαδικασίας, προέκυψαν αρκετά προβλήματα. Προβλήματα, όμως, υπάρχουν σε κάθε ηλεκτρομαγνητική δοκιμή. Η επίλυση αυτών απαιτεί προσεκτικό έλεγχο όλων των πιθανών παραγόντων, είτε εξωτερικών είτε εσωτερικών της διαδικασίας. Για παράδειγμα, η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή του καλωδίου Ethernet στο SpaceWire ήταν ένα από τα βασικότερα θέματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν.

Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι για να εξασφαλιστεί η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ενός συστήματος απαιτείται συνεχής προσπάθεια και έλεγχος όλων των παραμέτρων της διαδικασίας.

5.10 Μελλοντικές επεκτάσεις

Όπως έγινε φανερό προηγουμένως, το ηλεκτρικό πεδίο που ακτινοβολεί το SpaceWire παρουσιάζει σημαντικές διαφορές ανάλογα με το αν το καλώδιο Ethernet διαρρέεται από ρεύμα ή όχι. Μία ιδέα για μελλοντική μελέτη είναι η αξιολόγηση της ατρωσίας του SpaceWire, δηλαδή το κατά πόσο επηρεάζεται η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του όταν παρευρίσκονται σε κοντινή απόσταση διάφορες πηγές σημάτων που εκπέμπουν σε διάφορες συχνότητες.

Τέλος, μία παρατήρηση που έγινε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι ότι όταν μεταδίδονται στο SpaceWire πακέτα άσων (αντί για μηδενικά ή τυχαία πακέτα) σε διάφορες ταχύτητες, οι θύρες του δε λαμβάνουν πάντα το πλήθος των bytes που αποστέλλονται σε αυτές. Θα μπορούσαν, λοιπόν, μελλοντικά να διερευνηθούν οι λόγοι και οι συνθήκες στις οποίες συμβαίνει απώλεια πακέτων.

6 Βιβλιογραφία

- [1] ΚΑΨΑΛΗΣ και ΤΡΑΚΑΔΑΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ, 2006.
- [2] «Interference Technology» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://interferencetechnology.com/emc-in-space/>.
- [3] «Wikipedia LVDS» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Low-voltage_differential_signaling.
- [4] «Wikipedia Electromagnetic Compatibility» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_compatibility.
- [5] «Wikipedia SpaceWire» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceWire>.
- [6] «Academy of EMC» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.academyofemc.com/emc-standards>.
- [7] «Wikipedia MIL-STD-461» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIL-STD-461>.
- [8] «Everyspec: MIL-STD-461G» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.everyspec.com>.
- [9] «Wikipedia Antenna Factor» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_factor.
- [10] «Unitest SMR4530» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.unitest.com/pdf/teseq/Teseq_SMR_4503__1267207642.pdf.
- [11] E.-E.-S.-5.-1.-R. W. Group, «SpaceWire- Links, nodes, routers and networks / Requirements & Standards Division».
- [12] «SpaceWire ESA» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://spacewire.esa.int/content/Standard/Draft_ECSS-E50-11.php.
- [13] «SpaceWire Conference» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://spacewire-conference.org/>.
- [14] «Wikipedia Anechoic Chamber» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Anechoic_chamber.
- [15] «Stone EMC» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://stone-emc.co.uk/2017/04/14/on-site-emc-testing-and-consultancy-north-west/>.
- [16] «Phys.org» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://phys.org/news/2018-11-image-radar-antenna-juice-spacecraft.html>.
- [17] «Teseq» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.teseq.com/en/products/CBL-6141.php>.

- [18] «Electro-metrics» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://electro-metrics.com/product/antenna-ridged-guide-em-6961-1-ghz-18-ghz/>.