



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας & τεχνολογίας υλικών

*Ανάπτυξη & Υλοποίηση Μετρητικής
Διάταξης για την Αξιολόγηση της
Μαγνητικής Συμπεριφοράς Ζεύξεων
“SpaceWire”*

Διπλωματική Εργασία

Αλέξανδρος Δ. Μπεχράκης Τριαντάφυλλος

Αλεξάνδρα Π. Μαυροπούλου

Επιβλέπων:

Καθ. Χρήστος Ν. Καψάλης

Αθήνα, Απρίλιος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας & τεχνολογίας υλικών

Ανάπτυξη & Υλοποίηση Μετρητικής Διάταξης για την Αξιολόγηση της Μαγνητικής Συμπεριφοράς Ζεύξεων "SpaceWire"

Διπλωματική Εργασία


Αλέξανδρος Δ. Μπεχράκης Τριαντάφυλλος

Αλεξάνδρα Π. Μαυροπούλου

Επιβλέπων:

Καθ. Χρήστος Ν. Καψάλης

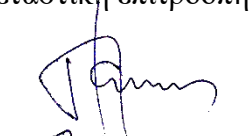
Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή



.....
Χ. Καψάλης

Χρήστος Καψάλης

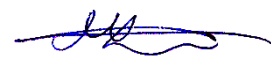
Καθηγητής ΕΜΠ



.....
Π. Κωττής

Παναγιώτης Κωττής

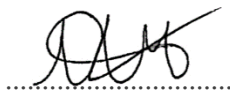
Καθηγητής ΕΜΠ



.....
Γ. Φικιώτης

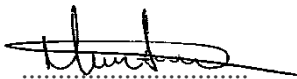
Γεώργιος Φικιώτης

Καθηγητής ΕΜΠ



Αλέξανδρος Δ. Μπεχράκης Τριαντάφυλλος

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



Αλεξάνδρα Π. Μαυροπούλου

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

Copyright © Αλέξανδρος Δ. Μπεχράκης Τριαντάφυλλος, 2018

Copyright © Αλεξάνδρα Π. Μαυροπούλου, 2018

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

Ένα αναπόσπαστο κομμάτι οποιασδήποτε διαστημικής αποστολής είναι το ενσύρματο δίκτυο που συνδέει τις μονάδες επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων καθώς και όλα τα υποσυστήματα της αποστολής. Η προτυποποίηση της μεθόδου διασύνδεσης των οργάνων αυτών, δηλαδή ο καθορισμός μεταξύ άλλων, της μεθόδου σχεδίασης και λειτουργίας των ενσύρματων ζεύξεων του διαστημικού σκάφους, είναι ο κυρίαρχος στόχος του πρωτοκόλλου SpaceWire. Η διαδεδομένη χρήση του πρωτοκόλλου αυτού έχει οδηγήσει στη μείωση του απαιτούμενου κόστους για νέες αποστολές, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ήδη ανεπτυγμένου εξοπλισμού. Παρόλα αυτά, λόγω της ευρείας εφαρμογής του, έχει αυξηθεί η ανάγκη αξιολόγησης της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς ενός τέτοιου δικτύου, στα πλαίσια της μελέτης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μιας διαστημικής αποστολής. Συγκεκριμένα, χρήζει μεγάλης σημασίας η εξακρίβωση πιθανών ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών που προκαλούνται από τη λειτουργία ενός δικτύου SpaceWire, προκειμένου να αξιολογηθεί η πιθανότητα πρόκλησης παρεμβολών σε μετρητικό εξοπλισμό ή ευαίσθητα όργανα ενός διαστημικού σκάφους. Με γνώμονα τα παραπάνω, μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφιερώνεται στην ανάπτυξη και υλοποίησης μιας διάταξης με στόχο τη μέτρηση των μαγνητικών εκπομπών μιας ζεύξης κατασκευασμένης σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μετρητική διάταξη πραγματοποιείται η ανάλυση των στατικών και χαμηλόσυχνων μαγνητικών εκπομπών που παράγονται από τη λειτουργία μιας τέτοιας ζεύξης, εναλλάσσοντας μερικά χαρακτηριστικά της μετάδοσης, στην προσπάθεια εύρεσης κάποιας σύνδεσης μεταξύ αυτών και του επιπέδου των παραγόμενων εκπομπών. Η ζεύξη που μελετάται, αποτελείται από ένα τμήμα κατάλληλου καλωδίου και έναν προσομοιωτή δικτύων SpaceWire. Για τη μέτρηση των εκπομπών της ζεύξης χρησιμοποιούνται δύο μαγνητόμετρα τύπου “fluxgate”, συνοδευόμενα από τον απαραίτητο εξοπλισμό για την τροφοδοσία τους και την ψηφιακοποίηση (digitization) των παραγόμενων σημάτων. Προτού παρουσιασθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων, γίνεται μια σύντομη ανάλυση μερικών μηχανισμών που μπορούν να οδηγήσουν σε μαγνητικές εκπομπές λόγω της λειτουργίας της ζεύξης καθώς και του πιθανού εύρους συχνοτήτων των εκπομπών αυτών. Εν τέλει, θα πραγματοποιηθεί εκτενής παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με σκοπό την αξιολόγηση της μαγνητικής συμπεριφοράς της ζεύξης και θα γίνουν κάποιες προτάσεις για μελλοντική ανάλυση.

Σημειώνεται ότι το παρακάτω ελληνικό κείμενο αποτελεί μία πιο συνοπτική απόδοση της πλήρους διπλωματικής εργασίας με τίτλο “**Development and**

Assembly of Measurement Setup for Assessing the Magnetic Behavior of SpaceWire Links” η οποία είναι γραμμένη στην αγγλική γλώσσα.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, Μετρήσεις Μαγνητικού πεδίου, Διαφορική σηματοδοσία χαμηλής τάσης - LVDS, SpaceWire

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας στον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Χρήστο Καψάλη, που ως επιβλέπων καθηγητής, μας έδωσε την ευκαιρία για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας στο εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα και σε ισάξιο βαθμό, τους μεταδιδακτορικούς ερευνητές Δρ. Χρήστο Νικολόπουλο και Δρ. Ανάργυρο Μπακλέζο, για την πολυτιμότερη καθοδήγησή τους, χωρίς την οποία η εργασία αυτή δεν θα ήταν εφικτό να υλοποιηθεί, καθώς και για τη γενικότερη υποστήριξη τους αυτό το διάστημα και την εμπιστοσύνη που μας έχουν δείξει.

Τέλος, οφείλουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ τόσο στον επιβλέποντα καθηγητή όσο και σε όσους καθηγητές και διδακτικό προσωπικό της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας, μας ενέπνευσαν με την επιστημονική τους κατάρτιση και το εκπαιδευτικό τους ήθος και μας μετέδωσαν ισχυρό ερευνητικό ενδιαφέρον για την επιστήμη του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού, στοιχείο το οποίο θα αποτελέσει σημαντικό οδηγό για τη χάραξη της μελλοντικής μας πορείας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
1. ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ “SPACEWIRE”	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ “SPACEWIRE”	9
i. Βασικές μονάδες επικοινωνίας.....	10
ii. Ανάκτηση του ρολογιού του πομπού.....	12
iii. Σηματοδοσία ζεύξης SpW	12
iv. Καλωδιακό συναρμολόγημα SpW	13
v. Θύρες SpW.....	16
2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ & ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	17
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	18
3. ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	19
i. Μαγνητόμετρα.....	19
ii. Μονάδες τροφοδοσίας ισχύος	20
iii. Μονάδα επίκτησης δεδομένων	21
iv. Προσομοιωτής δικτύων SpW “iSAFT”	22
v. Διάταξη τοποθέτησης του εξοπλισμού υπό δοκιμή	23
3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ & ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΔΙΔΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ	25
1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ Εκπομπής	25
i. Χωρητική Σύζευξη	25
ii. Επαγωγική σύζευξη.....	26
iii. Γείωση θωρακίσεων	27
iv. Εκπομπές προκαλούμενες από τους συνδέσμους.....	29
2. ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΔΙΔΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	30
i. Κυματομορφή του ρεύματος	30
ii. Φασματική ανάλυση του σήματος του ρεύματος	31
iii. Συσχέτιση αναμενόμενου στατικού πεδίου & κυματομορφής ρεύματος.....	34
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	36
1. ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ.....	37
2. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	39
3. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	45
ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53

1. Το πρωτόκολλο “SpaceWire”

1. Εισαγωγή

Η προτυποποίηση της μεθόδου διασύνδεσης συσκευών ή συστημάτων δύναται να προσφέρει πλήθος πλεονεκτημάτων στη διαστημική βιομηχανία. Αρχικά, καθιστά ήδη αναπτυγμένο εξοπλισμό συμβατό με κάθε νέα διαστημική αποστολή, γεγονός που μειώνει σημαντικά το κόστος νέων αποστολών, καθώς δεν απαιτείται να σχεδιαστεί εκ νέου κάθε χρησιμοποιούμενο όργανο. Επίσης, η χρήση ήδη αναπτυγμένου και ελεγμένου εξοπλισμού, αυξάνει την αξιοπιστία της αποστολής. Με γνώμονα τα παραπάνω, το 2003 έγινε η πρώτη προσπάθεια να αναπτυχθεί το πρωτόκολλο SpaceWire από την επιτροπή “European Cooperation for Space Standardization” της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA) [1]. Στόχος του πρωτοκόλλου αυτού είναι η προτυποποίηση των ζεύξεων, κόμβων, δρομολογητών και εν γένει των ενσώματων δικτύων που χρησιμοποιούνται στα διαστημικά οχήματα. Ύστερα από την πρώτη έκδοση του πρωτοκόλλου, πραγματοποιούνται συνεχείς προσπάθειες βελτιστοποίησής του με αποτέλεσμα δύο επανεκδόσεις του, το 2008 [2] και το 2019 [3]. Το πρωτόκολλο αυτό έχει έως σήμερα υιοθετηθεί από τις μεγαλύτερες διαστημικές υπηρεσίες και έχει αξιοποιηθεί σε μεγάλο πλήθος διαστημικών αποστολών.

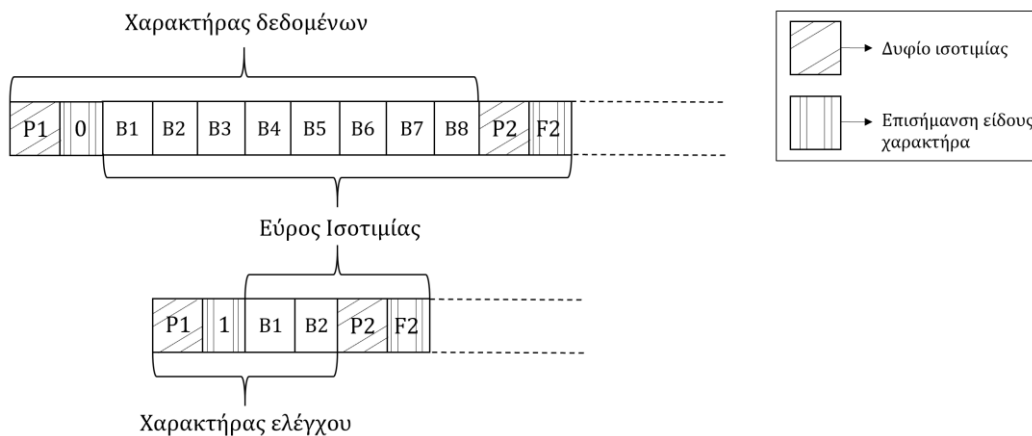
Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη των στατικών και χαμηλόσυχων μαγνητικών εκπομπών που προκαλούνται από τη λειτουργία μιας ενσώματης ζεύξης βασισμένης στο προαναφερθέν πρωτόκολλο, ή για συντομία μιας ζεύξης SpW (SpaceWire). Προκειμένου να εξυπηρετηθεί ο παραπάνω στόχος θα ακολουθήσει μια σύντομη παρουσίαση της τελευταίας έκδοσης του πρωτοκόλλου [3]. Στην ανασκόπηση αυτή θα δοθεί έμφαση μόνο στα σημεία που αφορούν τη μελέτη που θα ακολουθήσει και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να θεωρηθεί ως μια ολοκληρωμένη ανάλυση του πρωτοκόλλου.

2. Ανασκόπηση του πρωτοκόλλου “SpaceWire”

Αρχικά, μια ζεύξη SpW, αποτελεί μια δικατευθυντική, δισημειακή και αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων έτσι ώστε και οι δύο να μπορούν να λαμβάνουν και να εκπέμπουν ταυτόχρονα με ρυθμούς από 2 έως 400 Mbps.

i. Βασικές μονάδες επικοινωνίας

Η επικοινωνία μέσω μίας τέτοιας ζεύξης επιτυγχάνεται με χρήση δύο ειδών χαρακτήρων, τους χαρακτήρες δεδομένων (data characters) και τους χαρακτήρες ελέγχου (control characters). Οι χαρακτήρες δεδομένων αποτελούνται από δέκα δυφία (bit), ενώ οι χαρακτήρες ελέγχου από τέσσερα (Εικόνα 1-1). Σε κάθε περίπτωση, το πρώτο δυφίο αποτελεί επισήμανση του είδους του χαρακτήρα (Data/Control flag) και είναι 0 για τους χαρακτήρες δεδομένων και 1 για τους χαρακτήρες ελέγχου, ενώ το δεύτερο δυφίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση λαθών. Συγκεκριμένα, πρόκειται για δυφίο ισοτιμίας (parity bit) το οποίο δημιουργεί περιττή ισοτιμία μεταξύ του δυφίου επισήμανσης του παρόντος χαρακτήρα και των οκτώ ή δύο δυφίων του προηγούμενου χαρακτήρα δεδομένων ή ελέγχου αντίστοιχα.



Εικόνα 1-1. Χαρακτήρες ελέγχου / δεδομένων.

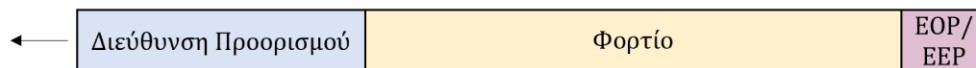
Στους χαρακτήρες δεδομένων, τα υπόλοιπα δυφία περιέχουν την πληροφορία προς μετάδοση, ενώ στους χαρακτήρες ελέγχου χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τα τέσσερα είδη τους, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-2**.



Εικόνα 1-2. Χαρακτήρες ελέγχου.

Με χρήση αυτών των δύο ειδών χαρακτήρων δημιουργούνται οι βασικές μονάδες που υλοποιούν τη μετάδοση μέσω μιας SpW ζεύξης. Ειδικότερα, οι μονάδες αυτές, οι οποίες θα αναλυθούν επιγραμματικά στη συνέχεια, είναι, τα πακέτα, οι κωδικοί ευρυεκπομπής, οι κωδικοί ελέγχου “NULL” καθώς και οι χαρακτήρες ελέγχου ροής FCTs (Flow Control Tokens).

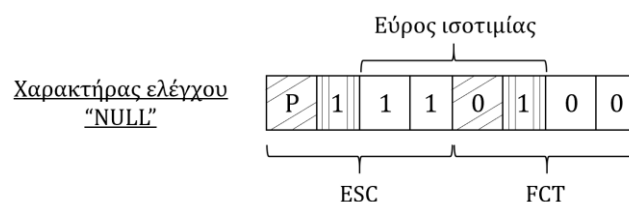
- **Πακέτα:** Το πακέτο είναι η μονάδα ανταλλαγής πληροφορίας και δομείται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 1-3**).



Εικόνα 1-3. Δομή πακέτου “SpaceWire”.

Ειδικότερα, αποτελείται από τη διεύθυνση προορισμού (Destination Address), η οποία χρησιμεύει για τη δρομολόγηση του πακέτου μέσα σε ένα δίκτυο, το φορτίο (Cargo) και έναν χαρακτήρα τερματισμού μεταξύ των EOP (end of packet) και EEP (error end of packet), που σηματοδοτούν τον λανθασμένο (EEP) ή μη (EOP) τερματισμό ενός πακέτου. Η διεύθυνση προορισμού και το φορτίο αποτελούνται από χαρακτήρες δεδομένων, ενώ οι χαρακτήρες τερματισμού είναι δύο από τους τέσσερις πιθανούς χαρακτήρες ελέγχου. Το σύνολο των χαρακτήρων που αποτελούν το πακέτο, δηλαδή οι χαρακτήρες δεδομένων και οι δύο αυτοί χαρακτήρες ελέγχου, ονομάζονται «κανονικοί» χαρακτήρες ή απλώς N-Chars (Normal Characters).

- **Κωδικοί Ευρυεκπομπής (Broadcast Codes):** Οι κωδικοί ευρυεκπομπής χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά σημάτων με υψηλή προτεραιότητα, σε όλους τους κόμβους ενός δικτύου SpW και η κωδικοποίησή τους είναι ο χαρακτήρας ελέγχου “ESC” ακολουθούμενος από έναν χαρακτήρα δεδομένων. Υπάρχουν δύο είδη τέτοιων κωδικών (time-codes, distributed interrupts), αλλά δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιούνται στην περίπτωση μιας απλής ζεύξης δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.
- **Κωδικοί ελέγχου “NULL”:** Ένας κωδικός ελέγχου “NULL” αποτελείται από τους διαδοχικούς χαρακτήρες ελέγχου ESC-FCT (**Εικόνα 1-4**) και χρησιμοποιείται για να διατηρεί τη ζεύξη ενεργή όταν δεν υπάρχουν άλλα δεδομένα προς αποστολή, καθώς και για την αρχικοποίησή της.



Εικόνα 1-4. Χαρακτήρας ελέγχου “NULL”.

- ο **Χαρακτήρας ελέγχου ροής "FCT"**: Ο χαρακτήρας "FCT", εκτός από τη συμμετοχή του σε κωδικούς ελέγχου, χρησιμοποιείται και σαν μονάδα ελέγχου ροής δεδομένων και συγκεκριμένα αποστέλλεται από το ένα άκρο της ζεύξης ώστε να «ενημερώσει» το άλλο άκρο ότι το πρώτο είναι έτοιμο να δεχθεί επιπλέον δεδομένα. Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη προκειμένου να αποφεύγεται η συμφόρηση σε ένα δίκτυο, ενώ στην περίπτωση μιας ζεύξης, προστατεύει τον δέκτη από υπερχειλίση.

Υπάρχει σαφής ιεραρχία αποστολής μεταξύ αυτών των τεσσάρων βασικών μονάδων επικοινωνίας σε ένα δίκτυο ή μια ζεύξη SpW που προκύπτει από τη σημαντικότητα κάθε λειτουργίας. Αναλυτικότερα, η σειρά προτεραιότητας από την υψηλότερη στη χαμηλότερη είναι, κωδικοί ευρυεκπομπής, χαρακτήρες ελέγχου ροής, «κανονικοί» χαρακτήρες και τέλος κωδικοί ελέγχου "NULL".

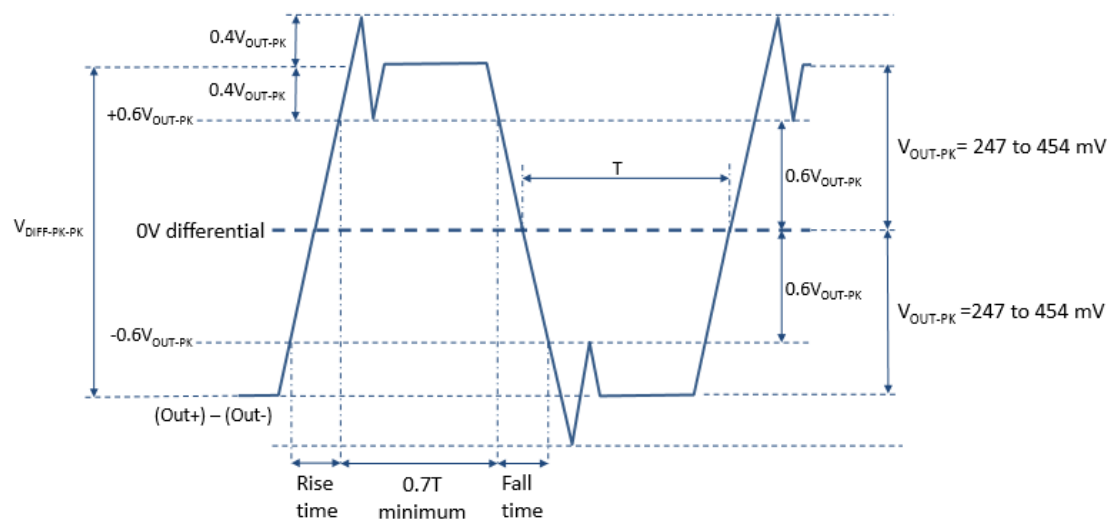
ii. Ανάκτηση του ρολογιού του πομπού

Προκειμένου να επιτευχθεί σωστά η αποκωδικοποίηση του σήματος πληροφορίας που λαμβάνει ο δέκτης, είναι απαραίτητο ο τελευταίος να συγχρονιστεί με τον πομπό. Για το λόγο αυτό, στο πρωτόκολλο SpaceWire χρησιμοποιείται το σχήμα κωδικοποίησης "Data-Strobe". Συγκεκριμένα, εκτός του σήματος πληροφορίας που περιέχει τα προς μετάδοση δεδομένα (data signal), αποστέλλεται ταυτόχρονα ένα ακόμα σήμα (strobe signal) στο οποίο κωδικοποιείται το ρολόι του πομπού. Τα σήματα που μεταδίδονται μέσω μιας ζεύξης SpW αποτελούνται από ψηφιακές ακολουθίες δυφίων όπου το λογικό 0 αντιστοιχίζεται σε χαμηλό επίπεδο τάσης ενώ το λογικό 1 σε υψηλό. Το σήμα «συγχρονισμού» (strobe signal) αλλάζει κατάσταση κάθε φορά που το επόμενο δυφίο του σήματος πληροφορίας (data signal) έχει ίδια τιμή με το προηγούμενο. Έτσι, το ρολόι του πομπού μπορεί να ανακτηθεί αν πραγματοποιηθεί μεταξύ των δύο σημάτων η λογική πράξη «αποκλειστικό η» (XOR).

iii. Σηματοδοσία ζεύξης SpW

Με στόχο να αυξηθεί η ατρωσία της ζεύξης έναντι σε εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο καθώς και να μειωθεί η αρνητική επίδραση πιθανών διακυμάνσεων μεταξύ των τοπικών τάσεων αναφοράς στα δύο άκρα της ζεύξης, για τη μετάδοση των σημάτων χρησιμοποιείται διαφορική σηματοδοσία. Συγκεκριμένα, η επιτυγχανόμενη ανοχή στον εξωτερικό θόρυβο, επιτρέπει τη χρήση χαμηλών επιπέδων τάσης για την αναπαράσταση των λογικών τιμών 0 και 1. Συνεπώς, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των σημάτων μεταξύ των δύο άκρων μιας ζεύξης είναι η «διαφορική σηματοδοσία χαμηλής τάσης» (LVDS), με μέγιστη διακύμανση της τάσης του διαφορικού σήματος περίπου 700 mV. Η χρήση χαμηλών τάσεων οδηγεί στην ανάπτυξη ρευμάτων χαμηλής έντασης, τα οποία με τη σειρά τους προκαλούν

ασθενείς εκπομπές μαγνητικού πεδίου. Οι τελευταίες μειώνονται περαιτέρω λόγω της διαφορικής σηματοδότησης, καθώς για κάθε σήμα αναπτύσσονται δύο ίσα και αντίθετα ρεύματα. Η μορφή ενός διαφορικού σήματος LVDS φαίνεται στην **Εικόνα 1-5**.



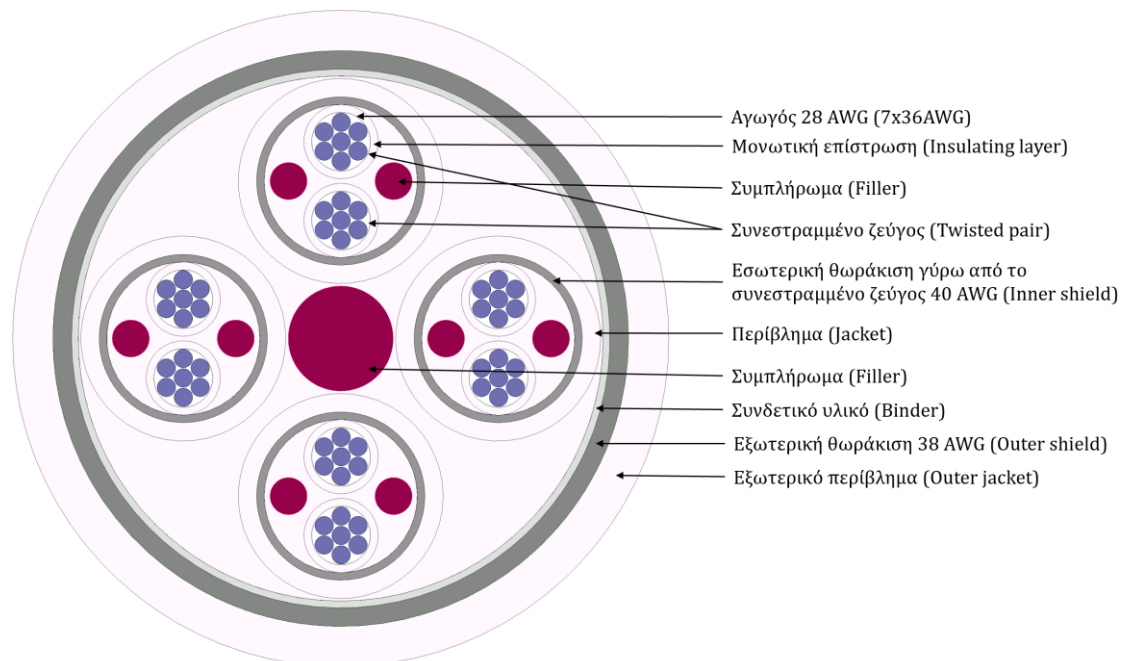
Εικόνα 1-5. Διαφορικό LVDS σήμα εξόδου πομπού [3].

iv. Καλωδιακό συναρμολόγημα SpW

Η διαφορική μετάδοση των σημάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση ζευγών καλωδίων. Μάλιστα, τα καλώδια κάθε ζεύγους συστρέφονται μεταξύ τους προκειμένου να μειωθούν περαιτέρω οι μαγνητικές εκπομπές τους. Δεδομένου ότι η ζεύξη SpW είναι δικατευθυντική και ότι για κάθε κατεύθυνση απαιτούνται δύο σήματα (σήμα πληροφορίας και σήμα «συγχρονισμού»), ένα καλώδιο SpW αποτελείται από τέσσερα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-6**.

Κάθε ένα από τα συνεστραμμένα ζεύγη περιβάλλεται από αγωγίμη πλεκτή θωράκιση και ένα πλαστικό περίβλημα. Στο σύνολό τους, τα τέσσερα αυτά ζεύγη συστρέφονται και μεταξύ τους και καλύπτονται από ακόμη μία πλεκτή αγωγίμη θωράκιση καθώς και ένα συνολικό πλαστικό περίβλημα. Οι αγωγίμες θωρακίσεις των επιμέρους συνεστραμμένων ζευγών δεν έρχονται σε επαφή μέσα στο καλώδιο. Τόσο σε κάθε ζεύγος, όσο και στο συνολικό καλώδιο χρησιμοποιούνται συμπληρώματα (fillers) εντός των θωρακίσεων ώστε η διάμετρος του συνολικού καλωδίου αλλά και των επιμέρους ζευγών να παραμένει αμετάβλητη. Έτσι, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου (αντίσταση ανά μονάδα μήκους) διατηρούνται όσο το δυνατό σταθερά κατά μήκος του. Η χρήση πλεκτών θωρακίσεων προσφέρει κάλυψη μεγαλύτερη από 90%, αλλά όχι πλήρη. Παρόλα αυτά, προτιμάται από τη χρήση θωράκισης πλήρους κάλυψης, καθώς προσφέρει πλήθος άλλων θεμιτών χαρακτηριστικών στο καλώδιο. Παραδείγματος χάριν, παρέχει ανοχή σε παραμορφώσεις καθώς

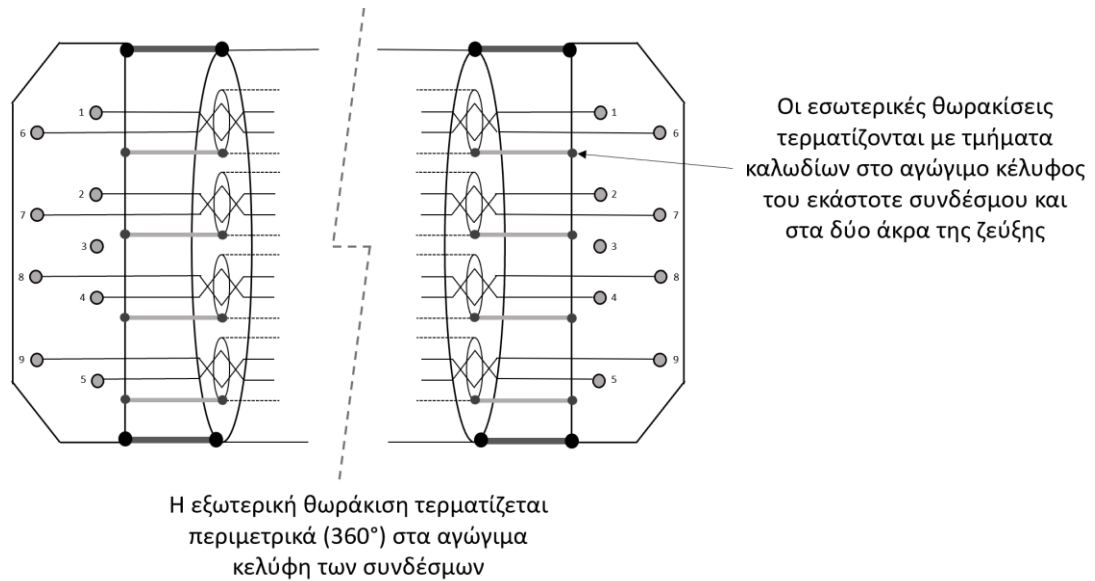
και τη δυνατότητα τερματισμού της εξωτερικής θωράκισης σε όλο το μήκος της περιμέτρου της (360° termination).



Εικόνα 1-6. Καλώδιο SpaceWire.

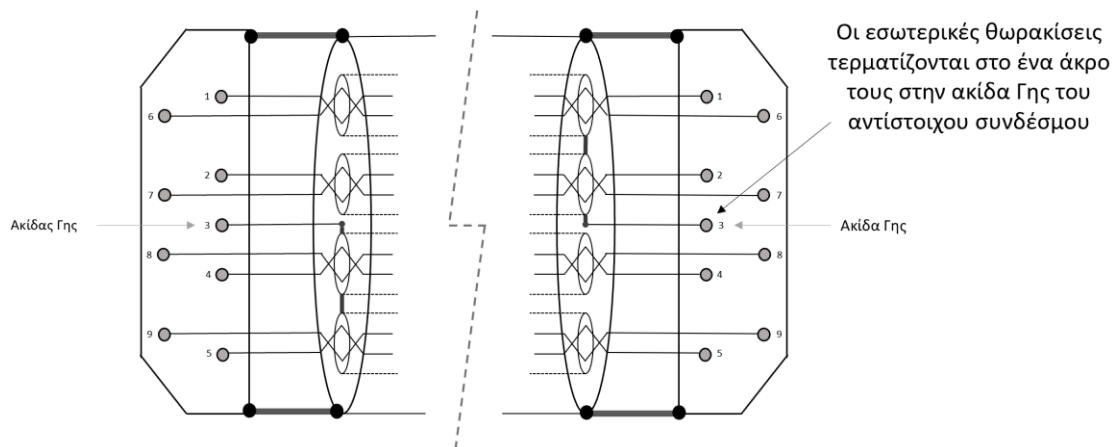
Προκειμένου να παραχθεί το καλωδιακό συναρμολόγημα (cable assembly), ένα μήκος καλωδίου συνδέεται με δύο συνδέσμους διεπαφής, εννέα επαφών έκαστος, στα δύο άκρα του. Σύνδεσμοι με θηλυκές επαφές χρησιμοποιούνται στον εξοπλισμό προς σύνδεση, ενώ με αρσενικές επαφές σε καλωδιακά συναρμολογήματα. Οκτώ από τις επαφές κάθε συνδέσμου χρησιμοποιούνται για να συνδεθούν οι αγωγοί των συνεστραμμένων ζευγών του καλωδίου, ενώ η ένατη επαφή χρησιμεύει σε κάποιες περιπτώσεις στον τερματισμό των εσωτερικών θωρακίσεων. Σε αυτό το σημείο θα τονισθεί μια τροποποίηση που σημειώθηκε στην τελευταία έκδοση του πρωτοκόλλου. Συγκεκριμένα, διαφοροποιήθηκε η μέθοδος τερματισμού των εσωτερικών θωρακίσεων ενός καλωδιακού συναρμολογήματος.

Η μέθοδος που προτείνεται έως την τελευταία έκδοση του πρωτοκόλλου επισημαίνεται ως τύπος AL ενώ η νέα μέθοδος ως τύπος A. Στην τελευταία, όλες οι εσωτερικές θωρακίσεις τερματίζονται και στα δύο άκρα της ζεύξης, στο αγωγίμο περίβλημα του εκάστοτε συνδέσμου, με καλώδια μικρού μήκους (rigtails). Το αγωγίμο αυτό περίβλημα συνδέεται με τη σειρά του στο αγωγίμο πλαίσιο του συνδεδεμένου οργάνου και εν συνεχεία μέσω αυτού στην τοπική αναφορά δυναμικού του αντίστοιχου άκρου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-7.



Εικόνα 1-7. Καλωδιακό συναρμολόγημα τύπου Α.

Σύμφωνα με τις παλαιότερες εκδόσεις του πρωτοκόλλου, η εσωτερική θωράκιση κάθε συνεστραμμένου ζεύγους, τερματίζεται μόνο σε ένα άκρο της ζεύξης, και συγκεκριμένα στο άκρο εκπομπής. Ο τερματισμός πραγματοποιείται στην επαφή 3 (ground pin), η οποία με τη σειρά της συνδέεται στην τοπική αναφορά δυναμικού μέσω του θηλυκού συνδέσμου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-8**.



Εικόνα 1-8. Καλωδιακό συναρμολόγημα τύπου AL

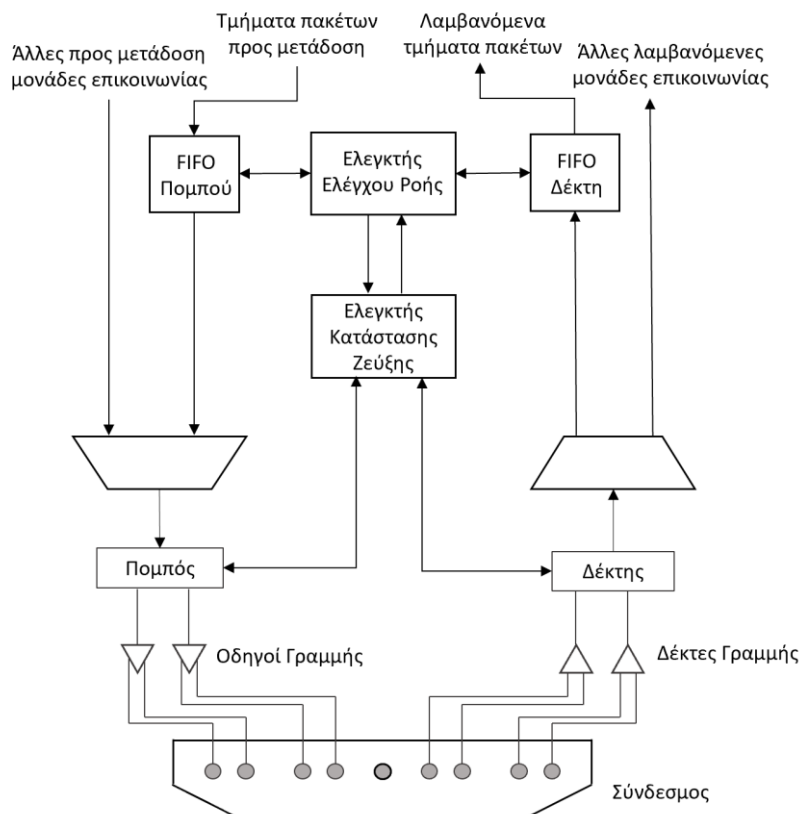
Η μέθοδος τερματισμού των αγωγίμων θωράξεων ενός καλωδίου δύναται να συνδράμει σημαντικά στην ατρωσία του έναντι σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή και θόρυβο. Επιπροσθέτως, ενδέχεται να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα στην ένταση των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών που προκαλούνται από τη λειτουργία του καλωδίου. Για το λόγο αυτό, τα καλωδιακά συναρμολογήματα τύπου Α και τύπου AL θα εξετασθούν περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο. Σε κάθε περίπτωση, η εξωτερική θωράκιση

τερματίζεται σε όλο το μήκος της περιμέτρου της και στα δύο άκρα της ζεύξης, στα αγωγίμα κελύφη των συνδέσμων.

v. Θύρες SpW

Για να ολοκληρωθεί η ανασκόπηση του πρωτοκόλλου πρέπει να παρουσιασθεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι μιας ζεύξης SpW που δεν είναι άλλο από τις θύρες (SpW ports). Η αρχιτεκτονική μιας θύρας βασισμένης στο πρωτόκολλο SpaceWire αποτυπώνεται στην **Εικόνα 1-9**.

Αρχικά, κάθε θύρα αποτελείται από δύο ζεύγη «οδηγών γραμμής» (line drivers) και «δεκτών γραμμής» (line receivers) καθώς επίσης και έναν πομπό και ένα δέκτη. Οι οδηγοί και δέκτες γραμμής πραγματοποιούν τη μετατροπή των σημάτων δεδομένων και συγχρονισμού (data - strobe) από μορφή δυοφορεύματος (bit stream) σε μορφή κατάλληλη προς μετάδοση στο διαύλο (LVDS) ή αντίστροφα. Αντίστοιχα, ο πομπός λαμβάνει τους προς μετάδοση χαρακτήρες και παράγει τα σήματα δεδομένων και συγχρονισμού, ενώ ο δέκτης πραγματοποιεί την αντίστροφη διαδικασία. Επίσης, κάθε θύρα περιέχει ένα ελεγκτή ροής καθώς και δύο δομές αποθήκευσης δεδομένων, συγκεκριμένα ουρές FIFO, μια προς χρήση από τον πομπό (TX FIFO) και μια από τον δέκτη (RX FIFO). Οι τελευταίες παίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο ροής πληροφορίας σε μία ζεύξη.



Εικόνα 1-9. Αρχιτεκτονική θύρας SpW.

2. Μετρητική διάταξη & Εξοπλισμός

Έχοντας ολοκληρώσει τη σύντομη ανασκόπηση του πρωτοκόλλου, στο επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση της διάταξης της ζεύξης και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.

1. Εισαγωγή

Αρχικά, προκειμένου να τονισθεί η αξία της μελέτης των μαγνητικών εκπομπών μια ζεύξης SpW, θα αναφερθεί η δυσκολία αλλά και η ανάγκη της επίτευξης μαγνητικής καθαρότητας σε μια διαστημική αποστολή. Μετρήσεις μαγνητικού πεδίου μπορούν να αξιοποιηθούν σε μεγάλο εύρος επιστημονικών πεδίων όπως η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ηλιακού ανέμου και της μαγνητόσφαιρας της Γης ή η μελέτη της εσωτερικής σύστασης πλανητών, και συνεπώς, απαιτούνται σε πλήθος αποστολών. Πολλές φορές, λόγω της απαιτούμενης ακρίβειας, δεν αρκεί η χρήση εξαιρετικά ευαίσθητου μετρητικού εξοπλισμού αλλά απαιτείται επίσης η εξάλειψη όλων των παρεμβολών που προέρχονται από το διαστημικό σκάφος στο σημείο όπου πραγματοποιείται η μέτρηση. Για το λόγο αυτό, επιλέγονται κατάλληλες τεχνικές σχεδίασης ώστε να μειώνονται τα επίπεδα εκπομπών από τη λειτουργία των συστημάτων του σκάφους και προστίθεται επιπλέον θωράκιση. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές, δεν αρκούν μόνο τα παραπάνω αλλά απαιτούνται επιπλέον τεχνικές για την επίτευξη της επιθυμητής μαγνητικής καθαρότητας. Συνήθως λοιπόν, ο αισθητήρας μαγνητικού πεδίου τοποθετείται στο άκρο ενός βραχίονα ώστε να αυξηθεί η απόσταση του από τις πηγές παρεμβολών και να μεγαλώσει όσο γίνεται ο λόγος σήματος προς παρεμβολή στις μετρήσεις. Σε περιπτώσεις που ακόμη και αυτό δεν επαρκεί, μια πολύ αποδοτική λύση, είναι η μοντελοποίηση των μαγνητικών εκπομπών όλων των συστημάτων που βρίσκονται στο διαστημικό σκάφος. Φυσικά αυτό απαιτεί πολύ μεγάλο πλήθος μετρήσεων τόσο για κάθε όργανο ξεχωριστά όσο και για τη συνύπαρξή τους στο σκάφος και τις περισσότερες φορές είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία. Παρόλα αυτά, αν κάτι τέτοιο επιτευχθεί, επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη του παρεμβάλλοντος μαγνητικού πεδίου στη θέση του αισθητήρα κάθε στιγμή και συνεπώς την πλήρη απαλοιφή του από τη μέτρηση. Μια άλλη λύση προς αυτή την κατεύθυνση ή οποία όμως απαιτεί πολύ λιγότερη πολυπλοκότητα προσφέροντας ωστόσο ικανοποιητικά αποτελέσματα, είναι ο καθορισμός ενός τρόπου λειτουργίας χαμηλών εκπομπών για όλα τα όργανα. Έτσι όταν απαιτούνται μετρήσεις μαγνητικού πεδίου μεγάλης ακρίβειας, όλα τα όργανα του διαστημικού σκάφους θα μπορούν να μεταβαίνουν σε μια κατάσταση λειτουργίας χαμηλών εκπομπών, αυξάνοντας το λόγο σήματος προς παρεμβολή στα μετρούμενα σήματα. Σύμφωνα με αυτό το σκεπτικό, ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των εκπομπών μιας

ζεύξης SpW και η εξακρίβωση κάποιας σχέσης του επιπέδου τους με τα χαρακτηριστικά της ζεύξης, αν κάτι τέτοιο είναι εφικτό. Με αυτό τον τρόπο, όταν απαιτούνται μετρήσεις μαγνητικού πεδίου μεγάλης ακρίβειας, μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά των ζεύξεων ενός διαστημικού σκάφους σε αυτά του χαμηλότερου επιπέδου εκπομπών, δύναται να μειωθεί το επίπεδο των παρεμβολών στο σημείο μέτρησης. Έχοντας καταστήσει σαφή τον λόγο πραγματοποίησης των μετρήσεων, παρακάτω θα αναλυθεί ο χρησιμοποιούμενος μετρητικό εξοπλισμός.

2. Μετρήσεις

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εσωτερικό ενός ημιανηχωικού θαλάμου. Ο θάλαμος αυτός είναι κατασκευασμένος στο εσωτερικό ενός κλωβού Faraday και έχει τα τοιχώματά του καλυμμένα με πλάκες φερριτή οι οποίες λόγω του σχήματός τους (πυραμιδοειδείς) αλλά και του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένες, απορροφούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με σκοπό την αποφυγή ανάπτυξης δευτερογενών πηγών που θα προέκυπταν λόγω ανακλάσεων. Το εύρος αποτελεσματικότητας της συγκεκριμένης δομής είναι σε αρκετά υψηλότερες συχνότητες από τις συχνότητες ενδιαφέροντος και συνεπώς δεν προσφέρει κάποια σημαντική θωράκιση από μαγνητικά πεδία στο φάσμα των μετρήσεων. Οι τεχνικές που θα μπορούσαν να πετύχουν κάτι τέτοιο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την ενεργή και την παθητική μαγνητική θωράκιση. Η ενεργή θωράκιση χρησιμοποιεί πηνία, όπως τα πηνία Helmholtz, για τη δημιουργία αντίθετου μαγνητικού πεδίου με αυτό του περιβάλλοντος, δημιουργώντας έτσι μια περιοχή «καθαρή» από εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Αντίθετα, η παθητική θωράκιση χρησιμοποιεί τις ιδιότητες ορισμένων μαγνητικών υλικών με σκοπό να θωρακίσει την περιοχή των μετρήσεων από εξωτερικές παρεμβολές.

Σε κάθε περίπτωση, οι τεχνικές αυτές είναι ιδιαίτερα υψηλού κόστους και απαιτούν εγκαταστάσεις διαφορετικές από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας. Συνεπώς, απαιτείται μια διαφορετική τεχνική προκειμένου να διαχωριστούν οι εκπομπές που προέρχονται από τη λειτουργία του μετρούμενου εξοπλισμού, από το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο (ambient magnetic field). Η τεχνική που επιλέχθηκε περιλαμβάνει την πραγματοποίηση δύο διαδοχικών μετρήσεων, μία με τη ζεύξη σε αναστολή και μία με τη ζεύξη σε λειτουργία. Έτσι, με σύγκριση των επιμέρους ζευγών μετρήσεων, διακρίνονται εύκολα οι περιοχές εκπομπών που προκύπτουν από τη λειτουργία της ζεύξης. Η τεχνική αυτή είναι αξιόπιστη διότι το περιβάλλον των μετρήσεων δεν περιέχει κάποια ταχέως μεταβαλλόμενη πηγή μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα, οι κύριες πηγές ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στο εύρος ζώνης των μετρήσεων είναι, το μαγνητικό πεδίο της Γης, το δίκτυο

ηλεκτροδότησης (50 Hz) καθώς και πιθανές συνιστώσες που προκύπτουν από τη λειτουργία του μετρητικού εξοπλισμού. Συνεπώς, το περιβάλλον πεδίο στο σύντομο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο επιμέρους μετρήσεων μπορεί να θεωρηθεί αμετάβλητο, καθιστώντας δυνατή την απομόνωση των εκπομπών μαγνητικού πεδίου που οφείλονται στη λειτουργία της ζεύξης.

3. Μετρητικός εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση των μετρήσεων αποτελείται από δύο μαγνητόμετρα τύπου “fluxgate”, δύο μονάδες τροφοδοσίας ισχύος καθώς και μία μονάδα επίκτησης δεδομένων (data acquisition unit - DAQ). Η λειτουργία καθενός οργάνου περιγράφεται σύντομα στη συνέχεια.

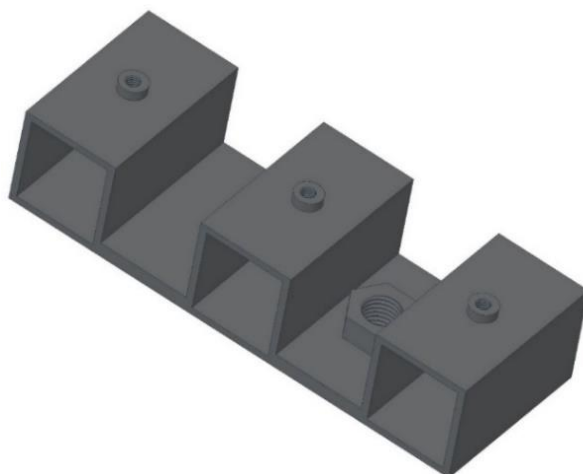
i. Μαγνητόμετρα

Για την υλοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιούνται δύο μαγνητόμετρα “Bartington Instrument Mag690” (Εικόνα 2-1) [4]. Κάθε ένα συνδυάζει τρεις αισθητήρες μαγνητικού πεδίου τύπου “fluxgate” σε ορθοκανονική διάταξη, παρέχοντας έτσι μια τρισδιάστατη απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο μέτρησης. Το ζωνικό εύρος ήμισυς ισχύος των αισθητήρων είναι μεγαλύτερο από 1.5 kHz, ενώ η περιοχή μέτρησης τους (measuring range) είναι $\pm 100\mu\text{T}$. Το κάθε μαγνητόμετρο απαιτεί τάση τροφοδοσίας $\pm 12\text{V}$ και επιστρέφει 3 αναλογικά σήματα καθένα εκ των οποίων αντιστοιχεί στο μαγνητικό πεδίο που μετράται σε έναν άξονα. Η μετρούμενη τιμή του στατικού πεδίου σε κάθε άξονα απέχει από την πραγματική τιμή του πεδίου λόγω ατελειών στην κατασκευή των αισθητήρων. Αυτή η απόκλιση κυμαίνεται στο εύρος $\pm 100\text{nT}$ και μπορεί να εξαλειφθεί με κατάλληλη βαθμονόμηση του αισθητήρα. Ωστόσο, λόγω της μεθόδου απαλοιφής του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διάταξη, κάτι τέτοιο δεν απαιτείται. Συγκεκριμένα, η συνιστώσα σφάλματος είναι σταθερή σε κάθε άξονα και εμφανίζεται και στη μέτρηση του θορύβου αλλά και στη μέτρηση με τη ζεύξη σε λειτουργία, επομένως στη σύγκριση των δύο μετρήσεων η συνιστώσα σφάλματος δεν έχει καμία επίδραση.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι προκειμένου να απαλειφθούν οι μετρήσεις από σφάλματα λόγω του ανθρώπινου παράγοντα καθώς και να εξασφαλισθεί η επαναληψιμότητα της διάταξης, η τοποθέτηση των μαγνητόμετρων πρέπει να είναι αυστηρά καθορισμένη. Για το λόγο αυτό έχει τυπωθεί, σε τρισδιάστατη μορφή, μια βάση ειδικά σχεδιασμένη για τα δύο αυτά μαγνητόμετρα (Εικόνα 2-2). Η βάση αυτή είναι πλαστική ώστε να μην επηρεάζει το προς μέτρηση πεδίο και προσφέρει τρεις δυνατές διατάξεις για ένα σύστημα δύο αισθητήρων.



Εικόνα 2-1. Αισθητήρας μαγνητικού πεδίου “Bartington Instruments Mag690”.



Εικόνα 2-2. Βάση μαγνητομέτρων.

ii. Μονάδες τροφοδοσίας ισχύος

Για την τροφοδοσία των μαγνητόμετρων χρησιμοποιούνται δύο συμβατές με αυτά μονάδες τροφοδοσίας ισχύος “Bartington Instrument PSU1” (Εικόνα 2-3) [5], με κάθε μια να συνδέεται σε ένα μαγνητόμετρο. Οι μονάδες τροφοδοσίας μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο δίκτυο ή να λειτουργούν με χρήση μπαταριών, με τη δεύτερη περίπτωση να μειώνει τον εσωτερικό τους θόρυβο. Σκοπός των μονάδων αυτών, δεν είναι μόνο να παρέχουν την απαιτούμενη τάση τροφοδοσίας στα μαγνητόμετρα, αλλά και να φιλτράρουν τα αναλογικά σήματα εξόδου τους. Ειδικότερα, το φιλτράρισμα που πραγματοποιούν, αποτελείται από ένα βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 9.5 kHz, καθώς και κατ’ επιλογήν από ένα υψηπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 0.1 Hz, που στην περίπτωση της παρούσας διάταξης απενεργοποιείται. Ύστερα από το φιλτράρισμά τους, κάθε μονάδα

τροφοδοσίας παρέχει τα τρία αναλογικά σήματα που αντιστοιχούν στη μέτρηση μαγνητικού πεδίου του κάθε άξονα στη μονάδα επίκτησης δεδομένων (data acquisition unit).



Εικόνα 2-3. Μονάδα τροφοδοσίας ισχύος “Bartington Instruments PSU1”.

iii. Μονάδα επίκτησης δεδομένων

Η μονάδα επίκτησης δεδομένων είναι μια αναπόσπαστη βαθμίδα των σύγχρονων μετρητικών διατάξεων καθώς είναι υπεύθυνη για την ψηφιακοποίηση των μετρούμενων αναλογικών σημάτων και εν συνεχεία τη μεταφορά τους σε κάποιο υπολογιστικό σύστημα για περαιτέρω επεξεργασία. Στην παρούσα διάταξη, χρησιμοποιείται η μονάδα “NI USB-6351” που κατασκευάζεται από την εταιρεία “National Instruments” (Εικόνα 2-4) [6].



Εικόνα 2-4. Μονάδα επίκτησης δεδομένων “NI USB-6351”.

Η μονάδα επίκτησης δεδομένων λαμβάνει συνολικά έξι αναλογικά σήματα από τις δύο μονάδες τροφοδοσίας τα οποία συνδέονται σε έξι αναλογικά κανάλια εισόδου. Οι τάσεις αναφοράς των αναλογικών σημάτων, οι οποίες αντιστοιχούν στις αγωγίμες θωρακίσεις των αντίστοιχων καλωδίων, συνδέονται ανά δύο σε ζεύγη σημάτων που αφορούν ίδιους άξονες σε

περιεχόμενο ωφέλιμου φορτίου, χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στην αποστολή δύο διαδοχικών πακέτων κ.α.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιούνται μόνο δύο θύρες της συσκευής, των οποίων ο ρυθμός μετάδοσης καθορίζεται κατά την ενεργοποίησή τους. Αφού ενεργοποιηθούν οι θύρες, ένα πακέτο τύπου “SpW” δημιουργείται για κάθε κατεύθυνση της ζεύξης με μέγεθος και περιεχόμενο ωφέλιμου φορτίου που ορίζεται ανάλογα τις ανάγκες της εκάστοτε μέτρησης. Στη συνέχεια, τα πακέτα αυτά τοποθετούνται στις αντίστοιχες ουρές προς αποστολή και με εντολή του χρήστη στέλνονται συνεχόμενα για όσο χρόνο χρειαστεί, έως ότου ο χρήστης διακόψει την αποστολή και λήψη δεδομένων. Το ωφέλιμο φορτίο ορίζεται από το χρήστη σε bytes καθώς χρησιμοποιείται για να παράξει χαρακτήρες δεδομένων, καθένας από τους οποίους περιέχει οκτώ δυφία δεδομένων (1 byte), ένα δυφίο ισοτιμίας καθώς και ένα δυφίο επισήμανσης, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

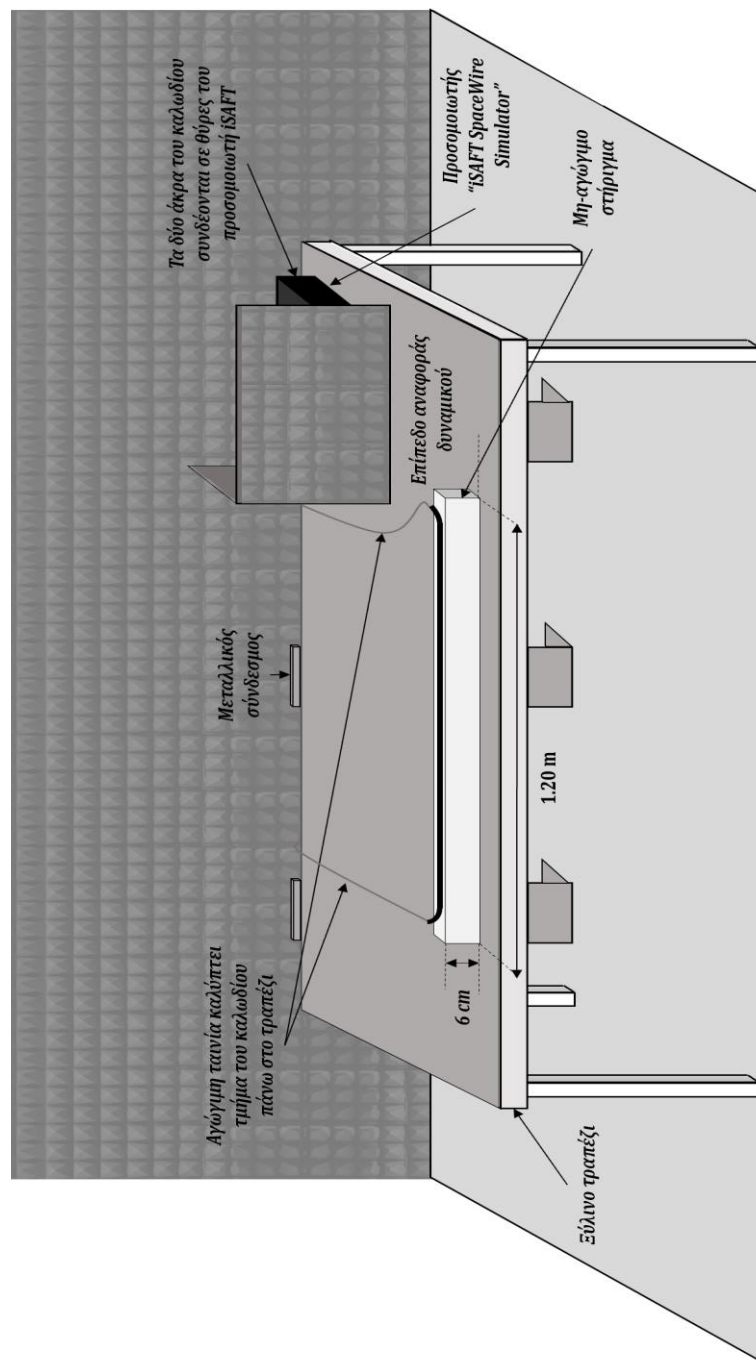
Αξίζει να αναφερθεί ότι ο προσομοιωτής αυτός προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας και αποστολής δύο ακόμα τύπων πακέτων τα οποία είναι συμβατά με το πρωτόκολλο SpW, τα CPTP [8] και RMAP [9]. Επιπλέον, επιτρέπει την παρακολούθηση και καταγραφή των στατιστικών της ζεύξης. Όμως, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, καμία από τις δύο τελευταίες δυνατότητες δεν θα χρησιμοποιηθεί.

v. **Διάταξη τοποθέτησης του εξοπλισμού υπό δοκιμή**

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθεί η διάταξη τοποθέτησης του εξοπλισμού υπό δοκιμή (EUT), εντός του ημιανηχικού θαλάμου (Εικόνα 2-6). Αρχικά, το τραπέζι στο οποίο είναι τοποθετημένος ο εξοπλισμός είναι ξύλινο με μία αγωγίμη επιφάνεια τοποθετημένη στο πάνω μέρος του. Η επιφάνεια αυτή δρα ως επίπεδο αναφοράς δυναμικού (ground plane) και είναι συνδεδεμένη μέσω μεταλλικών συνδέσμων με το πάτωμα του ημιανηχικού θαλάμου. Πάνω στο τραπέζι αυτό βρίσκεται το καλώδιο SpW, το οποίο αποτελείται από δύο μέρη, το γραμμικό μέρος και ένα μήκος καλωδίου που οδηγείται στις θύρες του προσομοιωτή δικτύων SpW “iSAFT”. Ενώ το γραμμικό μέρος είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα μη αγωγίμο στήριγμα (φελιζόλ), η υπόλοιπη έκταση του καλωδίου που βρίσκεται πάνω στο τραπέζι είναι καλυμμένη με αγωγίμη ταινία. Εκτός από το καλώδιο, πάνω στο τραπέζι είναι τοποθετημένος και ο προσομοιωτής “iSAFT”, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μη γραμμικό μήκος του καλωδίου που απαιτείται. Ο προσομοιωτής περιβάλλεται από μια αγωγίμη θωράκιση σε δύο πλευρές του (L-shaped shield) καθώς και επιπλέον φερίττες, ωστόσο η αποτελεσματικότητα των δύο παραπάνω στον μετριασμό στατικών και χαμηλόσυχων εκπομπών, είναι περιορισμένη. Επίσης, εντός του θαλάμου αλλά στη μέγιστη δυνατή απόσταση από τον εξοπλισμό υπό δοκιμή και τους αισθητήρες μέτρησης, είναι

τοποθετημένα τα τροφοδοτικά και η μονάδα επίκτησης δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διάταξη αυτή είναι κατασκευασμένη σύμφωνα με το πρωτόκολλο "MIL-STD-461G" [10] και κυρίως χρησιμοποιείται για μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου υψηλών συχνοτήτων.

Έχοντας παρουσιάσει τον χρησιμοποιούμενο μετρητικό εξοπλισμό και τη διάταξη της ζεύξης, στο επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούν κάποιοι φυσικοί μηχανισμοί που δύνανται να οδηγήσουν σε εκπομπές μαγνητικού πεδίου σε μια ζεύξη SpW.



Εικόνα 2-6. Διάταξη εξοπλισμού υπό δοκιμή [11].

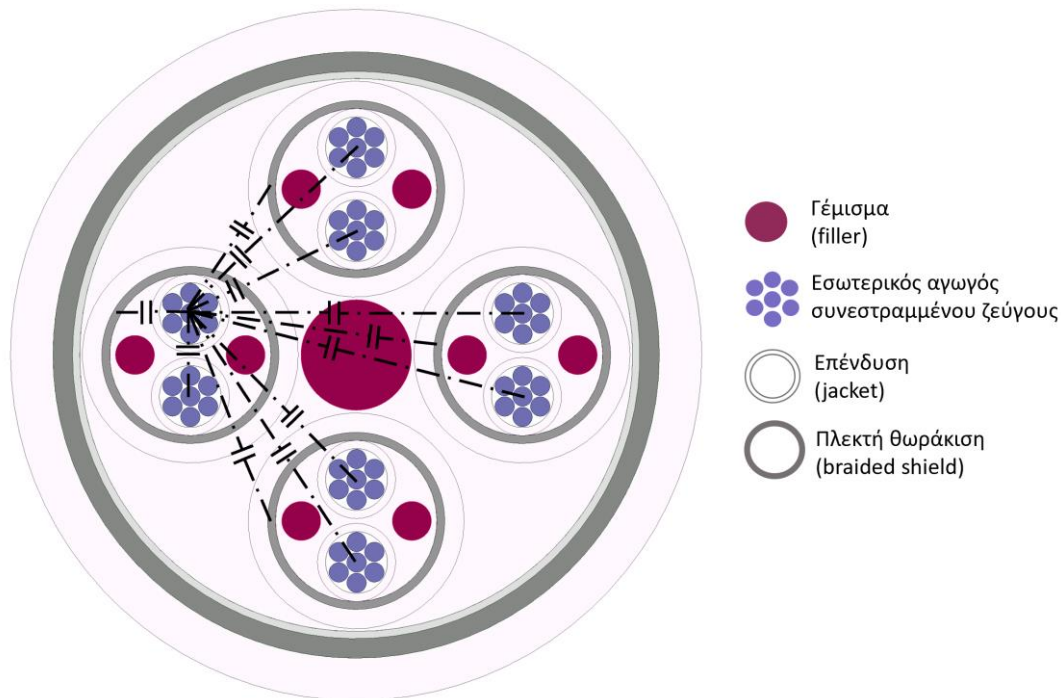
3. Μηχανισμοί εκπομπής & Φασματική ανάλυση μεταδιδόμενου σήματος

Οι χαμηλόσυχνες μαγνητικές εκπομπές που η προαναφερθείσα διάταξη στοχεύει να μετρήσει μπορούν να αποδοθούν, μεταξύ άλλων, σε ρεύματα που ρέουν στις αγώγιμες θωρακίσεις του καλωδίου. Τα ρεύματα αυτά επάγονται στις θωρακίσεις μέσω ποικίλων μηχανισμών σύζευξης μεταξύ των τελευταίων και των ρευματοφόρων συνεστραμμένων ζευγών. Οι μηχανισμοί αυτοί, σε συνδυασμό με τη συνεισφορά της μεθόδου τερματισμού των θωρακίσεων, θα εξετασθούν διεξοδικά σε αυτό το κεφάλαιο. Επιπλέον θα γίνει μια σύντομη ανάλυση των φασματικών συνιστωσών των σημάτων ρεύματος που ρέουν στα συνεστραμμένα ζεύγη, προκειμένου να αποδειχθεί η δυνατότητα ανάπτυξης χαμηλόσυχνων ρευμάτων στις εξωτερικές θωρακίσεις.

1. Μηχανισμοί Εκπομπής

i. Χωρητική Σύζευξη

Η ύπαρξη πλήθους αγωγών εντός του καλωδίου SpW οδηγεί στην ανάπτυξη χωρητικότητας μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3-1**.



Εικόνα 3-1. Χωρητικότητες μεταξύ ενός ρευματοφόρου αγωγού και όλων των υπόλοιπων αγώγιμων τμημάτων του καλωδίου.

Η δημιουργία χωρητικότητας μεταξύ των αγωγών εντός και εκτός των θωρακίσεων οφείλεται στη χρήση θωρακίσεων πλεκτού τύπου, οι οποίες αν και δεν προσφέρουν 100% κάλυψη στους εσωτερικούς αγωγούς, επιλέγονται λόγω πλήθους άλλων θετικών χαρακτηριστικών που προσφέρουν στο καλώδιο. Προκειμένου να μειωθεί η επαγωγή θορύβου, από εξωτερική της θωράκισης πηγή, στους ρευματοφόρους αγωγούς λόγω χωρητικής σύζευξης, οι θωρακίσεις πρέπει να συνδέονται στη γείωση. [12].

ii. Επαγωγική σύζευξη

Αντίστοιχα με την ανάπτυξη χωρητικότητας, μεταξύ των αγωγών που εμπεριέχονται σε ένα καλώδιο αναπτύσσονται και φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής. Η χρήση αγωγίμων θωρακίσεων δεν μπορεί να αποτρέψει την επαγωγή ρευμάτων από κάποια εξωτερική του καλωδίου ρευματική πηγή, στα συνεστραμμένα ζεύγη. Για το λόγο αυτό, αποδεικνύεται ότι είναι προτιμότερο να επιτρέπεται η ροή ρεύματος στις αγωγίμες θωρακίσεις, συνδέοντας τες στη γείωση και στα δύο άκρα του καλωδίου. Με αυτό τον τρόπο, μια εξωτερική του καλωδίου ρευματική πηγή, επάγει ρεύματα τόσο στην αγωγίμη θωράκιση όσο και στο αντίστοιχο συνεστραμμένο ζεύγος. Το ρεύμα που επάγεται στην αγωγίμη θωράκιση, οδηγεί στην εκ νέου επαγωγή ενός ρεύματος στο συνεστραμμένο ζεύγος, το οποίο μάλιστα είναι αντίθετο του απευθείας επαγόμενου ρεύματος από την εξωτερική ρευματική πηγή, μειώνοντας έτσι τον συνολικό επαγόμενο θόρυβο. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει για συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας αποκοπής (cut-off frequency) της αγωγίμης θωράκισης, η οποία εξαρτάται από το υλικό και το είδος της τελευταίας. Για τον παραπάνω λόγο, καθώς και για να καλύπτει όλους τους αγωγούς εντός του καλωδίου, η εξωτερική θωράκιση τερματίζεται και στα δύο άκρα της, περιμετρικά (360°), στο αγωγίμο κέλυφος του κάθε συνδέσμου και γειώνεται μέσω αυτού, δημιουργώντας έτσι ένα βρόγχο γης. Συνεπώς, κατά τη λειτουργία της ζεύξης, αναπτύσσονται επαγωγικές συζεύξεις μεταξύ των συνεστραμμένων ζευγών και της εξωτερικής θωράκισης του καλωδίου, καθώς η τελευταία αποτελεί τμήμα ενός κλειστού βρόγχου [12].

Η τιμή της αλληλεπαγωγής μεταξύ δύο αγωγών, εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη σχετική τους θέση καθώς και από το μέσο που παρεμβάλλεται μεταξύ τους. Στην περίπτωση του καλωδίου SpW, η συστροφή των ζευγών καλωδίων καθώς και η συστροφή των τεσσάρων συνεστραμμένων ζευγών αυξάνει ιδιαίτερα την πολυπλοκότητα υπολογισμού των αντίστοιχων αλληλεπαγωγών. Παρόλα αυτά, λόγω της διαφορετικής τους γεωμετρίας, είναι σαφές ότι οι τιμές των αλληλεπαγωγών μεταξύ του κάθε αγωγού ενός συνεστραμμένου ζεύγους και της εξωτερικής θωράκισης, διαφέρουν. Επιπλέον, αν και θεωρητικά τα ρεύματα που ρέουν στους δύο αγωγούς ενός συνεστραμμένου ζεύγους έχουν ίδιο μέτρο και αντίθετη φορά, στην πράξη είτε

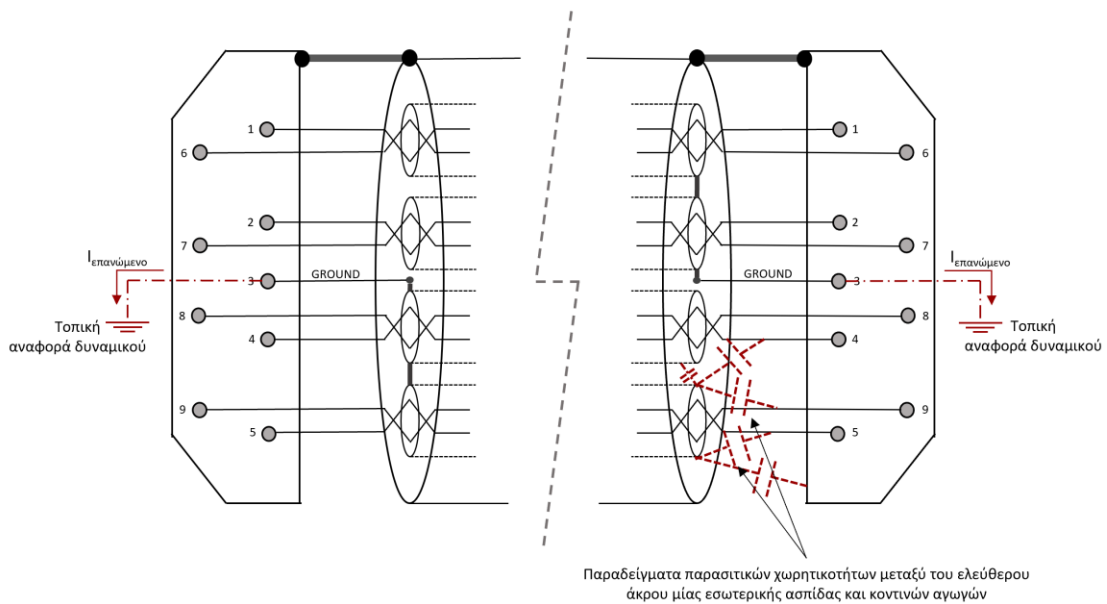
λόγω θερμικών απωλειών στην αντίσταση τερματισμού ή απωλειών μετάδοσης εντός του καλωδίου, το μέτρο τους δεν είναι ακριβώς ίδιο. Για τους δύο παραπάνω λόγους γίνεται αντιληπτό ότι το συνολικό ρεύμα που επάγεται στην εξωτερική θωράκιση λόγω της μετάδοσης σε ένα συνεστραμμένο ζεύγος, δεν είναι μηδενικό.

iii. Γείωση θωρακίσεων

Η σύνδεση των αγωγίμων θωρακίσεων στην αναφορά δυναμικού μπορεί να γίνει είτε μέσω του αγωγίμου περιβλήματος του συνδεδεμένου οργάνου είτε μέσω κάποιας ακίδας γης (ground pin) του αντίστοιχου συνδέσμου. Στις διαστημικές αποστολές, ως γείωση χρησιμοποιείται το αγωγίμο κέλυφος του διαστημικού οχήματος λόγω του αριθμού ελευθέρων φορέων που διαθέτει. Τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα όργανα σε μια αποστολή, περιβάλλονται από ένα αγωγίμο περίβλημα το οποίο συνδέεται στο αγωγίμο κέλυφος του σκάφους και λειτουργεί ως κλωβός Faraday προκειμένου να προστατέψει τα ηλεκτρονικά κυκλώματα εντός του κλωβού από υψίσυχνες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τυχόν ρεύματα που οδηγούνται στη αναφορά δυναμικού μέσω του αγωγίμου περιβλήματος ενός οργάνου, δύνανται να προκαλέσουν διακυμάνσεις στο δυναμικό του σημείου σύνδεσης. Για να αποφευχθούν παρεμβολές σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, πολλές φορές, οι τοπικές αναφορές δυναμικού των εσωτερικών κυκλωμάτων συνδέονται σε διαφορετικό σημείο του αγωγίμου κελύφους του σκάφους, από αυτό στο οποίο συνδέεται το αντίστοιχο αγωγίμο περίβλημα [13].

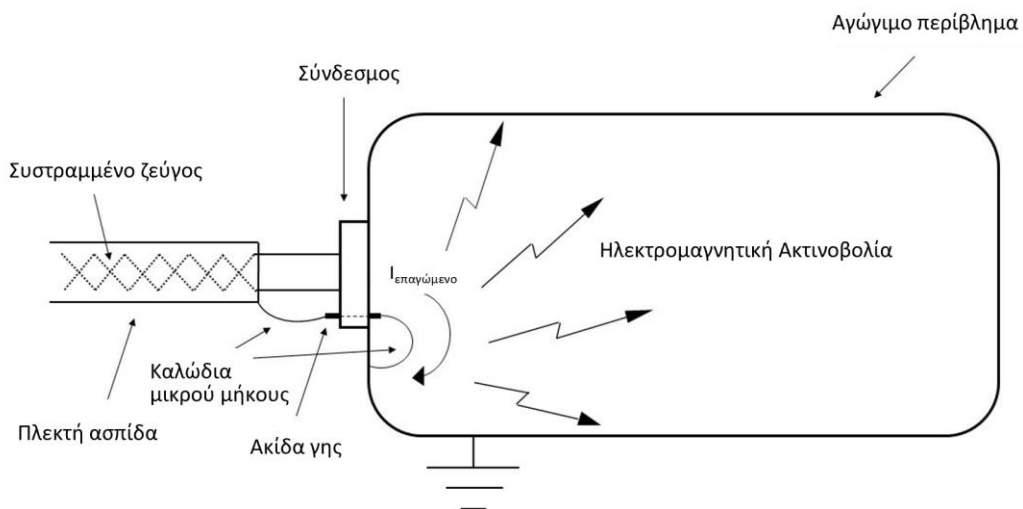
Σύγκριση μεταξύ των καλωδιακών συναρμολογημάτων τύπου A και AL

Με βάση τα παραπάνω θα γίνει μια συνοπτική σύγκριση της μεθόδου τερματισμού των εσωτερικών θωρακίσεων μεταξύ των καλωδιακών συναρμολογημάτων τύπου A [3] και AL [2] και θα σχολιαστούν κάποια μειονεκτήματα της δεύτερης. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.2.iv, ο τερματισμός των εσωτερικών θωρακίσεων σε καλωδιακά συναρμολογήματα τύπου AL πραγματοποιείται σε κατάλληλη ακίδα γης στο ένα άκρο της ζεύξης (Εικόνα 3-2). Αυτό, αν και αποτρέπει τη δημιουργία κλειστού βρόγχου, οδηγεί όσα φορτία ρέουν στις εσωτερικές θωρακίσεις, στην τοπική αναφορά δυναμικού της εκάστοτε θύρας αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα διακυμάνσεων του δυναμικού αναφοράς και επομένως την πιθανότητα πρόκλησης παρεμβολών. Επίσης, η σύνδεση της θωράκισης σε ένα μόνο άκρο, ουσιαστικά δημιουργεί μια κεραία ιδιαίτερα αποδοτική σε συγκεκριμένες συχνότητες ανάλογα με το μήκος του καλωδίου. Σχετικά με το μη συνδεδεμένο άκρο της θωράκισης, αναπόφευκτα αναπτύσσει παρασιτικές χωρητικότητες με κοντινούς αγωγούς, οι οποίες μάλιστα μπορούν να δημιουργήσουν διαδρομές για ρεύματα υψηλών συχνοτήτων τα οποία δύνανται να προκαλέσουν παρεμβολές στους κοντινούς ρευματοφόρους αγωγούς.



Εικόνα 3-2. Καλωδιακό συναρμολόγημα τύπου AL.

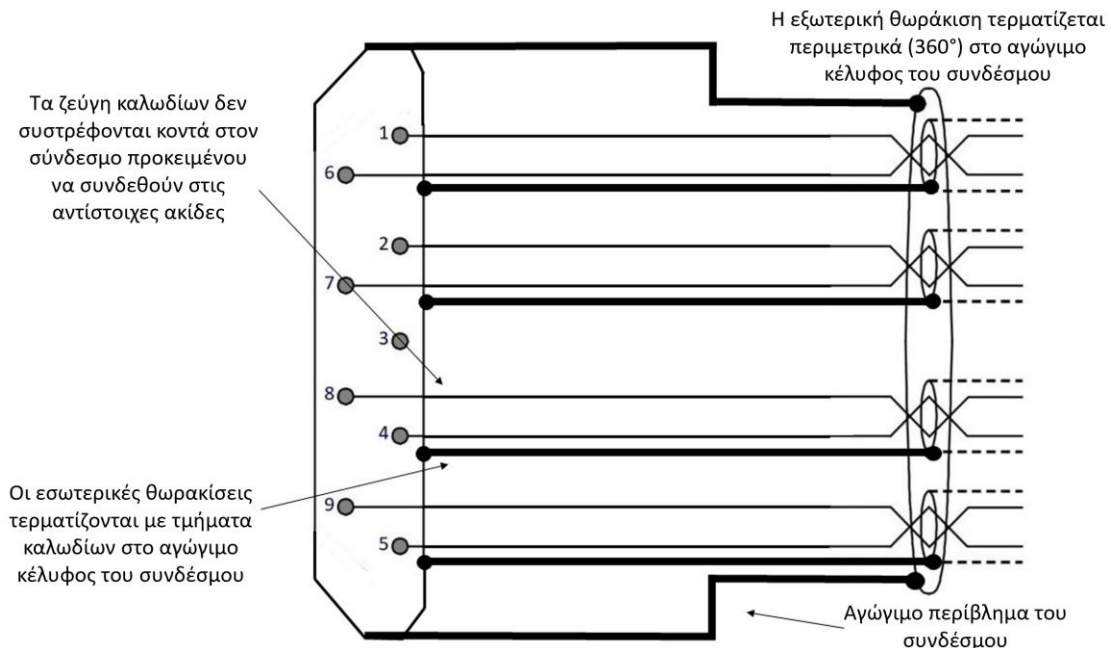
Ένα ακόμη αρνητικό της χρήσης ακίδας γης για τον τερματισμό μιας θωράκισης, είναι η πιθανή ρήξη του αγωγίμου περιβλήματος του συνδεδεμένου οργάνου. Συγκεκριμένα, αν χρησιμοποιηθεί τμήμα καλωδίου για τη σύνδεση της ακίδας γης στην τοπική αναφορά δυναμικού, το ρεύμα που ρέει στη θωράκιση θα οδηγηθεί μέσω αυτού του καλωδίου στο εσωτερικό του μεταλλικού περιβλήματος, αχρηστεύοντας τη λειτουργία του τελευταίου ως κλώβος Faraday, καθώς το τμήμα καλωδίου θα λειτουργήσει σαν πηγή παρεμβολών για τα εσωτερικά ηλεκτρονικά κυκλώματα (**Εικόνα 3-3**).



Εικόνα 3-3. Απεικόνιση ρήξης του αγωγίμου περιβλήματος συνδεδεμένου οργάνου, λόγω χρήσης ακίδας γης για τη γείωση της εσωτερικής θωράκισης.

iv. Εκπομπές προκαλούμενες από τους συνδέσμους

Πέρα από τα επαγόμενα ρεύματα στην εξωτερική θωράκιση, μαγνητικές εκπομπές μπορεί να οφείλονται και σε άλλα τμήματα του καλωδιακού συναρμολογήματος όπως είναι ο σύνδεσμος, λόγω της κατασκευής του. Συγκεκριμένα, στον σύνδεσμο απαιτείται να πραγματοποιηθούν οι τερματισμοί των εσωτερικών θωρακίσεων καθώς και των συνεστραμμένων ζευγών. Ενώ η εξωτερική θωράκιση του καλωδίου τερματίζεται περιμετρικά (360°), οι εσωτερικές θωρακίσεις πρέπει να τερματιστούν με τμήματα καλωδίων είτε στο αγωγίμο κέλυφος του συνδέσμου είτε στην ακίδα γης. Επίσης, τα ζεύγη καλωδίων δεν πρέπει να είναι συνεστραμμένα κοντά στον σύνδεσμο, προκειμένου ο κάθε αγωγός να συνδεθεί στην κατάλληλη ακίδα. Τα δύο παραπάνω, δηλαδή η απουσία εσωτερικής θωράκισης καθώς και η μη συστροφή των ζευγών καλωδίων, οδηγούν σε αυξημένες εκπομπές στην περιοχή του συνδέσμου. Αυτό ενδέχεται να είναι περισσότερο εμφανές σε καλωδιακά συναρμολογήματα τύπου A καθώς σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται το πλήθος των ρευματοφόρων αγωγών εντός της αγωγίμης κοιλότητας που διαμορφώνεται στην περιοχή του συνδέσμου (Εικόνα 3-4).



Εικόνα 3-4. Σύνδεση καλωδίου τύπου A στο σύνδεσμο.

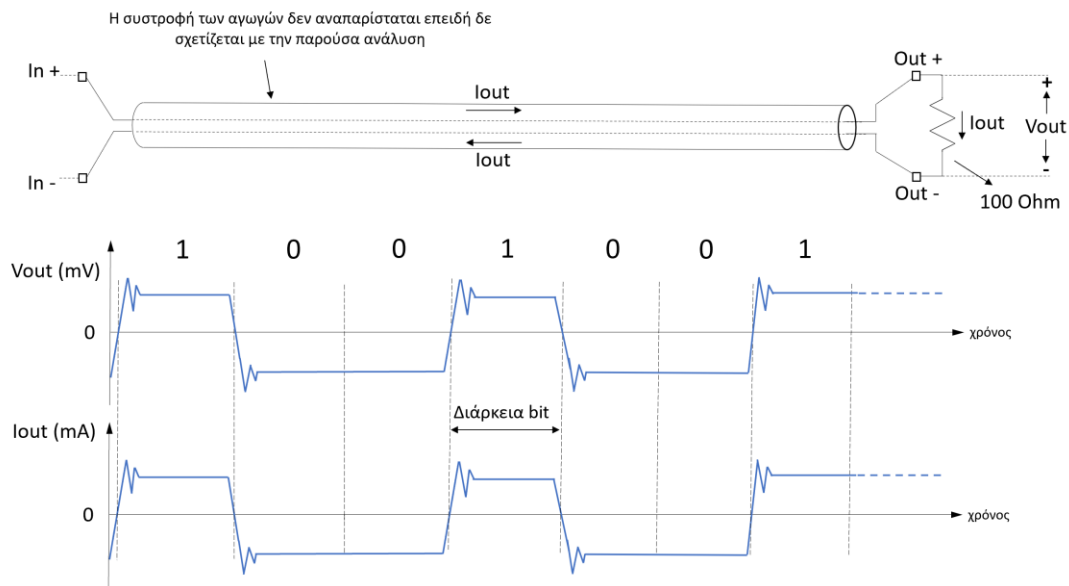
2. Φασματική Ανάλυση μεταδιδόμενου σήματος

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει κάποιους από τους μηχανισμούς με τους οποίους δύνανται να αναπτυχθούν εκπομπές εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου από τη λειτουργία μιας ζεύξης κατασκευασμένης σύμφωνα με το πρωτόκολλο SpW. Εντούτοις, δεν αναφέρεται καθόλου στο εύρος συχνοτήτων των εκπομπών αυτών. Επομένως, για να αποδειχθεί η σημαντικότητα της επισκόπησης των μαγνητικών εκπομπών που εμφανίζονται σε συχνότητες μικρότερες του 1.5 kHz, αρκεί να αποδειχθεί η δυνατότητα εμφάνισης χαμηλόσυχων συνιστωσών στα ρεύματα των συνεστραμμένων ζευγών. Για το λόγο αυτό, παρακάτω θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη ανάλυση του φασματικού περιεχομένου των ρευμάτων που ρέουν στα συνεστραμμένα ζεύγη. Για να είναι ολοκληρωμένη μια τέτοια ανάλυση θα έπρεπε να περιλαμβάνει τα ρεύματα και από τα τέσσερα συνεστραμμένα ζεύγη της ζεύξης SpW, κάτι που πέρα από πολύπλοκο δεν είναι και πρακτικό. Συγκεκριμένα, δεν έχει ιδιαίτερη αξία να υπολογιστεί ακριβώς το φασματικό περιεχόμενο των τεσσάρων σημάτων ρεύματος για μια συγκεκριμένη μετάδοση, δηλαδή για συγκεκριμένο μεταδιδόμενο φορτίο. Θεωρείται πιο σημαντικό να γίνει μια ενδεικτική ανάλυση με άγνωστο το προς μετάδοση δυφίορρευμα (bit stream), προκειμένου να εξηγηθεί γιατί είναι αναπόφευκτο να αναπτυχθούν φασματικές συνιστώσες σε συχνότητες μικρότερες του 1.5 kHz στο σήμα των ρευμάτων και συνεπώς να φανεί η αξία της πραγματοποίησης των μετρήσεων.

i. Κυματομορφή του ρεύματος

Με γνώμονα τα παραπάνω, αρχικά θα πρέπει να εξετασθεί η μορφή του σήματος του ρεύματος σε ένα συνεστραμμένο ζεύγος κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Στην περίπτωση ενός καλωδιακού συναρμολογήματος τύπου SpW, κάθε συνεστραμμένο ζεύγος τερματίζεται με μια αντίσταση 100Ω και το σήμα εξόδου λαμβάνεται διαφορικά μεταξύ των άκρων της. Η DC τάση κοινού σήματος στα δύο άκρα είναι ίδια και όταν το διαφορικό σήμα, μεταξύ του «θετικού» και του «αρνητικού» άκρου, είναι μεγαλύτερο από 100mV θεωρείται ότι έχει ληφθεί άσος, ενώ όταν είναι μικρότερο από -100mV θεωρείται ότι έχει ληφθεί μηδέν. Η κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση, άρα και το διαφορικό ζεύγος, είναι όμοια με αυτή της τάσης στα άκρα της αλλά με διαφορετικά πλάτη. Επομένως, η κυματομορφή του ρεύματος είναι μια “NRZ”¹ παλμοσειρά, η οποία σχετίζεται με τη μεταδιδόμενη ψηφιοσειρά όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3-5**.

¹ NRZ (Non-return to zero) → μη επιστροφή στο μηδέν



Εικόνα 3-5. Κυματομορφή ρεύματος και τάσης εξόδου, ανάλογα το προς μετάδοση δυφίορρευμα.

ii. Φασματική ανάλυση του σήματος του ρεύματος

Έχοντας παρουσιάσει τη μορφή του ρεύματος ως μια παλμοσειρά NRZ, είναι σαφές ότι τυχόν επαναλαμβανόμενα μοτίβα στο μεταδιδόμενο δυφίορρευμα, οδηγούν σε επαναλαμβανόμενα μοτίβα στο σήμα του ρεύματος. Αν το σήμα του ρεύματος αναλυθεί σε επαλληλία όλων αυτών των επαναλαμβανόμενων σημάτων, τότε μπορεί να υπολογισθεί το φάσμα του αθροίζοντας όλα τα φάσματα των επιμέρους περιοδικών σημάτων. Σύμφωνα με την ανάλυση Fourier, το φάσμα ενός οποιουδήποτε περιοδικού σήματος $x(t)$ με περίοδο T , ανεξαρτήτως της μορφής του, αποτελείται από μια φασματική συνιστώσα στη μηδενική συχνότητα και άπειρες συνιστώσες, στην ονομαστική του συχνότητα f_0 και τις αρμονικές της (θετικές και αρνητικές), όπως απεικονίζεται στις σχέσεις 3.1 έως 3.4.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{jn2\pi f_0 t} \quad [3.1]$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) e^{-jn2\pi f_0 t} dt \quad [3.2]$$

$$c_{-n} = c_n^* \quad [3.3]$$

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) dt \quad [3.4]$$

Οι συντελεστές της μιγαδικής εκθετικής σειράς Fourier, c_n , είναι εν γένει μιγαδικοί αριθμοί ενώ ο συντελεστής c_0 είναι πραγματικός αριθμός και ισούται με τη μέση τιμή μίας περιόδου του σήματος $x(t)$. Σύμφωνα με τις παραπάνω

σχέσεις προκύπτει και η μονόπλευρη τριγωνομετρική μορφή της σειράς Fourier (σχέση 3.5) που εκφράζει το μονόπλευρο φάσμα του σήματος $x(t)$.

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} 2|c_n| \cos(n2\pi f_0 t + \angle c_n) \quad [3.5]$$

Επομένως, για να εμφανιστούν φασματικές συνιστώσες στις συχνότητες ενδιαφέροντος, αρκεί να προκύψουν επαναλαμβανόμενα μοτίβα με ονομαστικές συχνότητες μικρότερες από 1.5 kHz στο σήμα του ρεύματος. Στη γενική περίπτωση που η μεταδιδόμενη ροή δυφίων είναι τυχαία, είναι σχεδόν βέβαιο ότι τέτοιες φασματικές συνιστώσες θα εμφανιστούν ακόμη και αν οι ακριβείς συχνότητες εμφάνισής τους δεν μπορούν να υπολογιστούν.

Η ένταση των παραγόμενων εκπομπών εξαρτάται άμεσα από το πλάτος των αντιστοιχών φασματικών συνιστωσών. Τα πλάτη αυτά με τη σειρά τους εξαρτώνται από τη μορφή και τις επαναλήψεις των επαναλαμβανόμενων τμημάτων του σήματος του ρεύματος. Στην περίπτωση της τυχαίας μετάδοσης, δεν μπορεί να αναμένεται ότι κάποιο μοτίβο θα εμφανίζεται σε όλη τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος ενδιαφέροντος. Παρόλα αυτά, το γεγονός αυτό δεν μεταβάλλει ιδιαίτερα την προαναφερθείσα ανάλυση, απλώς οδηγεί σε μείωση του πλάτους των αναπτυσσόμενων φασματικών συνιστωσών όπως φαίνεται και στο παρακάτω παράδειγμα. Συγκεκριμένα, παρακάτω συγκρίνονται οι πρώτες επτά συνιστώσες των μονόπλευρων φάσματος τριών σημάτων. Η μόνη διαφορά μεταξύ των τριών σημάτων είναι η διάρκεια για την οποία εμφανίζεται το περιοδικό μοτίβο στο σήμα, εντός του διαστήματος μελέτης.

$$x_1(t) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cos(2\pi n f_0 t), \quad 0 \leq t \leq 3sec$$

$$x_2(t) = \begin{cases} 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cos(2\pi n f_0 t), & 0 \leq t \leq 1.5sec \\ 0, & 1.5 \leq t \leq 3sec \end{cases}$$

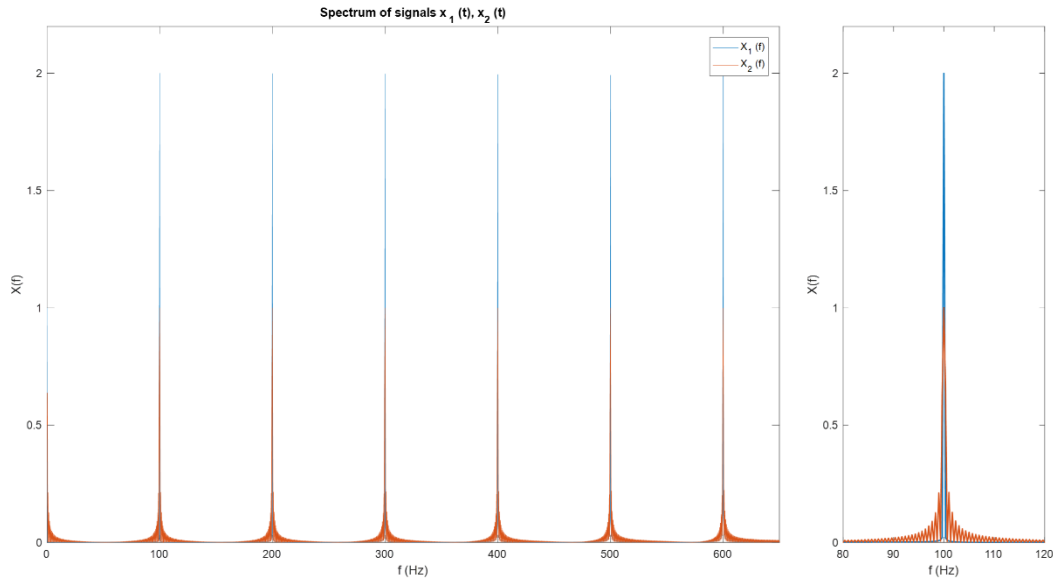
$$x_3(t) = \begin{cases} 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cos(2\pi n f_0 t), & 0 \leq t \leq 0.5sec \\ 0, & 0.5 \leq t \leq 3sec \end{cases}$$

όπου $f_0 = 100Hz$

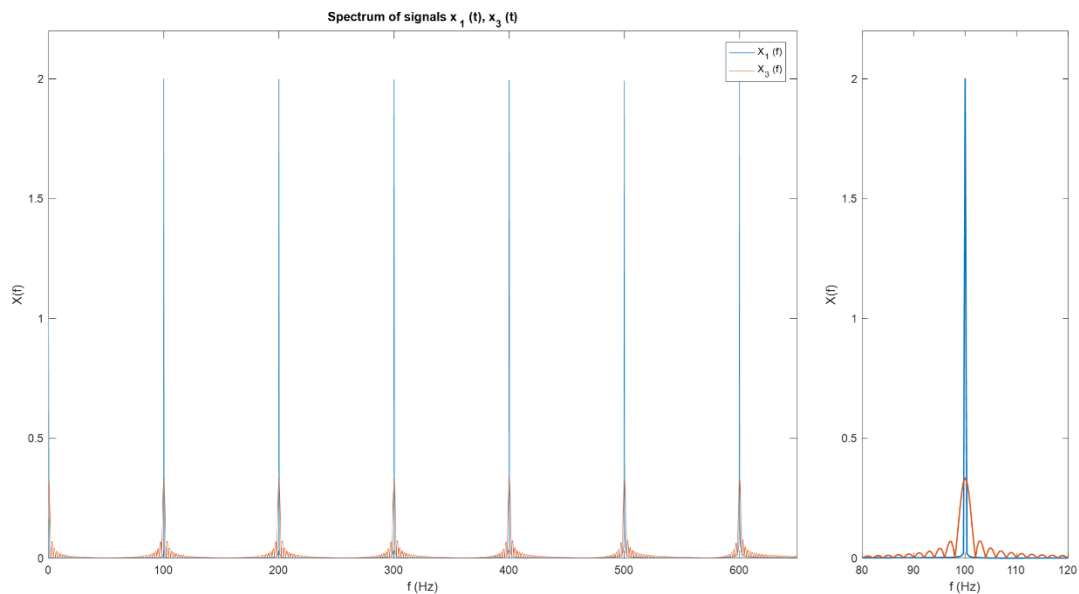
Για να απλοποιηθεί η επιθυμητή παρατήρηση έχουν γίνει οι παρακάτω απλουστεύσεις για τις τιμές των συντελεστών της σειράς Fourier:

$$\begin{pmatrix} c_i = 1 \\ \angle c_i = 0^\circ \end{pmatrix}, \quad i = 0,1,2 \dots \infty$$

Όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 3-6 και Εικόνα 3-7), ακόμα και όταν το επαναλαμβανόμενο μοτίβο εμφανίζεται για πολύ μικρό τμήμα του διαστήματος μελέτης (περίπου 16% στην περίπτωση του $x_3(t)$), οι φασματικές συνιστώσες εξακολουθούν να παρατηρούνται, αν και με αρκετά μειωμένο πλάτος.



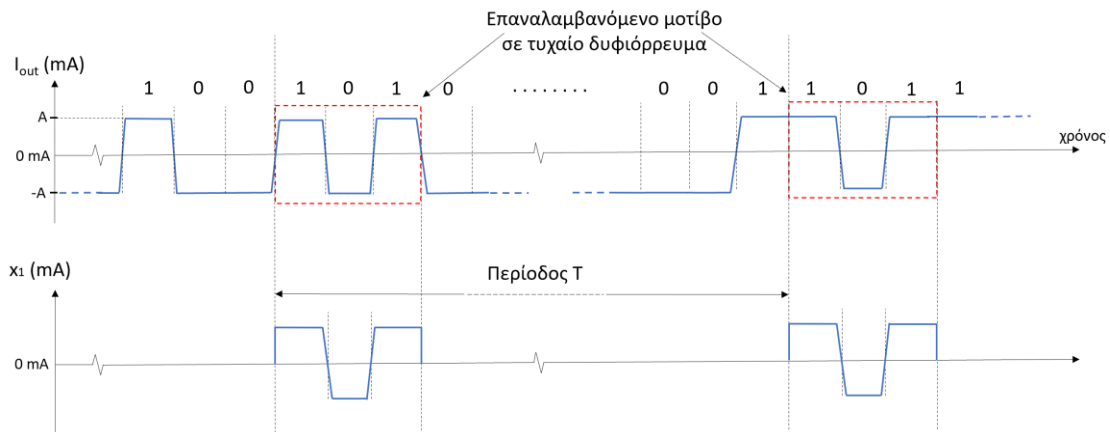
Εικόνα 3-6. Φάσματα σημάτων $x_1(t)$ και $x_2(t)$.



Εικόνα 3-7. Φάσματα σημάτων $x_1(t)$ και $x_3(t)$.

Εν γένει αν η μετάδοση είναι τυχαία, το πρόβλημα λαμβάνει μια στοχαστική μορφή δεδομένου ότι πρέπει να ληφθεί υπόψιν η τυχαιότητα του μεταδιδόμενου δυφιορρεύματος. Ωστόσο, θεωρείται σαφές μετά την παραπάνω ανάλυση, ότι λόγω της αναπόφευκτης εμφάνισης πλήθους

επαναλαμβανόμενων μοτίβων, όπως φαίνεται στο παράδειγμα της παρακάτω εικόνας (Εικόνα 3-8), φασματικές συνιστώσες μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων συμπεριλαμβανομένων και χαμηλών συχνοτήτων, στο σήμα του ρεύματος.



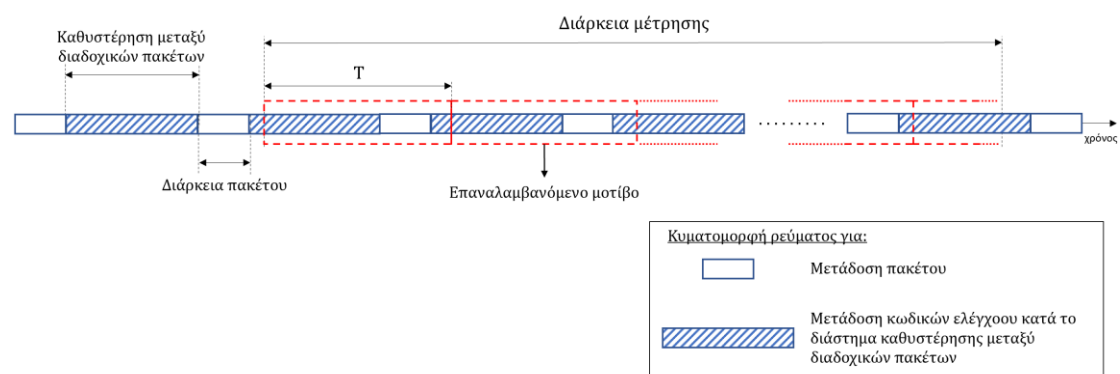
Εικόνα 3-8. Παράδειγμα τυχαίας κυματομορφής ρεύματος και προκύπτοντος περιοδικού σήματος.

Βέβαια, η ανάπτυξη τέτοιων φασματικών συνιστωσών στο σήμα του ρεύματος δεν εξασφαλίζει την εμφάνισή τους και στο μετρούμενο σήμα. Για να γίνει πλήρης ανάλυση των αναμενόμενων συχνοτήτων εκπομπών, υπάρχουν αρκετοί επιπλέον παράγοντες που πρέπει να συνυπολογισθούν, όπως η αποτελεσματικότητα των αγωγίμων θωρακίσεων ανάλογα με τη συχνότητα. Παρόλα αυτά, η παραπάνω ανάλυση καταδεικνύει ότι ανεξαρτήτως του μεταδιδόμενου δυφιορρεύματος υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης συνιστωσών χαμηλών συχνοτήτων στο φάσμα των ρευμάτων και συνεπώς έχει αξία η μελέτη τυχόν εκπομπών σε αυτό το φάσμα λόγω της λειτουργίας της ζεύξης.

iii. Συσχέτιση αναμενόμενου στατικού πεδίου & κυματομορφής ρεύματος

Ο μηχανισμός επαγωγής ρευμάτων στην εξωτερική θωράκιση που σχολιάσθηκε παραπάνω, δεν καλύπτει την περίπτωση του στατικού πεδίου που πιθανώς εκπέμπεται από τη λειτουργία της ζεύξης. Συγκεκριμένα, εκπομπές στατικού πεδίου μπορούν να προκληθούν από συνεχή ρεύματα στα συνεστραμμένα ζεύγη της ζεύξης SpW. Σύμφωνα με τη μέθοδο σηματοδοσίας που χρησιμοποιείται στη ζεύξη, δεν αναμένεται μετάδοση συνεχών ρευμάτων σε ένα συνεστραμμένο ζεύγος. Ωστόσο, όπως φαίνεται από τη σχέση 5.5 της παραπάνω ανάλυσης Fourier, κάθε περιοδικό σήμα έχει μια στατική συνιστώσα η οποία ουσιαστικά αποτελεί τη μέση τιμή του σήματος για μια περίοδο του.

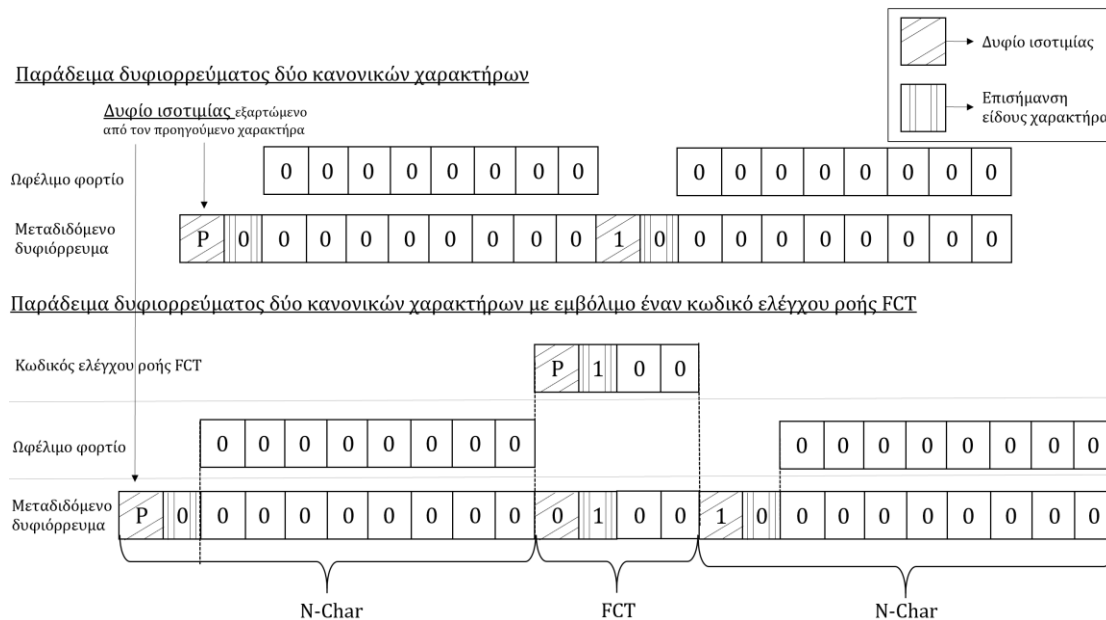
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρακάτω κεφάλαιο έχουν προκύψει από μετρήσεις κατά τη διάρκεια των οποίων πραγματοποιείται επαναλαμβανόμενη μετάδοση του ίδιου πακέτου σε κάθε κατεύθυνση της ζεύξης. Συνεπώς, το μεταδιδόμενο σήμα μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο τμήματα, τη μετάδοση του πακέτου και το διάστημα καθυστέρησης μεταξύ των διαδοχικών πακέτων, διαμορφώνοντας έτσι ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3-9**. Σύμφωνα με την προτεραιότητα μετάδοσης των μονάδων επικοινωνίας, όταν δεν απαιτείται η αποστολή άλλων μονάδων (FCTs, N-Chars), προκειμένου να διατηρηθεί η ζεύξη ενεργή και να μην προκύψει σφάλμα αποσύνδεσης, μεταδίδονται κωδικοί ελέγχου “NULL”. Επομένως, κατά το διάστημα καθυστέρησης μεταξύ των πακέτων μεταδίδονται συνεχόμενα κωδικοί ελέγχου “NULL”. Σημειώνεται ότι οι κωδικοί ελέγχου ροής “FCT” έχουν υψηλότερη προτεραιότητα τόσο από τους κωδικούς ελέγχου “NULL” όσο και από τους κανονικούς χαρακτήρες “N-Chars” που απαρτίζουν τα πακέτα, οπότε μεταδίδονται, όταν είναι απαραίτητο για τον έλεγχο ροής στη ζεύξη, ενδιάμεσα στις προαναφερθείσες μονάδες επικοινωνίας.



Εικόνα 3-9. Κυματομορφή ρεύματος και επαναλαμβανόμενα μοτίβα που προκύπτουν.

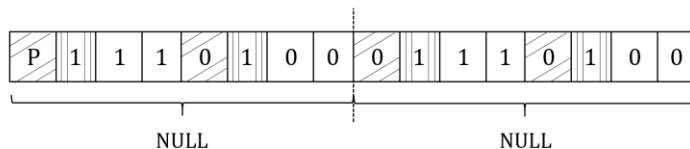
Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι όταν το ωφέλιμο φορτίο του πακέτου αποτελείται μόνο από μηδενικά, αναμένεται στατική συνιστώσα ρεύματος με μεγαλύτερη απόλυτη τιμή σε σχέση με αυτή που προκύπτει από μετάδοση τυχαίου πακέτου, καθώς η μέση τιμή του σήματος σε μια περίοδο δεν θα είναι κοντά στο μηδέν. Μάλιστα, το φαινόμενο αυτό αναμένεται εντονότερο για «μηδενικά» πακέτα με μεγάλο μήκος ωφέλιμο φορτίο. Το γεγονός ότι το ωφέλιμο φορτίο αποτελείται μόνο από μηδενικά δεν σημαίνει ότι μεταδίδονται μόνο μηδενικά κατά τη μετάδοση του πακέτου. Παρόλα αυτά, σε τέτοιες περιπτώσεις, όπως φαίνεται και από τα παραδείγματα των παρακάτω εικόνων (**Εικόνα 3-10** και **Εικόνα 3-11**), αποδεικνύεται ότι το μεταδιδόμενο δυφίορρευμα αποτελείται κυρίως από μηδενικά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει και η δυνατότητα ανάπτυξης στατικών ρευμάτων στις αγωγίμες θωρακίσεις, λόγω διαφοράς των τάσεων αναφοράς στα άκρα της ζεύξης, όμως το φαινόμενο αυτό δεν θα σχολιασθεί, καθώς δεν προκαλείται από τη λειτουργία της ζεύξης αλλά από το σχεδιασμό της.

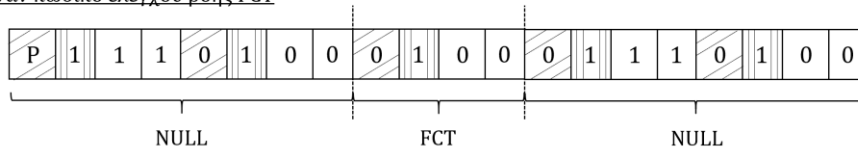


Εικόνα 3-10. Παραδείγματα μεταδιδόμενου δυφιορρεύματος κατά τη «διάρκεια πακέτου» όπως ορίζεται στην **Εικόνα 3-9**.

Παράδειγμα δυφιορρεύματος δύο συνεχόμενων κωδικών ελέγχων "NULL"



Παράδειγμα δυφιορρεύματος δύο συνεχόμενων κωδικών ελέγχων "NULL" με εμβόλιμο έναν κωδικό ελέγχου ροής FCT

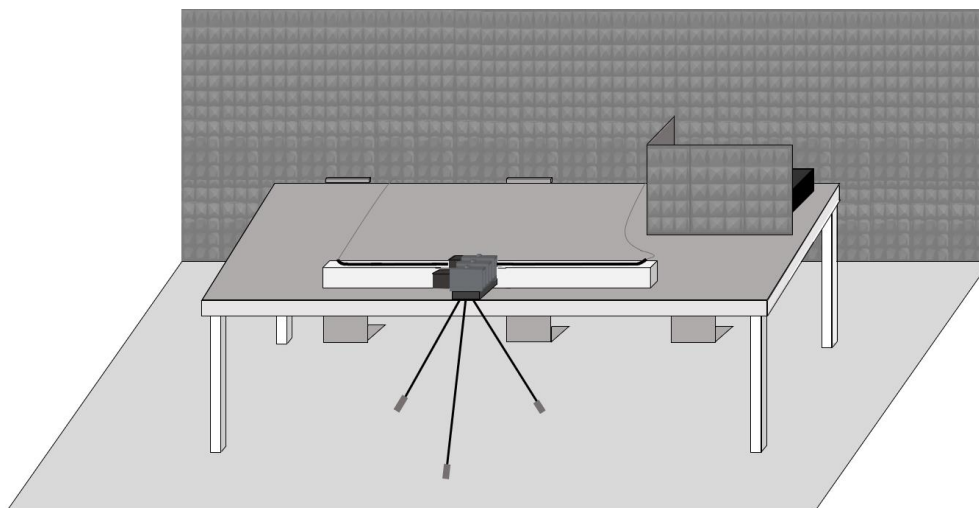


Εικόνα 3-11. Παραδείγματα μεταδιδόμενου δυφιορρεύματος κατά την «καθυστέρηση μεταξύ διαδοχικών πακέτων» όπως ορίζεται στην **Εικόνα 3-9**.

4. Αποτελέσματα & σχολιασμός μετρήσεων

Στο παρακάτω κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση της μαγνητικής συμπεριφοράς της ζεύξης

SpW, έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικοί συνδυασμοί χαρακτηριστικών μετάδοσης. Συγκεκριμένα, μεταβάλλονται ο ρυθμός μετάδοσης (link rate) και το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου των χρησιμοποιούμενων πακέτων (payload length). Για κάθε συνδυασμό χαρακτηριστικών που εξετάζεται, ο ρυθμός μετάδοσης και το μέγεθος φορτίου είναι ίδιο και για τις δύο κατευθύνσεις της ζεύξης, ενώ το περιεχόμενο του φορτίου μπορεί να διαφέρει σε κάθε κατεύθυνση. Η καθυστέρηση μεταξύ διαδοχικών πακέτων σε κάθε περίπτωση τίθεται στα 100μs. Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω, έχουν επιβεβαιωθεί με χρήση περισσότερων διατάξεων του μετρητικού εξοπλισμού, ωστόσο με σκοπό τη σύγκριση και ανάλυση των αποτελεσμάτων, μόνο μία τέτοια διάταξη έχει επιλεγεί για παρουσίαση. Η διάταξη αυτή περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο. Μία αναπαράσταση του χώρου των μετρήσεων φαίνεται στην **Εικόνα 4-1**.

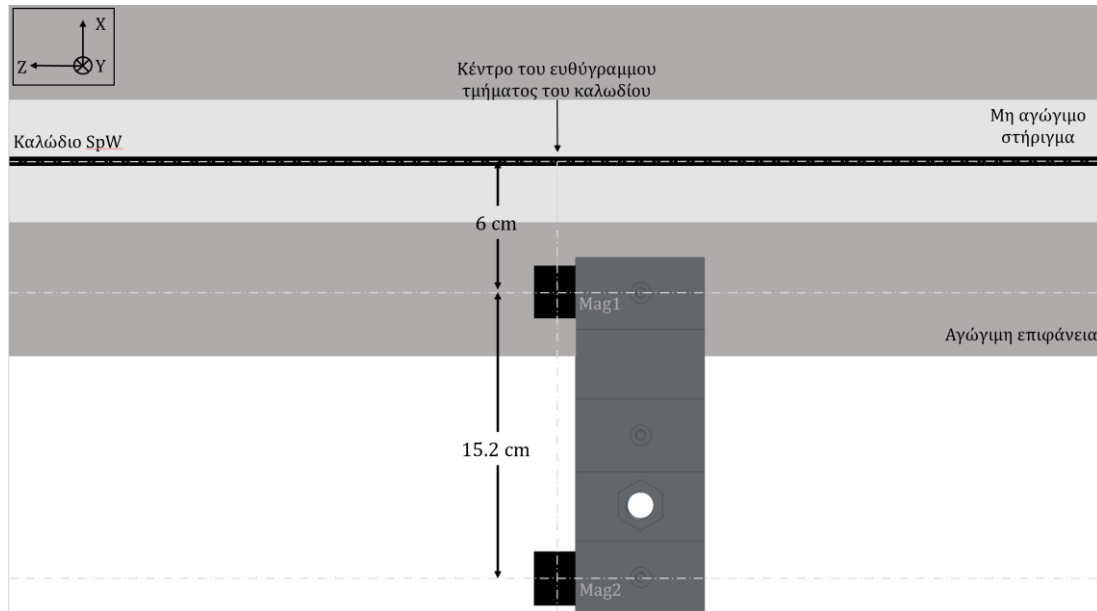


Εικόνα 4-1. Αναπαράσταση του χώρου των μετρήσεων.

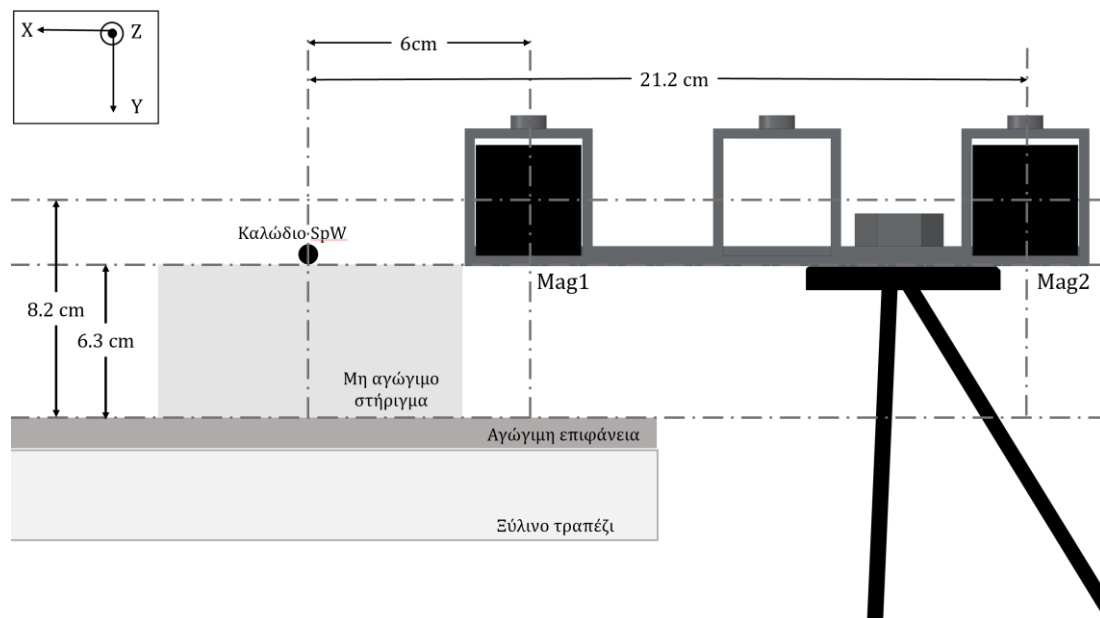
1. Διάταξη μετρητικού εξοπλισμού

Τα δύο μαγνητόμετρα είναι τοποθετημένα στις εξωτερικές θήκες της τρισδιάστατα εκτυπωμένης πλαστικής βάσης, η οποία στηρίζεται πάνω σε ένα τρίποδο κατασκευασμένο από ξύλο και πλαστικό ώστε να μη μεταβάλλει το προς μέτρηση μαγνητικό πεδίο. Επιπλέον, τα δύο μαγνητόμετρα είναι τοποθετημένα με τον ίδιο προσανατολισμό και ευθυγραμμισμένα με το κέντρο του ευθύγραμμου τμήματος του καλωδίου όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4-2**. Σημειώνεται ότι όλες οι αποστάσεις μεταξύ των μονάδων του μετρητικού εξοπλισμού καθώς και το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων αποτυπώνονται στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 4-2** και **Εικόνα 4-3**). Ο υπόλοιπος μετρητικός εξοπλισμός, δηλαδή οι μονάδες παροχής ισχύος και η μονάδα επίκτησης

δεδομένων, είναι τοποθετημένα σε απόσταση περίπου τεσσάρων μέτρων από τη ζεύξη και τα μαγνητόμετρα. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, το μαγνητόμετρο που βρίσκεται πλησιέστερα στο καλώδιο θα αναφέρεται ως μαγνητόμετρο 1 (mag1), ενώ το άλλο ως μαγνητόμετρο 2 (mag2).



Εικόνα 4-2. Κάτοψη της διάταξης του μετρητικού εξοπλισμού.



Εικόνα 4-3. Πλάγια όψη διάταξης μετρητικού εξοπλισμού [11].

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μετρητικής διαδικασίας και γίνεται μία αξιολόγηση της μαγνητικής συμπεριφοράς της ζεύξης SpW σύμφωνα με αυτά. Η παρουσίαση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά, σχολιάζεται η συμπεριφορά της ζεύξης όσον αφορά το μετρούμενο στατικό πεδίο και στη συνέχεια εξετάζεται το μετρούμενο

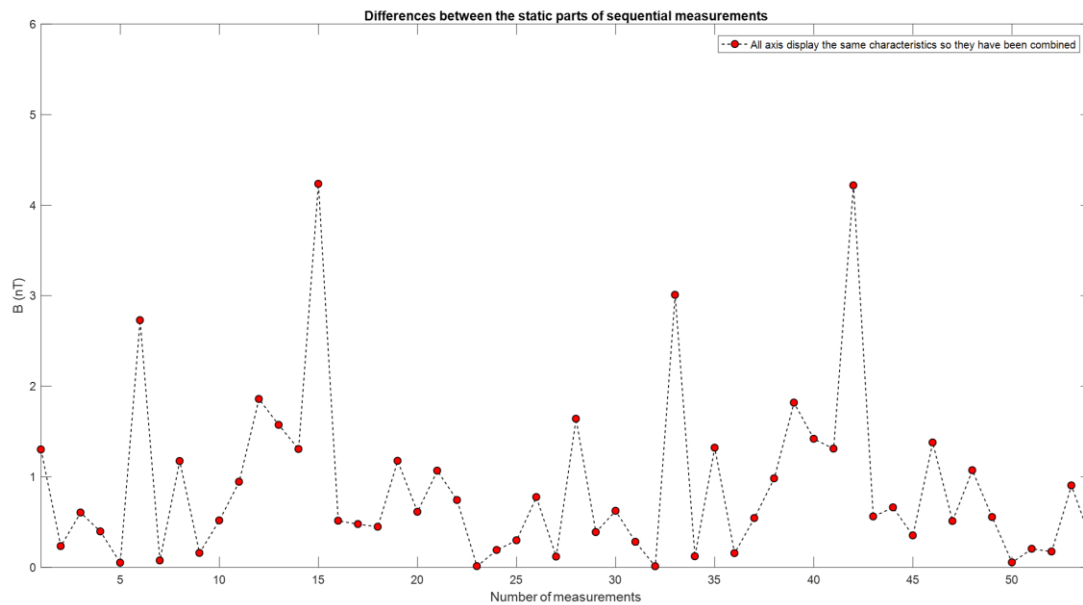
εναλλασσόμενο πεδίο χαμηλών συχνοτήτων. Το κάθε μαγνητόμετρο επιστρέφει τρία αναλογικά σήματα στο πεδίο του χρόνου, τα οποία αντιστοιχούν στην τριοδιάστατη απεικόνιση του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου. Το στατικό πεδίο της μέτρησης προκύπτει από τη μέση τιμή του αντίστοιχου σήματος στο πεδίο του χρόνου, ενώ για την αξιολόγηση των εναλλασσόμενων εκπομπών απαιτείται να εξετασθεί το φασματικό περιεχόμενο του σήματος. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του μονόπλευρου διακριτού μετασχηματισμού Fourier των μετρούμενων σημάτων με τη βοήθεια του αλγορίθμου “Fast Fourier Transform”. Στη συνέχεια, συγκρίνοντας είτε τη μέση τιμή είτε το φάσμα του σήματος μέτρησης με τη ζεύξη σε λειτουργία, με το αντίστοιχο του μετρούμενου σήματος που αφορά το περιβάλλον πεδίο, αξιολογείται κάθε φορά η συμπεριφορά της ζεύξης ως προς τις εκπομπές.

2. Εκπομπές στατικού μαγνητικού πεδίου

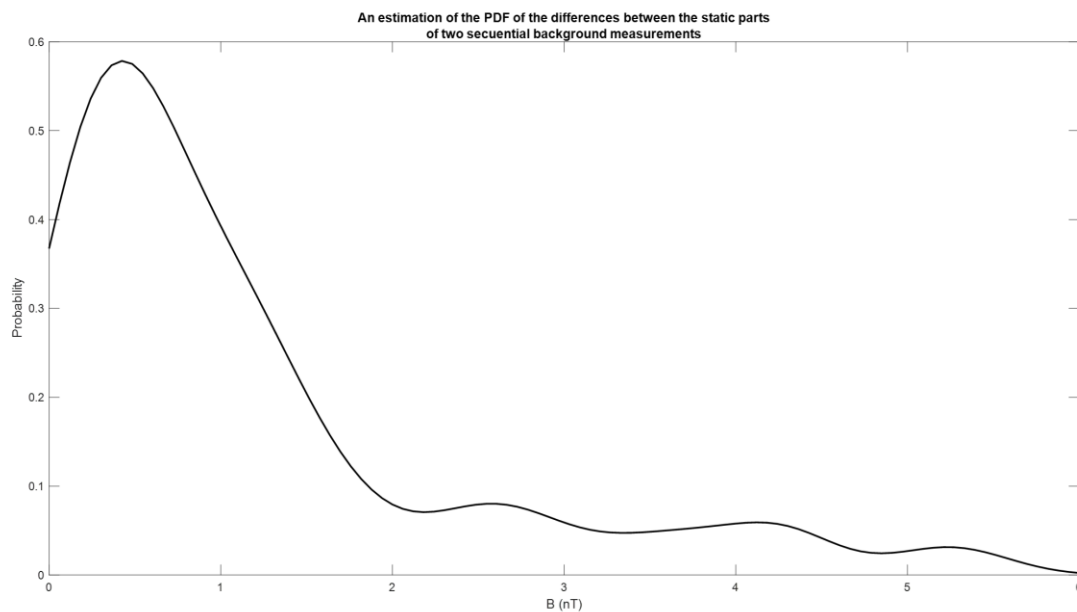
Πριν την ανάλυση των αποτελεσμάτων, αξίζει να αναφερθούν κάποια χαρακτηριστικά του στατικού πεδίου στο χώρο των μετρήσεων. Καταρχάς, λόγω της απουσίας εξιδεικευμένης μαγνητικής θωράκισης, είναι σαφές ότι η μέτρηση θα περιέχει το μαγνητικό πεδίο της Γης. Ωστόσο, αν εξετασθεί το μέτρο του μετρούμενου σήματος με τη ζεύξη απενεργοποιημένη, προκύπτει περίπου 15.5 μT . Η διαφορά της μετρούμενης από την αναμενόμενη τιμή του μέτρου του μαγνητικού πεδίου της Γης μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη του κλωβού Faraday, ο οποίος αν και δεν μπορεί να εξαλείψει το εξωτερικό στατικό πεδίο, σίγουρα μεταβάλλει το μέτρο και την αξονική κατανομή του. Παρόλα αυτά, η ακριβής τιμή του περιβάλλοντος στατικού πεδίου δεν επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, καθώς η τεχνική που χρησιμοποιείται για την εξάλειψη του περιβάλλοντος θορύβου είναι συγκριτική. Αντίθετα, οι εκ φύσεως διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου της Γης που πιθανώς εντείνονται λόγω της ύπαρξης του κλωβού, επηρεάζουν σημαντικά τη διακριτική ικανότητα της μετρητικής διάταξης. Για το λόγο αυτό, θα γίνει μια απόπειρα να υπολογισθεί το εύρος των διακυμάνσεων που μπορούν να προκύψουν μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων. Προκειμένου να γίνει μια τέτοια εκτίμηση, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά ζεύγη μετρήσεων με μικρή χρονική καθυστέρηση μεταξύ τους και με τη ζεύξη απενεργοποιημένη. Μελετώντας τις απόλυτες διαφορές των μέσων τιμών των διαδοχικών μετρήσεων, προκύπτει το ζητούμενο εύρος των διακυμάνσεων του περιβάλλοντος στατικού πεδίου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4-4**.

Για να γίνει πιο σαφής η συμπεριφορά του περιβάλλοντος στατικού πεδίου, έχει εκτιμηθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) των διαφορών μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων (**Εικόνα 4-5**). Σύμφωνα με την εκτίμηση αυτή, φαίνεται ότι υπάρχει περίπου 80% πιθανότητα η διαφορά μεταξύ διαδοχικών

μετρήσεων να κυμαίνεται στο εύρος 0.1 με 2 nT, επομένως είναι προφανές ότι διαφορές αυτής της τάξης δεν μπορούν να αποδοθούν στη λειτουργία της ζεύξης. Ακόμη, όπως φαίνεται και από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, οι διακυμάνσεις του στατικού πεδίου μπορούν να λάβουν και μεγαλύτερες τιμές μέχρι και 6 nT, με μικρότερη βέβαια πιθανότητα. Επομένως, λόγω των έντονων αυτών διακυμάνσεων πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σύγκριση των μετρήσεων ώστε να μην παρερμηνευτούν οι διακυμάνσεις του στατικού πεδίου για εκπομπές λόγω λειτουργίας της ζεύξης.



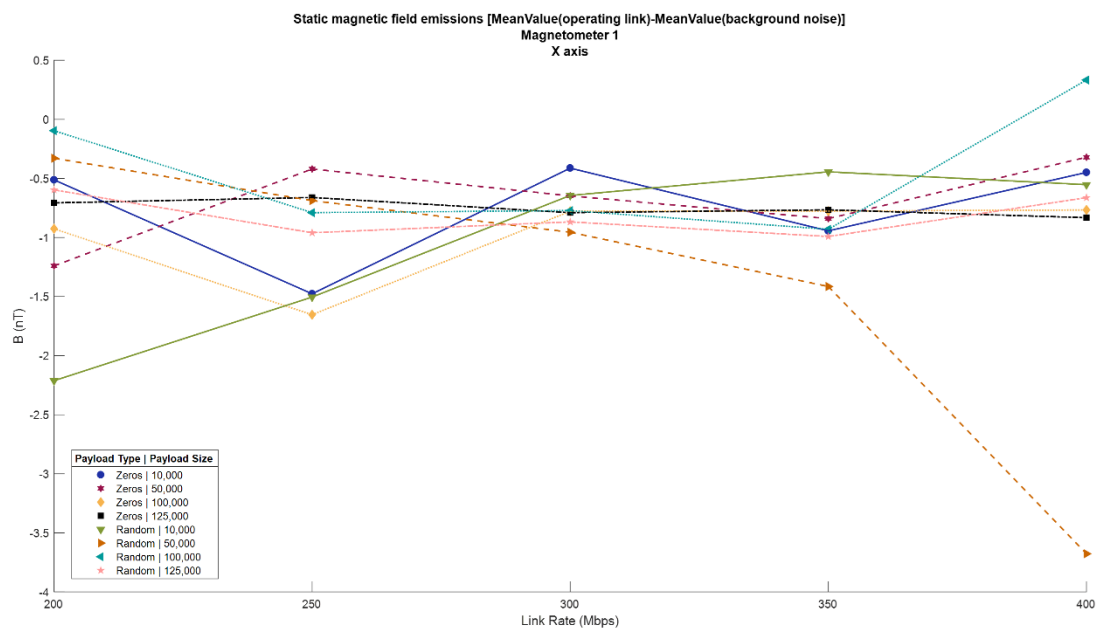
Εικόνα 4-4. Απόλυτη τιμή διαφορών μετρούμενου στατικού πεδίου μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων.



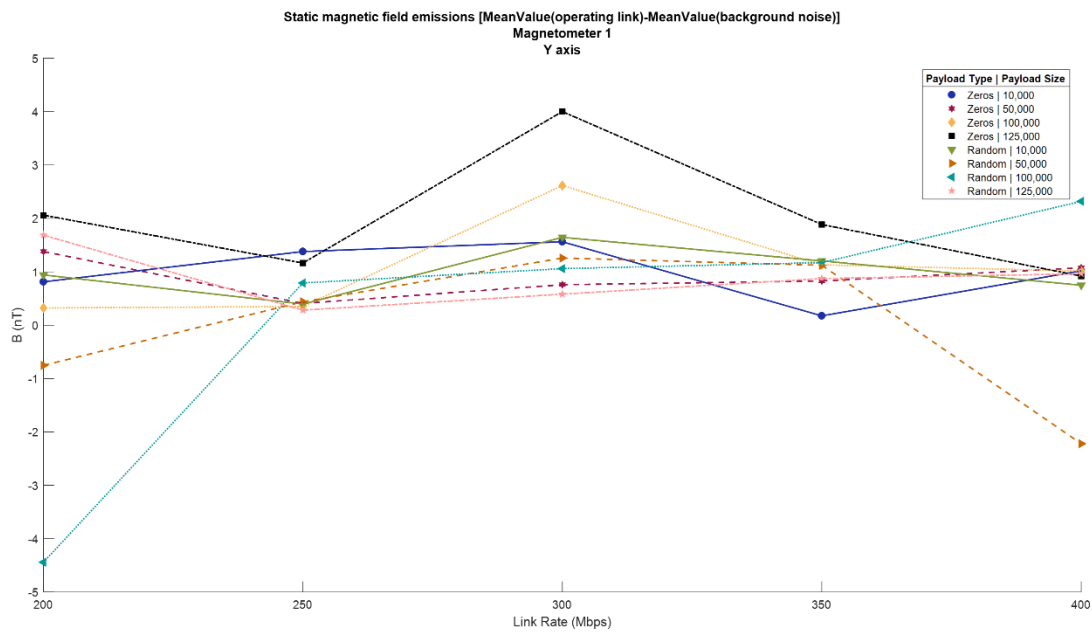
Εικόνα 4-5. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των απόλυτων τιμών των διαφορών μετρούμενου στατικού πεδίου μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων.

Αρχικά θα εξετασθεί η συσχέτιση του μέτρου των μετρούμενων εκπομπών στατικού πεδίου με το είδος του ωφέλιμου φορτίου. Όπως αναφέρεται στο τέλος του 3^{ου} κεφαλαίου, υπάρχουν ενδείξεις ότι η DC συνιστώσα του ρεύματος που ρέει στα συνεστραμμένα ζεύγη πληροφορίας είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερη όταν στέλνονται πακέτα με ωφέλιμο φορτίο αποτελούμενο από μηδενικά, σε σχέση με αυτή που προκύπτει από την αποστολή πακέτων με τυχαίο ωφέλιμο φορτίο. Για το λόγο αυτό, έχει γίνει η υπόθεση ότι το μέτρο των στατικών εκπομπών της ζεύξης θα είναι μεγαλύτερο στην πρώτη περίπτωση. Η υπόθεση αυτή καλείται να επιβεβαιωθεί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων για διάφορα χαρακτηριστικά της ζεύξης.

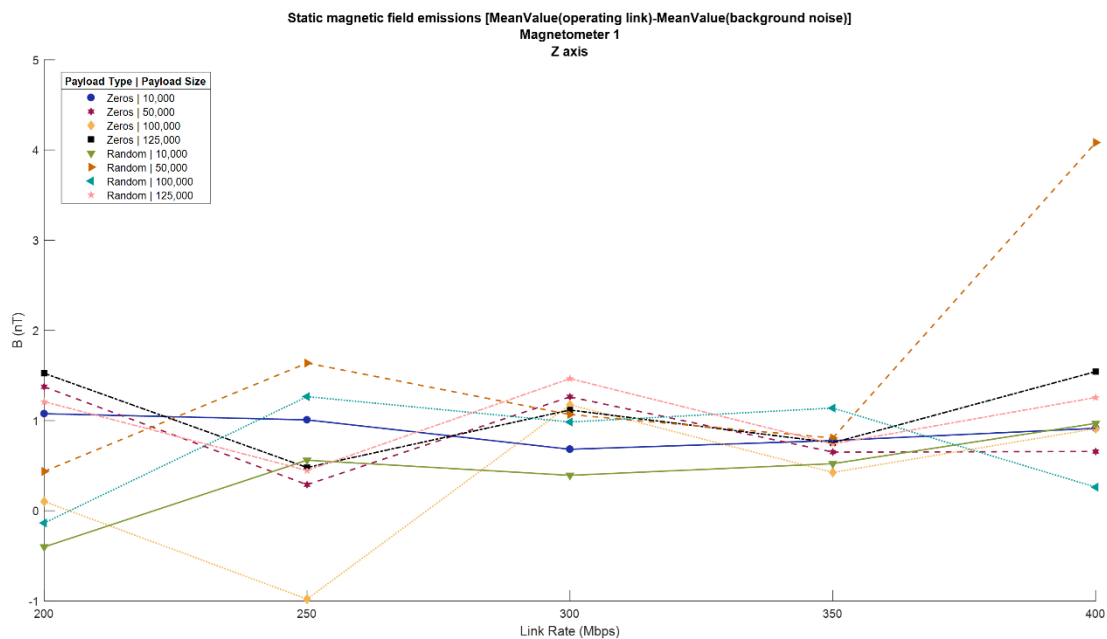
Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 4-6, Εικόνα 4-7, Εικόνα 4-8) παρουσιάζονται οι προκύπτουσες εκπομπές στατικού μαγνητικού πεδίου λόγω λειτουργίας της ζεύξης, για διαφορετικά χαρακτηριστικά μετάδοσης και είδη ωφέλιμου φορτίου στα πακέτα. Παρατηρείται ότι αν συγκριθούν οι εκπομπές για ίδια χαρακτηριστικά της ζεύξης και διαφορετικό είδος φορτίου, δεν εμφανίζεται κάποιο μοτίβο σαν αυτό που αναμενόταν, δηλαδή ισχυρότερες εκπομπές για μετάδοση πακέτων με «μηδενικό» ωφέλιμο φορτίο.



Εικόνα 4-6. Εκπομπές στατικού πεδίου στον x άξονα συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης για «Μηδενικά» και «Τυχαία» ωφέλιμα φορτία (Μαγνητόμετρο 1) Μήκη ωφέλιμων φορτίων 10,000, 50,000, 100,000 & 125,000 bytes.

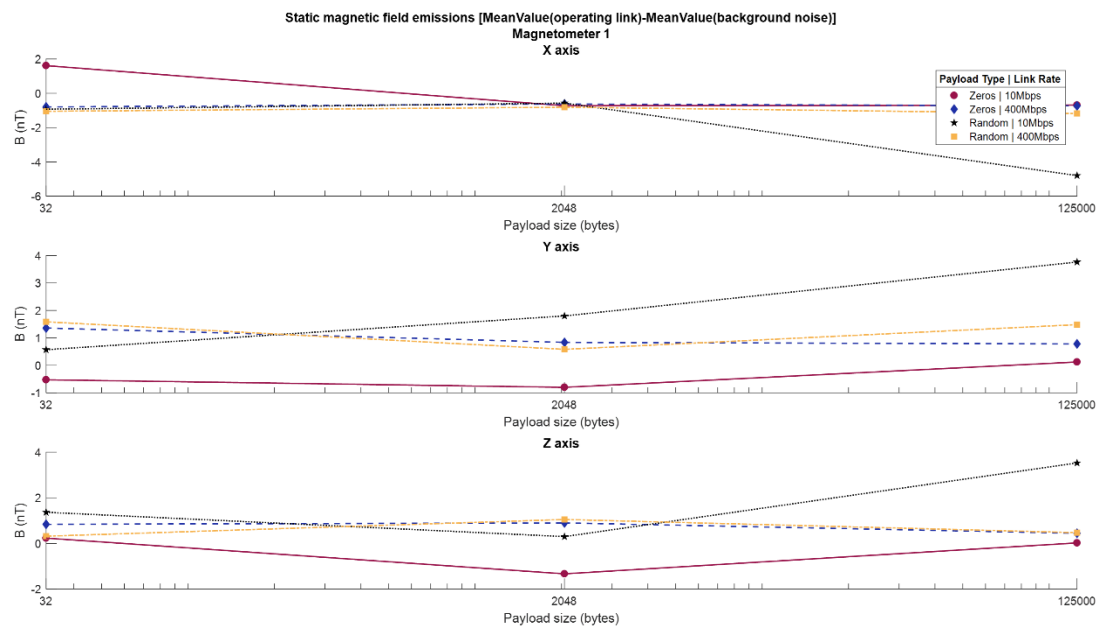


Εικόνα 4-7. Εκπομπές στατικού πεδίου στον y άξονα συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης για «Μηδενικά» και «Τυχαία» ωφέλιμα φορτία (Μαγνητόμετρο 1) Μήκη ωφέλιμων φορτίων 10,000, 50,000, 100,000 & 125,000 bytes.

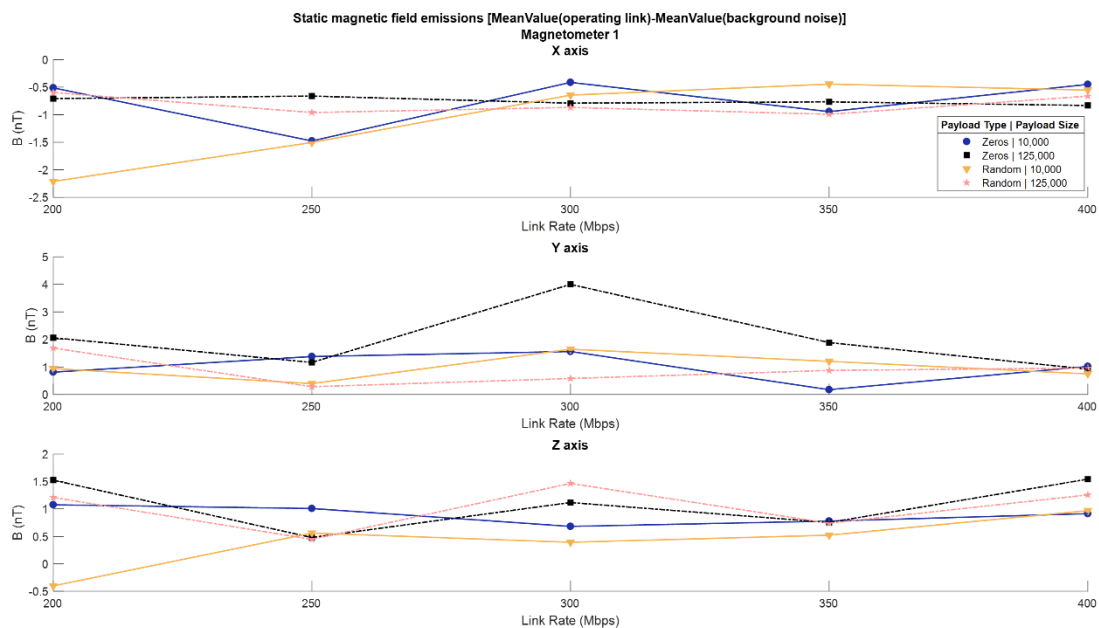


Εικόνα 4-8. Εκπομπές στατικού πεδίου στον z άξονα συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης για «Μηδενικά» και «Τυχαία» ωφέλιμα φορτία (Μαγνητόμετρο 1) Μήκη ωφέλιμων φορτίων 10,000, 50,000, 100,000 & 125,000 bytes.

Στη συνέχεια, συγκρίνονται οι μετρούμενες εκπομπές για διαφορετικούς συνδυασμούς χαρακτηριστικών της ζεύξης. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, δε διακρίνεται κάποια συσχέτιση μεταξύ τους, όπως ισχυρότερες εκπομπές καθώς αυξάνεται το μέγεθος των πακέτων ή καθώς μεγαλώνει ο ρυθμός μετάδοσης (Εικόνα 4-9 και Εικόνα 4-10).

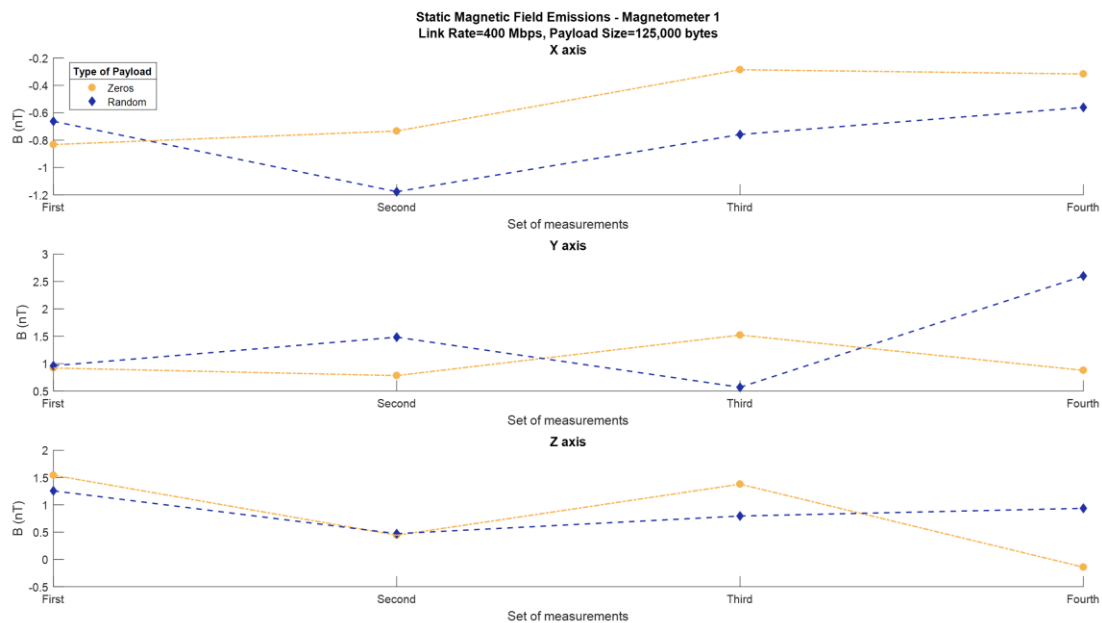


Εικόνα 4-9. Εκπομπές στατικού πεδίου στον x άξονα συναρτήσει του μήκους του ωφέλιμου φορτίου για «Μηδενικά» και «Τυχαία» ωφέλιμα φορτία (Μαγνητόμετρο 1) Ρυθμοί μετάδοσης 10 και 400 Mbps.



Εικόνα 4-10. Εκπομπές στατικού πεδίου στον x άξονα συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης για «Μηδενικά» και «Τυχαία» ωφέλιμα φορτία (Μαγνητόμετρο 1) Μήκοι ωφέλιμων φορτίων 10,000 και 125,000 bytes.

Στα προαναφερθέντα αποτελέσματα, που δείχνουν ότι εμφανίζεται μια τυχαιότητα στις μετρούμενες εκπομπές, προστίθεται και η έλλειψη επαναληψιμότητας μεταξύ μετρήσεων που αφορούν ίδια χαρακτηριστικά της ζεύξης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4-11**.



Εικόνα 4-11. Εκπομπές στατικού πεδίου από τέσσερα διαφορετικά ζεύγη μετρήσεων με τα ίδια χαρακτηριστικά για Μηδενικά» και «Τυχαία» ωφέλιμα φορτία Μήκος ωφέλιμου φορτίου=125,000 bytes, Ρυθμός μετάδοσης=400 Mbps, Μαγνητόμετρο 1, x άξονας.

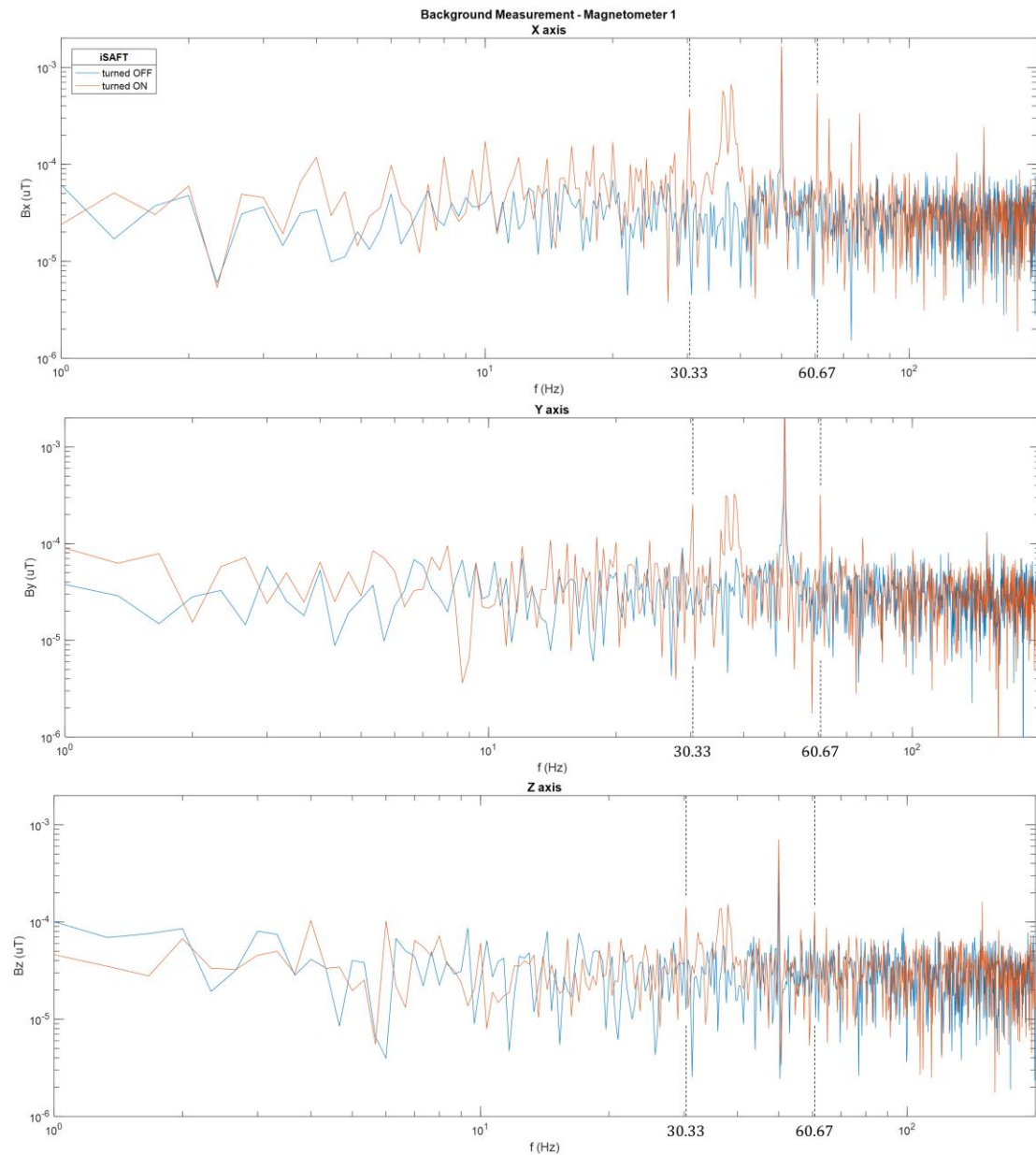
Έχοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, προτού εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για τη συμπεριφορά της ζεύξης ως προς τις στατικές εκπομπές της, αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι εκπομπές που μετρούνται ακολουθούν αρκετά πιστά την εκτίμηση που δίνεται από την αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, για τις διακυμάνσεις του στατικού πεδίου μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων. Ενδεικτικά, η απόλυτη τιμή των περισσότερων εκπομπών κυμαίνεται στο εύρος 0.1 με 2 nT, ενώ εμφανίζονται περιστασιακά και κάποιες με μεγαλύτερες τιμές, έως και 6 nT. Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οποιοδήποτε στατικές εκπομπές προκαλούμενες από τη λειτουργία της ζεύξης, δεν μπορούν να γίνουν διακριτές στα σήματα των μετρήσεων λόγω των έντονων διακυμάνσεων του στατικού πεδίου. Επομένως, λόγω της έλλειψης μαγνητικής θωράκισης στο χώρο των μετρήσεων και συνεπώς λόγω της μειωμένης διακριτικής ικανότητας της διάταξης όσον αφορά μετρούμενα στατικά πεδία, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα πέραν του ότι οι παραγόμενες εκπομπές λόγω της λειτουργίας της ζεύξης δεν ξεπερνούν τα 10 nT περίπου.

3. Εκπομπές εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου χαμηλών συχνοτήτων

Σχετικά με τις εκπομπές χαμηλόσυχνου μαγνητικού πεδίου που προκαλούνται από τη λειτουργία της ζεύξης, ορισμένες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις έχουν εντοπιστεί και θα σχολιαστούν στο παρακάτω κεφάλαιο. Αρχικά όμως, θα πρέπει να γίνει μία αναφορά στο εξεταζόμενο εύρος ζώνης. Καθώς η συχνότητα δειγματοληψίας της μονάδας επίκτησης δεδομένων είναι ίση με 10,000 δείγματα το δευτερόλεπτο, η μέγιστη συχνότητα για την οποία επιτρέπεται η ασφαλής ανάκτηση του δειγματοληπτημένου σήματος, σύμφωνα με το κριτήριο Nyquist, είναι τα 5 kHz. Ωστόσο, προκειμένου να μην γίνει υπέρβαση του ζωνικού εύρους 3dB των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται, η μεγαλύτερη συχνότητα που θα μελετηθεί στο πλαίσιο αυτής της εργασίας είναι 1.5 kHz. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μαγνητικών εκπομπών που προκαλούνται από τη λειτουργία της ζεύξης, περιλαμβάνει τον υπολογισμό και τη σύγκριση του φασματικού περιεχομένου των σημάτων μέτρησης για τη λειτουργία της ζεύξης και για το περιβάλλον πεδίο. Οι δύο αυτές μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση μεταξύ τους, ώστε το περιβάλλον πεδίο να μπορεί να θεωρηθεί αμετάβλητο. Σε αντίθεση με την περίπτωση του στατικού πεδίου, το χαμηλόσυχνο φασματικό περιεχόμενο των μετρούμενων σημάτων παρατηρείται ότι παραμένει σταθερό μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων με τη ζεύξη απενεργοποιημένη.

Προτού αναλυθούν οι εκπομπές που οφείλονται στη λειτουργία της ζεύξης, αξίζει να γίνει μία αναφορά στο φάσμα του περιβάλλοντος πεδίου στις συχνότητες ενδιαφέροντος και συγκεκριμένα στις φασματικές συνιστώσες που προκαλούνται από τη λειτουργία του προσομοιωτή “iSAFT”. Προκειμένου να απομονωθούν οι συνιστώσες αυτές, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πριν και μετά την ενεργοποίηση του “iSAFT”, χωρίς όμως να μεταδίδεται πληροφορία μέσω της ζεύξης στις περιπτώσεις που ήταν ενεργοποιημένος. Η σύγκριση του φασματικού περιεχομένου των μετρήσεων, με τον “iSAFT” ενεργοποιημένο και απενεργοποιημένο, καταδεικνύει τις συνιστώσες που οφείλονται στη λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 4-12), η λειτουργία του “iSAFT” προκαλεί την εμφάνιση αρκετών φασματικών συνιστωσών στο εύρος από 4 έως 200 Hz. Κάποιες από αυτές τις συνιστώσες παρατηρούνται πιο απλωμένες στο φάσμα, όπως στα 33-37 Hz, ενώ κάποιες άλλες πιο συγκεντρωμένες, όπως αυτές στα 30 και 60 Hz. Οι δύο αυτές συνιστώσες θα αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης στη συνέχεια του κεφαλαίου για αυτό και σημειώνονται στην Εικόνα 4-12. Εκτός από τις φασματικές συνιστώσες που οφείλονται στον προσομοιωτή, στις παρακάτω αναπαραστάσεις του φασματικού περιεχομένου των μετρήσεων

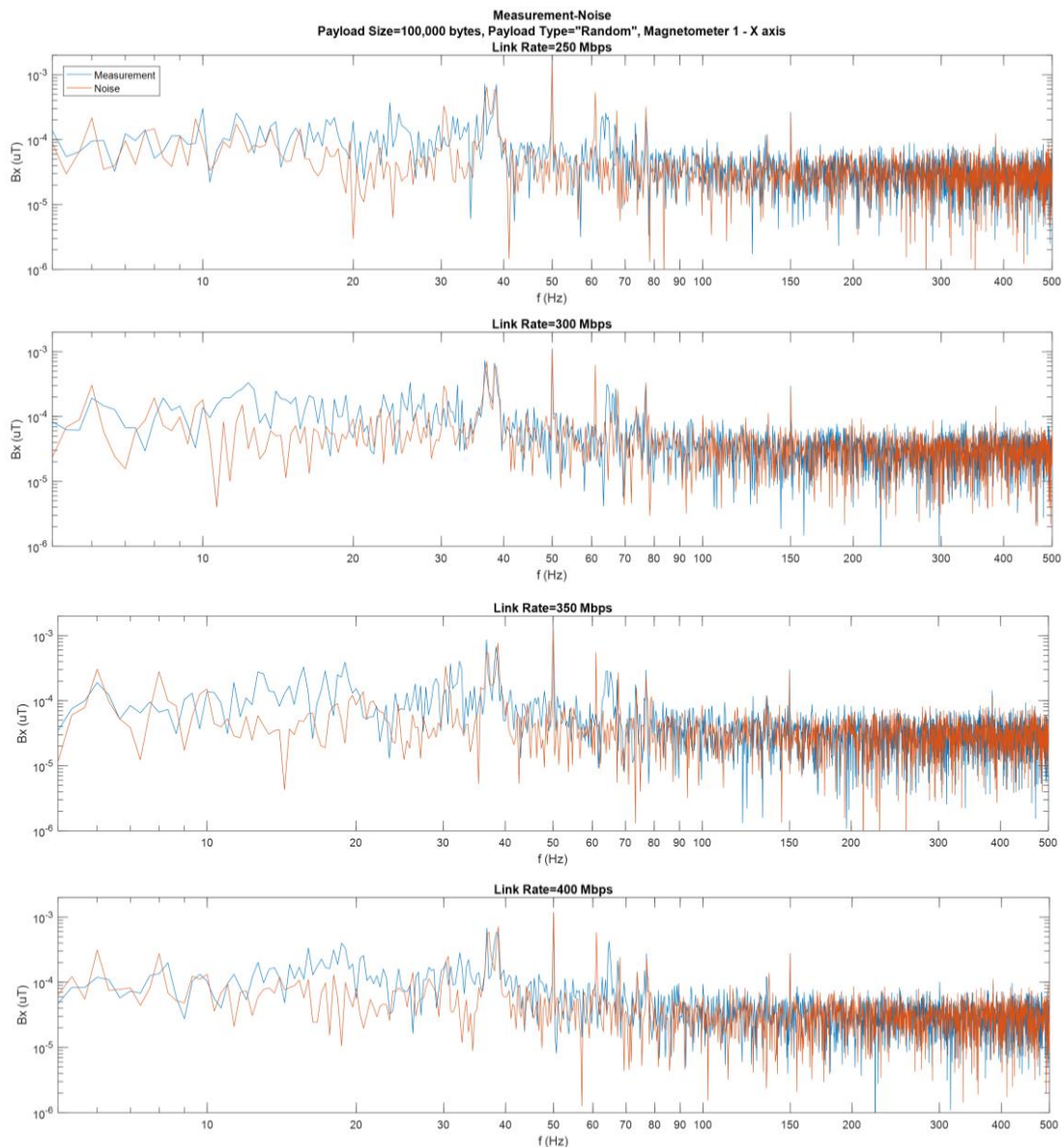
διακρίνονται και οι αναμενόμενες συνιστώσες στις συχνότητες των 50 και 150 Hz, λόγω του δικτύου ηλεκτροδότησης.



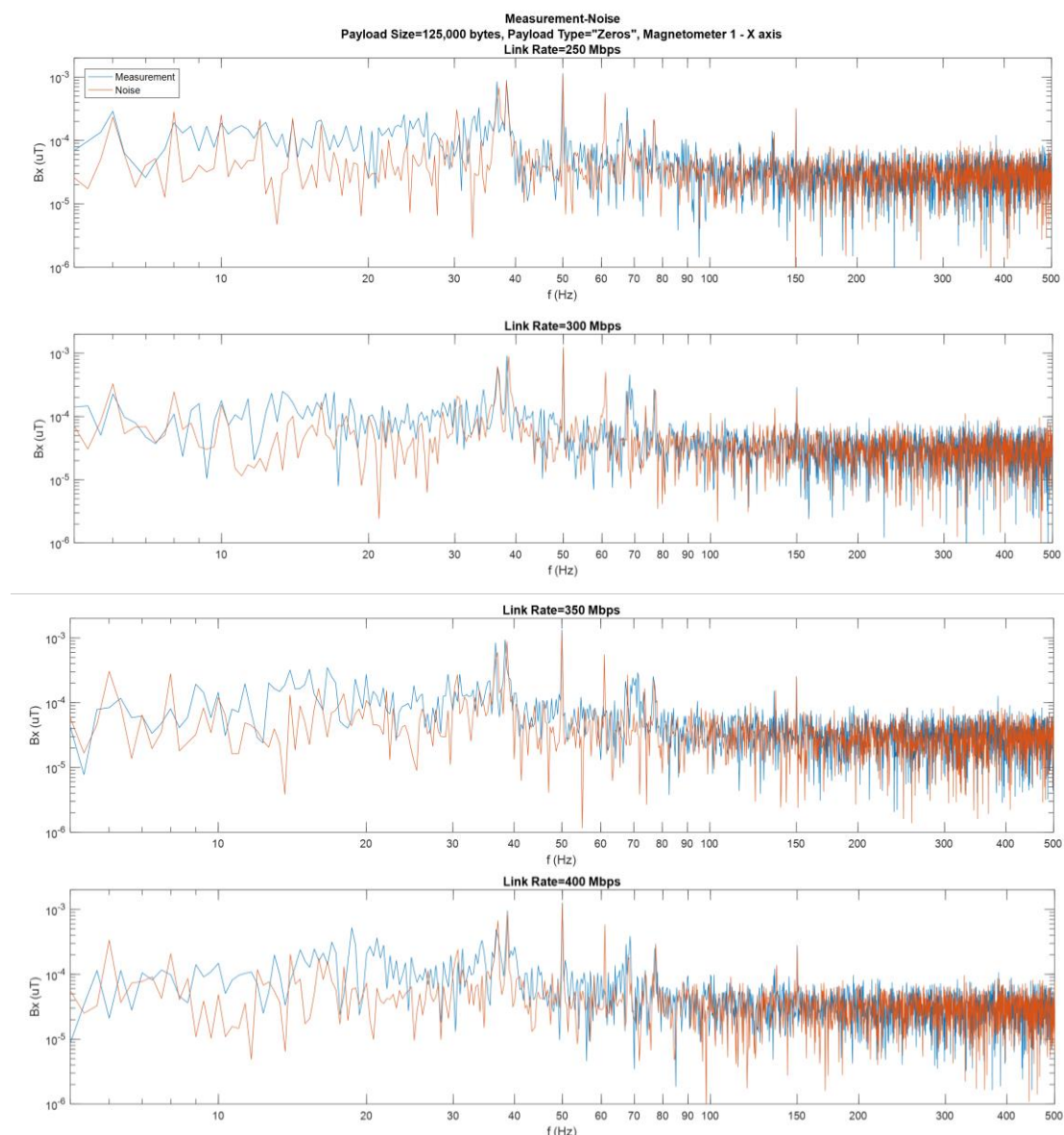
Εικόνα 4-12. Φασματικό περιεχόμενο μετρήσεων περιβάλλοντος πεδίου με τον προσομοιωτή “iSAFT” ενεργοποιημένο και απενεργοποιημένο Μαγνητόμετρο 1, άξονες x, y και z.

Τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης που μεταβάλλονται με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της ζεύξης είναι ο ρυθμός μετάδοσης και το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου των μεταδιδόμενων πακέτων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται πακέτα με ωφέλιμο φορτίο τόσο τυχαίο όσο και αποτελούμενο μόνο από μηδενικά, μήκους από 1 έως 125,000 bytes, καθώς και ρυθμοί μετάδοσης από 10 έως 400 Mbps. Ύστερα από τη διεξαγωγή πλήθους μετρήσεων με τη ζεύξη να λειτουργεί με διάφορους συνδυασμούς αυτών των

χαρακτηριστικών, συμπεραίνεται ότι ο συνδυασμός μεγάλου μήκους πακέτου με υψηλό ρυθμό μετάδοσης οδηγεί στην ανάπτυξη εκπομπών στην περιοχή του φάσματος έως τα 100 Hz περίπου. Οι εκπομπές αυτές παρατηρούνται όταν χρησιμοποιούνται ρυθμοί μετάδοσης υψηλότεροι από 250 Mbps σε συνδυασμό με μήκη ωφέλιμου φορτίου μεγαλύτερα από 100,000 bytes. Επιπλέον, είναι πιο συγκεντρωμένες στο εύρος από 10 έως 30 Hz, ενώ στην υπόλοιπη φασματική περιοχή, μέχρι και τα 100 Hz, εμφανίζονται με αρκετά μειωμένο πλάτος, όπως παρουσιάζεται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 4-13 και Εικόνα 4-14).

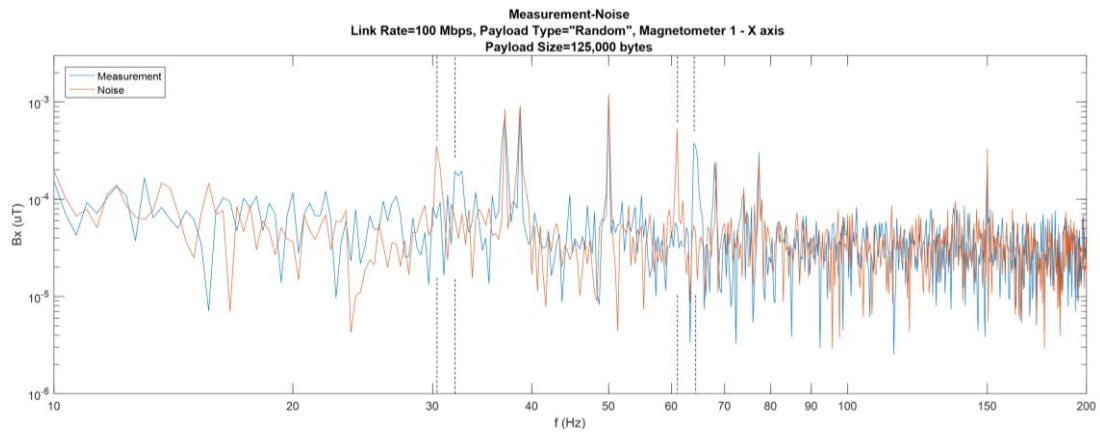


Εικόνα 4-13. Φασματικό περιεχόμενο μέτρησης περιβάλλοντος πεδίου και μέτρησης με τη ζεύξη σε λειτουργία, Μαγνητόμετρο 1, άξονας x
«Τυχαίο» ωφέλιμο φορτίο , μήκους 100,000 bytes, Ρυθμοί μετάδοσης=250, 300, 350 & 400 Mbps.

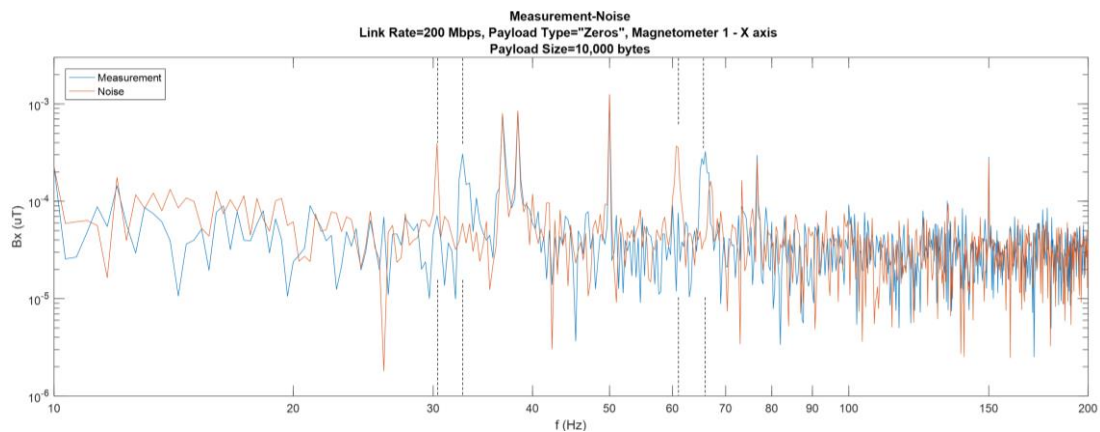


Εικόνα 4-14. Φασματικό περιεχόμενο μέτρησης περιβάλλοντος πεδίου και μέτρησης μαγνητικού πεδίου με τη ζεύξη σε λειτουργία, Μαγνητόμετρο 1, άξονας x «Μηδενικό» ωφέλιμο φορτίο, μήκους 125,000 bytes, Ρυθμοί μετάδοσης=250, 300, 350 & 400 Mbps.

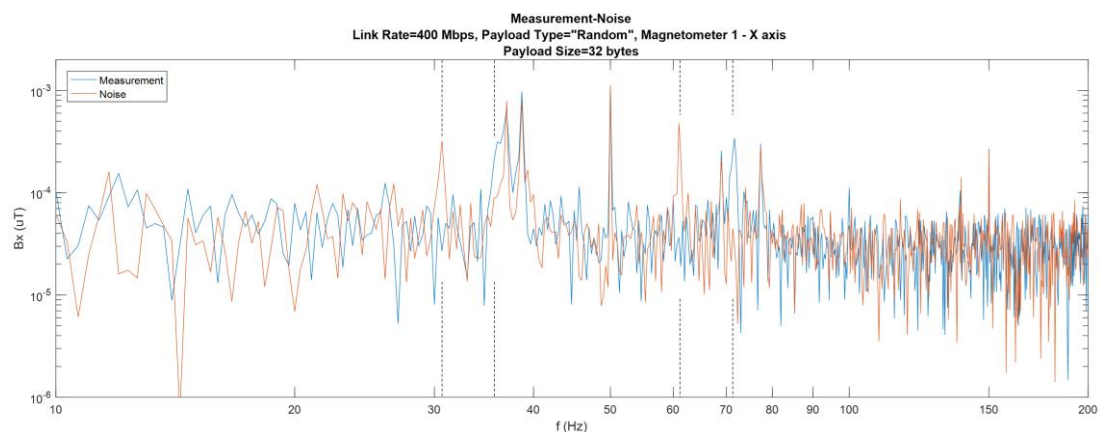
Μία ακόμα ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα παρατήρηση αφορά μία από τις συνιστώσες που προκαλούνται από τη λειτουργία του προσομοιωτή καθώς και τη δεύτερη αρμονική της, συγκεκριμένα τις συνιστώσες στα 30 και 60 Hz αντίστοιχα. Οι συνιστώσες αυτές φαίνεται να μετατοπίζονται στα εύρη 31-37 Hz και 62-74 Hz αντίστοιχα, όταν η ζεύξη τίθεται σε λειτουργία. Η μετατόπιση της πρώτης συνιστώσας δεν είναι πάντα ξεκάθαρη, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις καλύπτεται από το συνολικά αυξημένου πλάτους φάσμα στο εύρος 33-37 Hz, όμως η μετατόπιση της αρμονικής της, λόγω απουσίας άλλων φασματικών συνιστωσών στην περιοχή εμφάνισής της, φαίνεται πιο καθαρά (Εικόνα 4-15, Εικόνα 4-16 & Εικόνα 4-17).



Εικόνα 4-15. Φασματικό περιεχόμενο μέτρησης περιβάλλοντος πεδίου και μέτρησης με τη ζεύξη σε λειτουργία, Μαγνητόμετρο 1, άξονας x «Τυχαίο» ωφέλιμο φορτίο, μήκους 125,000 bytes, Ρυθμός μετάδοσης=100 Mbps.

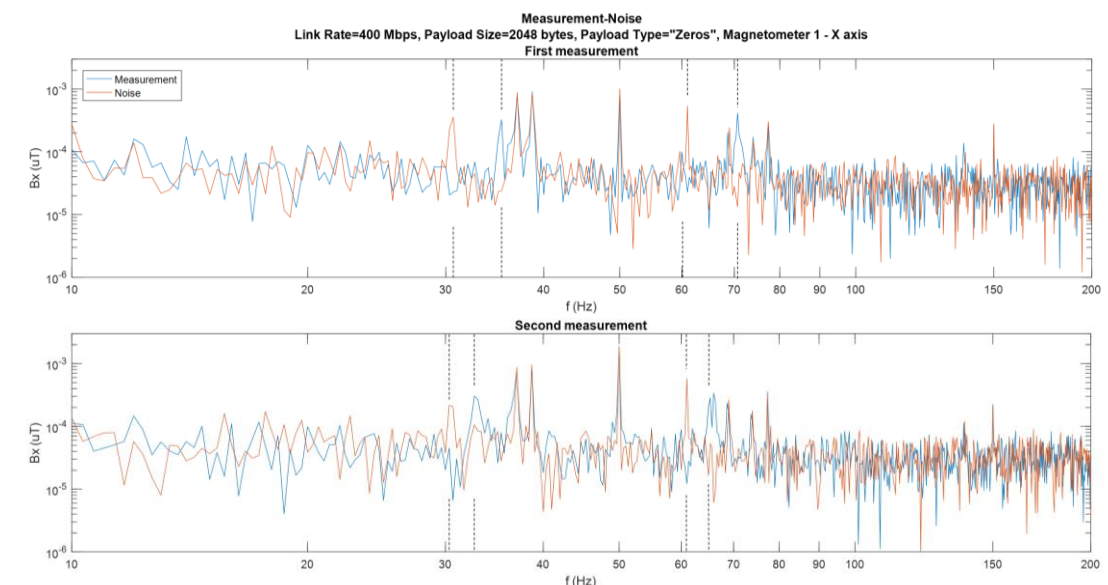


Εικόνα 4-16. Φασματικό περιεχόμενο μέτρησης περιβάλλοντος πεδίου και μέτρησης μαγνητικού πεδίου με τη ζεύξη σε λειτουργία, Μαγνητόμετρο 1, άξονας x «Μηδενικό» ωφέλιμο φορτίο, μήκους 10,000 bytes, Ρυθμός μετάδοσης=200 Mbps.



Εικόνα 4-17. Φασματικό περιεχόμενο μέτρησης περιβάλλοντος πεδίου και μέτρησης μαγνητικού πεδίου με τη ζεύξη σε λειτουργία, Μαγνητόμετρο 1, άξονας x «Τυχαίο» ωφέλιμο φορτίο, μήκους 32 bytes, Ρυθμός μετάδοσης=400 Mbps.

Παρακάτω γίνεται μία προσπάθεια απόδοσης της συμπεριφοράς αυτής σε ορισμένες διεργασίες που πραγματοποιούνται από τον προσομοιωτή. Συγκεκριμένα, ένας μηχανισμός που εξηγεί το φαινόμενο αυτό είναι η μη απενεργοποίηση της ζεύξης κατά τα διαστήματα όπου ο προσομοιωτής δε μεταδίδει πληροφορία, δηλαδή ύστερα από την απλή ενεργοποίησή του και κατά τα διαστήματα μέτρησης του περιβάλλοντος πεδίου. Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο 3^ο κεφάλαιο, είναι πιθανό οι συνιστώσες αυτές να οφείλονται σε επαγόμενα ρεύματα στις αγωγίμες θωρακίσεις και συνεπώς να σχετίζονται με το μεταδιδόμενο δυφιώρρευμα στα συνεστραμμένα ζεύγη. Σε αυτή την περίπτωση, η μετάδοση αποκλειστικά κωδικών ελέγχου "NULL" κατά τα διαστήματα μέτρησης του περιβάλλοντος πεδίου θα μπορούσε να προκαλέσει εμφάνιση αυτών των συνιστωσών σε σταθερές συχνότητες στο φάσμα των μετρήσεων. Αντίθετα, στην περίπτωση που η μετάδοση είναι ενεργοποιημένη, η αποστολή πακέτων διαφορετικού φορτίου σε κάθε μέτρηση θα μπορούσε να μεταβάλλει τις συχνότητες εμφάνισης των συνιστωσών αυτών. Τέλος, η χειροκίνητη εκκίνηση της μετάδοσης από το κάθε άκρο της ζεύξης οδηγεί, λόγω του μηχανισμού ελέγχου ροής, σε διαφορετικό μεταδιδόμενο δυφιώρρευμα σε κάθε περίπτωση, ακόμα και αν τα χαρακτηριστικά της ζεύξης παραμένουν αμετάβλητα. Δεδομένου του παραπάνω, μπορεί να δικαιολογηθεί η εμφάνιση των συνιστωσών αυτών σε διαφορετικές συχνότητες ακόμα και όταν όλα τα χαρακτηριστικά της ζεύξης είναι ίδια (Εικόνα 4-18) και συνεπώς να εξηγηθεί η αδυναμία αναγνώρισης κάποιου μοτίβου μεταξύ των συχνοτήτων εμφάνισης των συνιστωσών αυτών και των χαρακτηριστικών της ζεύξης.



Εικόνα 4-18. Φασματικό περιεχόμενο δύο διαφορετικών ζευγών μετρήσεων περιβάλλοντος πεδίου και μετρήσεων μαγνητικού πεδίου με τη ζεύξη σε λειτουργία, με τα ίδια χαρακτηριστικά μετάδοσης, Μαγνητόμετρο 1, x άξονας «Μηδενικό» ωφέλιμο φορτίο, μήκους 2048 bytes, Ρυθμός μετάδοσης=400 Mbps.

Προφανώς, η παραπάνω ανάλυση αποτελεί μια υπόθεση βασισμένη στις γνώσεις των συγγραφέων επί του θέματος και θα μπορούσε κάλλιστα να μην ανταποκρίνεται εξ'ολοκλήρου στην πραγματικότητα. Θεωρείται εξίσου πιθανό αυτές οι συνιστώσες να προκαλούνται από τη λειτουργία των θυρών της ζεύξης και να μη σχετίζονται με το μεταδιδόμενο δυφίορρευμα, παρόλο που υπάρχουν ενδείξεις για το αντίθετο. Σε κάθε περίπτωση, είτε προκαλούνται από τη μετάδοση μέσω των συνεστραμμένων ζευγών είτε από τις θύρες, η μελέτη τους είναι εξίσου σημαντική καθώς επηρεάζονται από τη λειτουργία της ζεύξης.

Σύνοψη - Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η σχεδίαση μιας ζεύξης σύμφωνα με το πρωτόκολλο SpW, δηλαδή η χρήση διαφορικής σηματοδότησης χαμηλής τάσης καθώς και η συστροφή των χρησιμοποιούμενων ζευγών καλωδίων αλλά και η συστροφή των τεσσάρων συνεστραμμένων ζευγών μεταξύ τους, οδηγεί σε μια σχεδόν ιδανική συμπεριφορά όσον αφορά τις μαγνητικές εκπομπές της. Συγκεκριμένα, δεν παρατηρούνται μαγνητικές εκπομπές για συχνότητες εντός του εύρους 100 Hz – 1.5 kHz. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη φασματικών συνιστωσών εντός των περιοχών συχνοτήτων 30-37 Hz και 60-74 Hz, ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών της μετάδοσης, μπορεί να προκαλέσει σημαντικές παρεμβολές σε όργανα ευαίσθητα σε αυτές της συχνότητες. Επιπροσθέτως, η ύπαρξη περεταίρω εκπομπών εντός της περιοχής συχνοτήτων 10-100 Hz, όταν χρησιμοποιείται υψηλός ρυθμός μετάδοσης σε συνδυασμό με μεγάλο μέγεθος πακέτου στη ζεύξη, είναι απαραίτητο να συνεκτιμάται στη μελέτη της Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα μιας διαστημικής αποστολής. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, πρέπει να ληφθεί υπόψιν, ότι παρόλο που το μετρούμενο πλάτος των εκπομπών φαίνεται ασθενές, δεν αποκλείεται η πιθανότητα ύπαρξης ισχυρότερων μαγνητικών πηγών από αυτές που αναμένονται, λόγω της απόστασης μεταξύ των μαγνητομέτρων και των θυρών ή των συνδέσμων της ζεύξης SpW, που αποτελούν πιθανές περιοχές ανάπτυξης μαγνητικών πηγών κατά τη λειτουργία της ζεύξης. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένη μελέτη της μαγνητικής συμπεριφοράς μιας ζεύξης SpW, θα πρέπει να γίνουν αντίστοιχες μετρήσεις για διαφορετικές διατάξεις ζεύξεων, δηλαδή σχετικές θέσεις της ζεύξης και του επιπέδου αναφοράς που προσομοιώνει το αγωγίμο περίβλημα του διαστημικού σκάφους, καθώς και μετρήσεις με τροποποίηση διαφορετικών χαρακτηριστικών της μετάδοσης. Σχετικά με τη μελέτη των στατικών εκπομπών της ζεύξης, η παρούσα διάταξη δεν διαθέτει την απαιτούμενη διακριτική ικανότητα για να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα, λόγω των διακυμάνσεων που παρατηρούνται στο περιβάλλον στατικό πεδίο. Για αυτές τις διακυμάνσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται η ύπαρξη του κλωβού Faraday και για αυτό το λόγο προτείνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων σε εναλλακτική τοποθεσία με χρήση κατάλληλης παθητικής ή ενεργητικής μαγνητικής θωράκισης, προκειμένου να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα της μετρητικής διάταξης. Ως τελικό σχόλιο, θεωρείται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναδεικνύουν τη δυνατότητα ανάπτυξης παρεμβολών σε μετρήσεις μαγνητικού πεδίου, λόγω της καλωδίωσης ενός διαστημικού οχήματος. Για το λόγο αυτό, μπορούν να λειτουργήσουν ως σημαντικές ενδείξεις για την περεταίρω μελέτη του παραπάνω θέματος, η οποία θεωρείται απαραίτητη δεδομένου των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων για μαγνητική καθαρότητα στις σύγχρονες διαστημικές αποστολές.

Βιβλιογραφία

- [1] ECSS, Standard ECSS-E-50-12A "SpaceWire - Links, nodes, routers and networks", Noordwijk, The Netherlands: ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 24 January 2003.
- [2] ECSS, Standard ECSS-E-ST-50-12C "SpaceWire - Links, nodes, routers and networks", Noordwijk, The Netherlands: ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 31 July 2008.
- [3] ECSS, Standard ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 "SpaceWire - Links, nodes, routers and networks", Noordwijk, The Netherlands: ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 15 May 2019.
- [4] Mag690, Low Cost Three-Axis Magnetic Field Sensor (DS2604/12), Bartington Instruments.
- [5] Operation Manual for PSU1 Power Supply Unit (OM2443/4), Bartington Instruments.
- [6] NI 6351/6353 Specifications, National Instruments.
- [7] iSAFT SpaceWire Simulator Operation Manual Version 1.7, Athens, Greece: TELETEL S.A., March 2018.
- [8] ECSS, Standard ECSS-E-ST-50-53C "SpaceWire - CCSDS packet transfer", Noordwijk, The Netherlands: ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 5 February 2010.
- [9] ECSS, Standard ECSS-E-ST-50-52C "SpaceWire - Remote memory access protocol", Noordwijk, The Netherlands: ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 5 February 2010.
- [10] Standard MIL-STD-461G "Requirements for the control of Electromagnetic Interference characteristics of subsystems and equipment", Department of Defence Interface Standard, 11 December 2015.
- [11] A. D. Bechrakis-Triantafyllos, A. P. Mavropoulou, C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos and C. N. Capsalis, "EMC Assessment on SpaceWire Link ELF Magnetic Behavior for Modelling Purposes," in *IEEE International Conference on Applied Mathematics and Computer Science*, Athens, Greece, 2020.
- [12] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

- [13] NASA, Electrical Grounding Architecture For Unmanned Spacecraft, NASA-HDBK-4001 ed., February 17, 1998.
- [14] ESCC, Detail Specification No. 3902/004, ESA, European Space Components Coordination, October 2014.
- [15] ESCC, Detail Specification No. 3902/003, ESA, European Space Components Coordination, June 2008.
- [16] Product Flyer, Multifunction I/O, National Instruments.
- [17] H. W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [18] C. R. Paul, "Representation of Nonperiodic waveforms," in *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Second ed., New Jersey, John Wiley & sons, 2006.
- [19] N. Hadjigergiou, M. Sophocleous, E. Hristoforou and P. Sotiriadis, "Magnetic Sensors for Space Applications: Development and Magnetic Cleanliness Considerations," in *Electromagnetic Compatibility for Space Systems Design*, C. D. Nikolopoulos, Ed., IGI Global, 2018, pp. 248-283.
- [20] S. Spantideas and N. Kapsalis, "Magnetic Dipole Modeling for DC and Low Frequency AC Magnetic Fields in Space Missions," in *Electromagnetic Comatibility for Space System Design*, C. D. Nikolopoulos, Ed., IGI Global, 2018, pp. 71-114.
- [21] ECSS, SpaceWire protocol identification ECSS-E-ST-50-51C, Noordwijk, The Netherlands: ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 5 February 2010.