



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

**Μελέτη & Μοντελοποίηση Εκπεμπόμενης**  
**Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας Ζεύξης**  
**SpaceWire για Διαστημικές Εφαρμογές**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Ανάργυρος Θ. Μπακλέζος**

**Αθήνα, 2020**





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

**Μελέτη & Μοντελοποίηση Εκπεμπόμενης**  
**Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας Ζεύξης**  
**SpaceWire για Διαστημικές Εφαρμογές**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Ανάργυρος Θ. Μπακλέζος**

**Αθήνα, 2020**





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

**Μελέτη & Μοντελοποίηση Εκπεμπόμενης**  
**Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας Ζεύξης**  
**SpaceWire για Διαστημικές Εφαρμογές**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Ανάργυρος Θ. Μπακλέζος**

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

Χρήστος Καψάλης, Καθηγητής ΕΜΠ (κύριος επιβλέπων)

Παναγιώτης Κωττής, Καθηγητής ΕΜΠ

Γεώργιος Φικιώρης, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή επιτροπή την 23/06/2020

.....  
Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γεώργιος Φικιώρης  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Αθανάσιος Παναγόπουλος  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ιωάννης Τίγκελης  
Καθηγητής ΕΚΠΑ

.....  
Γεώργιος Ματσόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Δήμητρα Κακλαμάνη  
Καθηγήτρια ΕΜΠ

**Αθήνα, 2020**

Copyright © Ανάργυρος Θ. Μπακλέζος, 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.

.....

Ανάργυρος Θ. Μπακλέζος

Διδάκτωρ ΕΜΠ

Φυσικός – Ραδιοηλεκτρολόγος ΕΚΠΑ



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

**Μελέτη & Μοντελοποίηση Εκπεμπόμενης**  
**Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας Ζεύξης**  
**SpaceWire για Διαστημικές Εφαρμογές**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Ανάργυρος Θ. Μπακλέζος**

**Αθήνα, 2020**





# Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη και η μοντελοποίηση της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μιας ζεύξης επικοινωνίας και μεταφοράς δεδομένων βασισμένη στο πρότυπο SpaceWire για χρήση σε μονάδες και συστήματα διαστημικού εξοπλισμού.

Στο πλαίσιο της διατριβής, αρχικά περιγράφεται συνοπτικά το πρότυπο και ιδιαίτερα τα επίπεδα του πρωτοκόλλου, τα οποία διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στις ακτινοβολούμενες εκπομπές. Στη συνέχεια, δίνονται μετρήσεις της ακτινοβολούμενης ακτινοβολίας και του φασματικού περιεχομένου των σημάτων επί του καλωδίου και μελετάται η επίδραση της ταχύτητας ζεύξης και του μήκους της κωδικής λέξης στις φασματικές εκπομπές μιας ημιαμφίδρομης ζεύξης SpaceWire/LVDS. Τέλος, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία μοντελοποίησης ακτινοβολούμενων ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών θωρακισμένης καλωδίωσης λαμβάνοντας υπόψη τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του επιπέδου γείωσης.

Στο *Κεφάλαιο 1* της διατριβής παρουσιάζεται το ευρωπαϊκό πρότυπο ECSS-E-ST-50-12C, όπως εκδόθηκε στις 24 Ιανουαρίου 2003 (αρχικά με την ονομασία ECSS-E-ST-50-12A και στη συνέχεια στις 31 Ιουλίου 2008 μετονομάστηκε ώστε να συμβαδίζει με τα ECSS πρότυπα) και περιγράφει αναλυτικά το πρωτόκολλο SpaceWire. Ειδικότερα, παρουσιάζονται το φυσικό επίπεδο (physical level), το επίπεδο σήματος (signal level), το επίπεδο χαρακτήρα (character level) καθώς και διάφορες τεχνικές γείωσης και δέσμησης (bonding). Επίσης, περιγράφεται συνοπτικά και η αναθεωρημένη έκδοσή του (ECSS-E-ST-50-12C Rev.1), που εκδόθηκε στις 15 Μαΐου 2019, και επικαιροποιεί το πρότυπο.

Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζονται μετρήσεις της ακτινοβολούμενης ακτινοβολίας καθώς και του φασματικού περιεχομένου των σημάτων επί του καλωδίου και μελετάται η επίδραση της ταχύτητας ζεύξης και του μήκους κωδικής λέξης στις φασματικές ακτινοβολούμενες εκπομπές μιας ημιαμφίδρομης ζεύξης SpaceWire/LVDS. Η ζεύξη υλοποιήθηκε με τη χρήση πραγματικού καλωδίου SpaceWire με το ένα άκρο της ζεύξης να αποτελείται από μια γεννήτρια παλμών (σήματος), η έξοδος της οποίας μετατρέπεται σε σήμα LVDS μέσω κατάλληλου τυπωμένου κυκλώματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, και το άλλο άκρο της ζεύξης να είναι τερματισμένο.

Στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζεται μια μεθοδολογία μοντελοποίησης ακτινοβολούμενων ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών θωρακισμένης καλωδίωσης λαμβάνοντας υπόψη τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του επιπέδου γείωσης καθώς και τοποθετήσεις του καλωδίου SpaceWire σε διαφορετικά ύψη πάνω από το επίπεδο γείωσης. Με βάση τις μετρήσεις εξάγονται σημαντικοί παράμετροι του μοντέλου και προβλέπονται οι ακτινοβολούμενες εκπομπές της ζεύξης για διαφορετικά σενάρια υλοποίησής της με αρκετά καλή ακρίβεια.

Στο *Κεφάλαιο 4* γίνεται εφαρμογή της προτεινομένης μεθοδολογίας μοντελοποίησης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στην περίπτωση ζεύξης SpaceWire/LVDS με επίπεδο γείωσης από Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Η διάταξη αυτή συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον για διαστημικές εφαρμογές μιας και αποτελεί την επιλογή καλωδίωσης και γείωσης στην πλειονότητα των διαστημικών αποστολών. Παράλληλα, τα αποτελέσματα που παρατίθενται επιβεβαιώνουν την ισχύ της μεθοδολογίας και καταδεικνύουν τη δυνατότητα εφαρμογής και επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε αρκετά σύνθετα συστήματα.

Στο *Κεφάλαιο 5* παρουσιάζεται μια τροποποιημένη αντιμετώπιση, λαμβάνοντας ως δεδομένο τη διαφορική παλμική σηματοδοσία του προσομοιωμένου συστήματος SpaceWire/LVDS. Εξαιτίας της διαφορικής παλμικής σηματοδοσίας και του φαινομένου της λόξωσης (skew) προτείνεται μια παλμική αναπαράσταση του ρεύματος για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος, η οποία και υλοποιείται με τη βοήθεια του αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution – DE).

Στο *Κεφάλαιο 6* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων μιας πραγματικής αμφίδρομης ζεύξης SpaceWire, η οποία υλοποιείται με τον iSAFT SpaceWire Simulator της TELETEL S.A. Η συγκεκριμένη μονάδα εξοπλισμού υλοποιεί όλα τα επίπεδα της ζεύξης, σε αντίθεση με την υλοποίηση των καρτών τυπωμένου κυκλώματος που χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, και προσφέρει την πλήρη λειτουργικότητα συσκευών που επικοινωνούν μέσω πρωτοκόλλου SpaceWire. Οι μετρήσεις λήφθηκαν για διαφορετικά μήκη ωφέλιμου φορτίου (payload) των πακέτων και διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων της ζεύξης SpaceWire. Τέλος, εξάγεται ένα μοντέλο ικανό να περιγράψει τη συμπεριφορά του συστήματος με ικανοποιητική ακρίβεια, βασισμένο στη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στο *Κεφάλαιο 7* γίνεται ανασκόπηση των αποτελεσμάτων της διατριβής και παρουσιάζονται βήματα για την επέκταση της ερευνητικής εργασίας.

**Λέξεις Κλειδιά:** SpaceWire, LVDS, Μετρήσεις Ηλεκτρικού Πεδίου, Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή, Μοντελοποίηση, Ακτινοβολούμενες Εκπομπές, Διαστημικές Εφαρμογές.

# Abstract

The subject of the thesis is the study and modelling of electromagnetic radiated emissions of a communication and data transfer link based on SpaceWire standard used in units and systems for space applications.

In the thesis, this standard is briefly presented and discussed with main focus on the levels that dominate the radiated emissions. Next, radiated emissions as well as the signal spectrum on the cable measurements are presented and the effect of the link speed and the code word length on the spectral emissions of a half-duplex SpaceWire/LVDS link is considered. Finally, a methodology is proposed to model the electromagnetic radiated emissions of shielded cables taking into account the dielectric characteristics of the ground plane.

Chapter 1 presents the European standard ECSS-E-ST-50-12C as published on January 24 2003 (initially with the name ECSS-E-ST-50-12A and renamed later on July 31 2008 in accordance with ECSS standards) and provides the details for the SpaceWire protocol. In this chapter, the physical level, the signal level and the character level are discussed along with various grounding and bonding techniques. Moreover, a brief introduction is made to the revised edition ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 published on May 15 2019, which brings the standard up to date.

In Chapter 2 the radiated emissions as well as the signal spectrum on the cable measurements are presented and the effect of the link speed and code word length on the spectral emissions of a half-duplex SpaceWire/LVDS link is studied. The link was implemented with a SpaceWire cable and the one end of the link composed by a pulse signal generator whose output is converted to LVDS signal with the aid of a PCB circuit and the other end terminated.

In Chapter 3, a methodology is proposed to model the electromagnetic radiated emissions of shielded cables taking into account the dielectric characteristics of the ground plane as well as various setups of the cable with regards to the relative height of the cable to the ground plane. Measurement data are used to extract valuable model parameters in order to accurately predict the radiated emissions for various implementations with

In Chapter 4, the proposed methodology for modeling the electromagnetic radiated emissions is applied to the case of a SpaceWire/LVDS link above a Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) ground plane. This This setup is of major interest for Space applications, as it becomes the standard harness and grounding design for the majority of space missions. Moreover, the results provided verify the methodology and strongly support its applicability in complex systems.

In Chapter 5, a modified approach is presented, taking into account the pulse excitation of the simulated SpaceWire / LVDS system. Due to the differential pulse signaling and the skew phenomenon, a pulsed representation of the current is proposed to solve the inverse problem, which is implemented with the help of the differential evolution algorithm (Differential Evolution – DE).

In Chapter 6, the measurement results of an actual full-duplex SpaceWire link, implemented with the iSAFT SpaceWire Simulator of TELETEL S.A., are presented. This unit implements all levels of the link, in contrast to the implementation of the printed circuit boards utilized in the previous chapters, and offers the full functionality of SpaceWire devices. Measurements were obtained for various payload lengths of the packets and various data rates of the SpaceWire link. Finally, a model capable of describing the behavior of the system with satisfactory accuracy is extracted, based on the methodology presented in the previous chapters.

Finally, Chapter 7 discusses briefly the next steps of future work in this research field.

**Keywords:** SpaceWire, LVDS, Electric Field Measurements, Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Interference, Modeling, Radiated Emissions, Space Applications.

# Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί επιστέγασμα μιας προσπάθειας αρκετών ετών και η εκπόνησή της δε θα ήταν δυνατή χωρίς τη βοήθεια, στήριξη και συμπαράσταση σημαντικών ανθρώπων.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο επιβλέποντα της διατριβής κ. Χρήστο Καψάλη, Καθηγητή ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου προσέφερε, την εμπιστοσύνη, την αμέριστη βοήθεια και την πολυεπίπεδη στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών. Σημαντικό ρόλο στην επιτυχή έκβαση του πονήματος έπαιξε το ιδιαίτερα ευχάριστο περιβάλλον που υπάρχει στο εργαστήριο που προϊστάται.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές του ΕΜΠ κ.κ. Παναγιώτη Κωττή και Γεώργιο Φικιώρη, που αποτέλεσαν μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής. Οι εύστοχες παρατηρήσεις τους καθόλη τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών συνεισέφεραν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Τίγκελη, Καθηγητή ΕΚΠΑ, μέλος της πενταμελούς επιτροπής και καθηγητή μου στις προπτυχιακές και μεταπτυχιακές μου σπουδές, για τη συνεργασία και την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε ένα προς ένα τα μέλη του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του ΕΜΠ για τις στιγμές που περάσαμε μαζί κατά τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών. Όλες οι εμπειρίες που βιώσαμε, καλές και κακές, ήταν για μένα πολύτιμα μαθήματα που επιλέγω να κρατήσω.

Θα ήταν μεγάλη μου παράλειψη να μην αναφερθώ ξεχωριστά στον μεταδιδάκτορα κ. Χρήστο Νικολόπουλο, συνάδελφο στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων, συνοδοιπόρο στην τρέλα του καθημερινού βίου και αδελφικό φίλο από την εποχή που τα πτυχία ήταν άπιαστα όνειρα. Για την παρακίνηση, την υπομονή και την επιμονή του τον ευχαριστώ θερμά.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη, ηθική και υλική, που μου παρείχε και για τη συμπαράσταση που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια. Ειδικά οι θυσίες των γονέων μου, δεν γίνεται να παραγνωριστούν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω, ίσως, περισσότερο από όλους τη σύζυγό μου Εύη, για την αγάπη της όλα αυτά τα χρόνια, και επιπλέον για την υπομονή και την κατανόηση που μου έδειξε προκειμένου να ολοκληρώσω επιτυχώς τις διδακτορικές μου σπουδές.

Ανάργυρος Θ. Μπακλέζος, 2020



Στη μούζα.....





# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	<b>7</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>9</b>
<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>27</b>
<b>Κεφάλαιο 1</b> .....	<b>29</b>
<b>Το Πρότυπο SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C</b> .....	<b>29</b>
1.1    Ιστορική Αναδρομή.....	30
1.2    Συνοπτική Περιγραφή.....	31
1.3    Φυσικό Επίπεδο (Physical Level) του SpaceWire.....	35
1.3.1    Καλώδια.....	36
1.3.2    Εσωτερικοί Αγωγοί.....	37
1.3.3    Συνεστραμμένο Ζεύγος (Twisted Pair).....	37
1.3.4    Πλήρες Καλώδιο .....	38
1.3.5    Πλεκτή Θωράκιση (Braided Shield).....	39
1.3.6    Σύνδεσμοι (Connectors).....	40
1.3.7    Συναρμολόγημα Καλωδίου .....	41
1.3.8    Ίχνη Πλακέτας Τυπωμένου Κυκλώματος (PCB Tracks). 43	
1.4    SpaceWire Αναθεώρηση 1 .....	43
1.4.1    Σύνδεσμοι.....	44
1.4.2    Συναρμολόγημα Καλωδίου .....	45
1.5    Επίπεδο Σήματος (Signal Level) - Σηματοδοσία LVDS.....	47
1.5.1    Σύντομη Περιγραφή της λειτουργίας Fail-safe της LVDS 49	
1.5.2    Κωδικοποίηση Σήματος .....	49
1.5.3    Ρυθμός Σηματοδοσίας Δεδομένων .....	50
1.5.4    Παράγοντες Συνεισφοράς Λόξωσης (Skew) και Τρόμος Φάσης (Jitter).....	50
1.6    Επίπεδο Χαρακτήρα (Character Level) .....	51
1.6.1    Χαρακτήρες Ελέγχου και Κωδικοί (Control Characters and Codes).....	52
1.6.2    Χαρακτήρες Δεδομένων (Data Characters).....	53

1.6.3	Συγχρονισμός Χαρακτήρων (Character Synchronization)	53
1.7	Τεχνικές Γείωσης & Δέσμησης.....	54
1.8	Συμπεράσματα.....	55
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>		<b>57</b>
<b>Μελέτη της Επίδρασης της Ταχύτητας Ζεύξης και του Μήκους Κωδικής Λέξης στις Φασματικές Εκπομπές Ημιαμφίδρομης Ζεύξης SpaceWire /LVDS.....</b>		<b>57</b>
2.1	Εκπομπές Συστήματος SpaceWire .....	57
2.2	Σχεδιασμός και Υλοποίηση της Διάταξης Μέτρησης .....	61
2.3	Αποτελέσματα Μετρήσεων της Ζεύξης SpW/LVDS .....	65
2.4	Συμπεράσματα.....	72
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>		<b>73</b>
<b>Μοντελοποίηση Ακτινοβολούμενων Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών Θωρακισμένης Καλωδίωσης.....</b>		<b>73</b>
3.1	Εισαγωγή.....	73
3.2	Διατύπωση του Προβλήματος.....	75
3.2.1	Μαθηματικό Υπόβαθρο και Διατύπωση Προβλήματος..	75
3.2.2	Διάγραμμα Ροής του Προτεινομένου Μοντέλου .....	78
3.3	Προκαταρτικές Μετρήσεις & Αποτελέσματα Προσομοιώσεων 80	
3.4	Συμπεράσματα.....	88
<b>Κεφάλαιο 4.....</b>		<b>91</b>
<b>Επαλήθευση της Μεθοδολογίας Μοντελοποίησης Εκπεμπόμενης Ακτινοβολίας στην περίπτωση Ζεύξης SpaceWire/ LVDS με γείωση CFRP .....</b>		<b>91</b>
4.1	Εισαγωγή.....	91
4.2	Σύνοψη Μεθοδολογίας Μοντελοποίησης.....	93
4.3	Υλοποίηση Διάταξης Μέτρησης.....	94
4.4	Μετρήσεις και Αποτελέσματα Μοντελοποίησης.....	95
4.5	Συμπεράσματα.....	101
<b>Κεφάλαιο 5.....</b>		<b>103</b>

<b>Τροποποιημένη Μοντελοποίηση της σηματοδοσίας LVDS επί του καλωδίου SpaceWire με χρήση του Αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης.</b>	<b>103</b>
5.1	Εισαγωγή .....103
5.2	Λόξωση και Φασματική Κατανομή Ρεύματος .....104
5.3	Αλγόριθμος Μοντελοποίησης.....106
5.4	Διαφορική Εξέλιξη & Τροποποιημένος Τυχαίος Εντοπισμός 107
5.5	Μετρήσεις και Αποτελέσματα Μοντελοποίησης.....110
5.6	Συμπεράσματα.....114
<b>Κεφάλαιο 6</b>	<b>115</b>
<b>Μετρήσεις Και Μοντελοποίηση Εκπεμπόμενης Ακτινοβολίας Πραγματικής Πλήρως Αμφίδρομης Ζεύξης SpaceWire</b>	<b>115</b>
6.1	iSAFT SpaceWire Simulator.....115
6.1.1	Επιλογές Διάρθρωσης Συστήματος.....116
6.1.2	Λειτουργία Δημιουργίας Κίνησης Δεδομένων .....118
6.1.3	Λειτουργία Επισκόπησης Στατιστικών .....121
6.1.4	Δημιουργία Κίνησης Δεδομένων για τις Μετρήσεις .....122
6.2	Διάταξη Μετρήσεων .....123
6.3	Αποτελέσματα Μετρήσεων Ακτινοβολούμενων Εκπομπών 126
6.4	Μεθοδολογία Μοντελοποίησης και Σύθεση Μοντέλου.....129
6.5	Συμπεράσματα.....134
<b>Κεφάλαιο 7</b>	<b>137</b>
<b>Επίλογος</b>	<b>137</b>
7.1	Ανακεφαλαίωση - Σημεία στα οποία προάγεται η Επιστήμη 137
7.2	Μελλοντική Εργασία .....140
<b>Κεφάλαιο 8</b>	<b>141</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>141</b>
8.1	Αναφορές .....141
8.2	Δημοσιεύσεις του συγγραφέα βασισμένες στη διατριβή .....146
8.2.1	Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά.....146
8.2.2	Συμμετοχή σε κεφάλαια βιβλίων .....146

8.2.3	Ανακοινώσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια.....	146
8.2.4	Ανακοινώσεις σε εθνικά επιστημονικά συνέδρια.....	146
8.3	Άλλες δημοσιεύσεις του συγγραφέα .....	147
8.3.1	Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά .....	147
8.3.2	Συμμετοχή σε κεφάλαια βιβλίων.....	147
8.3.3	Ανακοινώσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια.....	148

# Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1 - Τα επίπεδα του SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C	33
Σχήμα 2 - Εξαρτήματα φυσικού επιπέδου, Z είναι η αντίσταση τερματισμού 100 Ω	36
Σχήμα 3 - Εγκάρσια τομή της δομής του καλωδίου SpaceWire	36
Σχήμα 4 - Μήκος συστροφής (lay length) [18]	38
Σχήμα 5 - Ελάχιστη αποτελεσματικότητα θωράκισης για τις δύο εκδοχές καλωδίου SpaceWire [17]	40
Σχήμα 6 - Ταυτοποίηση των επαφών του συνδέσμου SpaceWire	41
Σχήμα 7 - Συνδεσμολογία καλωδίου SpaceWire [2]	42
Σχήμα 8 - Αιώρηση τάσης LVDS για αντιστάτη τερματισμού 100 Ω	47
Σχήμα 9 - Κατώφλι εισόδου του δέκτη	47
Σχήμα 10 - Η λειτουργία LVDS [2]	48
Σχήμα 11 - Η κωδικοποίηση Data-Strobe (DS)	50
Σχήμα 12 - Παράγοντες συνεισφοράς στη λόξωση (skew) και τον τρόμο φάσης (jitter)	51
Σχήμα 13 - Χαρακτήρες/κωδικοί ελέγχου & χαρακτήρες δεδομένων[2]	52
Σχήμα 14 - Κάλυψη ισοτιμίας [2]	53
Σχήμα 15 - Ακολουθία bit κατά την εκκίνηση της ζεύξης SpaceWire [2]	53
Σχήμα 16 - Υλοποίηση βασικής διάταξης μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου (κεραία/καλώδιο)	62
Σχήμα 17 - Σχηματικό διάγραμμα του PCB με τον οδηγό LVDS	62
Σχήμα 18 - Υλοποίηση τυπωμένου κυκλώματος (PCB) οδηγού LVDS	63
Σχήμα 19 - Ημιαμφίδρομη λειτουργία	63
Σχήμα 20 - Το PCB του οδηγού LVDS εντός του θωρακισμένου κουτιού	64
Σχήμα 21 - Κυματομορφή του σήματος Data για ακολουθία παλμών 50 MHz μετρημένο από την έξοδο του υλοποιημένου οδηγού LVDS με διαφορικό παλμογράφο.	65

Σχήμα 22 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Data επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 50 MHz	67
Σχήμα 23 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Strobe επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 50 MHz	67
Σχήμα 24 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Data επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 100 MHz	68
Σχήμα 25 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Strobe επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 100 MHz	68
Σχήμα 26 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Data επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 150 MHz	69
Σχήμα 27 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Strobe επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 150 MHz	69
Σχήμα 28 - Συγκριτικές ακτινοβολούμενες εκπομπές για συχνότητα παλμού 50 MHz, ημιαμφίδρομη λειτουργία, κάθετη πόλωση	70
Σχήμα 29 - Συγκριτικές ακτινοβολούμενες εκπομπές για συχνότητα παλμού 100 MHz, ημιαμφίδρομη λειτουργία, κάθετη πόλωση	71
Σχήμα 30 - Συγκριτικές ακτινοβολούμενες εκπομπές για συχνότητα παλμού 150 MHz, ημιαμφίδρομη λειτουργία, κάθετη πόλωση	71
Σχήμα 31 - Βασική διάταξη μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου (κεραία/καλώδιο)	74
Σχήμα 32 - Υπολογισμός ολικού πεδίου κατανομής ρεύματος λόγω ανάκλασης	76
Σχήμα 33 - Μοντελοποίηση με δύο κεραίες οδεύοντος κύματος	76
Σχήμα 34 - Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μοντελοποίησης	79
Σχήμα 35 - Ανηχοϊκός Θάλαμος ΕΜΠ - Βασική διάταξης μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου (κεραία/καλώδιο)	80
Σχήμα 36 - Αποτέλεσμα πρόβλεψης πλάτους ρεύματος για επίπεδο αλουμίνιου μέσω γενετικών αλγορίθμων (GA)	81
Σχήμα 37 - Σύγκριση μετρήσεων ηλεκτρικού πεδίου με αποτελέσματα μοντέλου για επίπεδο αλουμίνιου	82
Σχήμα 38 - Σύγκριση μετρήσεων ηλεκτρικού πεδίου με αποτελέσματα μοντέλου για επίπεδο ξύλου	83
Σχήμα 39 - Μετρικές τεχνικής FSV για ξύλινο επίπεδο (ADM, FDM, and GDM) (EX= Excellent, VG=Very Good, G=Good, F=Fair, P=Poor, VP=Very Poor)	84

Σχήμα 40 - Πρόβλεψη μοντέλου για το ηλεκτρικό πεδίο στην περίπτωση επιπέδου αλουμινίου- ύψος καλωδίου = 10 cm	85
Σχήμα 41 - Πρόβλεψη μοντέλου για το ηλεκτρικό πεδίο στην περίπτωση ξύλινου επιπέδου- ύψος καλωδίου = 10 cm	86
Σχήμα 42 - Μετρικές τεχνικής FSV για επίπεδο αλουμινίου (ADM, FDM, and GDM) (EX= Excellent, VG=Very Good, G=Good, F=Fair, P=Poor, VP=Very Poor)	87
Σχήμα 43 - Μετρικές τεχνικής FSV για ξύλινο επίπεδο (ADM, FDM, and GDM) (EX= Excellent, VG=Very Good, G=Good, F=Fair, P=Poor, VP=Very Poor)	88
Σχήμα 44 - Σύστημα πλήρως αμφίδρομης επικοινωνίας(full -duplex )	94
Σχήμα 45 - Υλοποίηση βασικής διάταξης μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου (κεραία/καλώδιο)	95
Σχήμα 46 - Κατανομή ρεύματος θωράκισης (ταχύτητα επανάληψης παλμών 100 MHz)	96
Σχήμα 47 - Κατανομή ρεύματος θωράκισης (ταχύτητα επανάληψης παλμών 200 MHz)	97
Σχήμα 48 - Σύγκριση ηλεκτρικού πεδίου μοντέλου και μέτρησης για επίπεδο γείωσης CFRP και συχνότητα παλμών 100 MHz	98
Σχήμα 49 - Σύγκριση ηλεκτρικού πεδίου μοντέλου και μέτρησης για επίπεδο γείωσης CFRP και συχνότητα παλμών 200 MHz	98
Σχήμα 50 - Αποτελέσματα μετρικών τεχνικής FSV για επίπεδο CFRP (a. ADM, b. FDM, and c. GDM) (EX= Excellent, VG=Very Good, G=Good, F=Fair, P=Poor, VP=Very Poor)	100
Σχήμα 51 - Διαφορές εκπεμπόμενου ηλεκτρικού πεδίου καλωδίου SpaceWire διατεταγμένου πάνω από επίπεδο γείωσης από αλουμίνιο και CFRP	101
Σχήμα 52 - Το Intra pair skew ως μηχανισμός δημιουργίας εκπομπών του SpaceWire	105
Σχήμα 53 - Τραπεζοειδής παλμός στο πεδίο του χρόνου	105
Σχήμα 54 - Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μοντελοποίησης με κατανομή ρεύματος αποτελούμενης από τέσσερις παλμούς	107
Σχήμα 55 - Η τεχνική μετάλλαξης MRL-DE - Υπολογισμός του διανύσματος μετάλλαξης V1 [54]	109
Σχήμα 56 - Μετρούμενες εκπομπές και η περιβάλλουσα	111

Σχήμα 57 - Κατανομές ρεύματος υπολογισμένες από τα αποτελέσματα της μέτρησης και την περιβάλλουσά τους	111
Σχήμα 58 - Εξέλιξη των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης στις γενεές	112
Σχήμα 59 - Σύγκριση εξαγομένης κατανομής ρεύματος από τον αλγόριθμο MRL-DE με την κατανομή - στόχο από τις μετρήσεις	113
Σχήμα 60 - Σύγκριση ηλεκτρικού πεδίου υπολογισμένου με χρήση του μοντέλου ρεύματος και του ηλεκτρικού πεδίου της μέτρησης (περιβάλλουσα)	113
Σχήμα 61 - Επιλογές διάρθρωσης συστήματος [55]	116
Σχήμα 62 - Επιλογές διάρθρωσης θύρας [55]	117
Σχήμα 63 - Δημιουργίας Κίνησης Δεδομένων iSAFT [55]	118
Σχήμα 64 - Δημιουργία πακέτου SpaceWire [55]	120
Σχήμα 65 - Ομάδα ασύγχρονης μετάδοσης [55]	120
Σχήμα 66 - Ομάδα δημιουργίας κίνησης [55]	121
Σχήμα 67 - Επισκόπηση στατιστικών ζεύξης	122
Σχήμα 68 - Κάτοψη διάταξης μετρήσεων	124
Σχήμα 69 - Πλαϊνή όψη διάταξης μετρήσεων	125
Σχήμα 70 - Αποτελέσματα μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών για ρυθμό δεδομένων 10 Mbps, μέγεθος payload 32 bytes, οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση	126
Σχήμα 71 - Αποτελέσματα μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών για ρυθμό δεδομένων 10 Mbps, μέγεθος payload 2048 bytes, οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση	127
Σχήμα 72 - Αποτελέσματα μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών για ρυθμό δεδομένων 400 Mbps, μέγεθος payload 32 bytes, οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση	128
Σχήμα 73 - Αποτελέσματα μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών για ρυθμό δεδομένων 400 Mbps, μέγεθος payload 2048 bytes, οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση	129
Σχήμα 74 - Το Inter pair skew ως μηχανισμός δημιουργίας εκπομπών του SpaceWire	130
Σχήμα 75 - Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου Μοντελοποίησης με κατανομή ρεύματος αποτελούμενης από έξι παλμούς	132
Σχήμα 76 - Σύγκριση κατανομής ρεύματος από την περιβάλλουσα της μέτρησης και κατανομής ρεύματος από το μοντέλο	133



**Σχήμα 77 - Πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων εκπομπών από το μοντέλο σε σύγκριση με την περιβάλλουσα των αποτελεσμάτων της μέτρησης**

**134**



# Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 - Διαστάσεις American Wire Gauge (AWG)	37
Πίνακας 2 - Συνδεσμολογία καλωδίων σήματος	42
Πίνακας 3 - Τιμές των μέγιστων επιτρεπτών τιμών απώλειας παρεμβολής (insertion loss)	44
Πίνακας 4 - Προδιαγραφές καλωδίου PSNEXT	44
Πίνακας 5 - Προδιαγραφές καλωδίου PSELFEXT	44
Πίνακας 6 - Εξοπλισμός μετρήσεων	65
Πίνακας 7 - Ρυθμίσεις δέκτη EMI (Schaffner SMR 4503)	66
Πίνακας 8 - Διηλεκτρικά χαρακτηριστικά υλικών επιπέδου γείωσης	81
Πίνακας 9 - Τιμές Grade και Spread της Τεχνικής FSV και RMS για ξύλινο επίπεδο και ύψος καλωδίου 5 cm	85
Πίνακας 10 - Τιμές Grade και Spread της τεχνικής FSV και RMS για επίπεδο αλουμινίου και ύψος καλωδίου 10 cm	87
Πίνακας 11 - Τιμές Grade και Spread της τεχνικής FSV και RMS για ξύλινο επίπεδο και ύψος καλωδίου 10 cm	88
Πίνακας 12 - Διηλεκτρικά χαρακτηριστικά υλικών επιπέδου γείωσης [47], [48]	96
Πίνακας 13 - Μοντέλο ρεύματος 4 παλμών	112
Πίνακας 14 - Μοντέλο ρεύματος 6 παλμών	131



# Εισαγωγή

Εφαλτήριο της εργασίας αποτέλεσε η συμμετοχή του συγγραφέα στο ερευνητικό πρόγραμμα “PLATO M3 Phase B1 Definition Study - System support to optical bench harness and grounding design” σε συνεργασία με την ελληνική εταιρεία EMTECH SPACE P.C., όπως αυτό απονεμήθηκε από την εταιρεία Thales Alenia Space Italia (TASI), για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (European Space Agency - ESA) και με επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθηγητή ΕΜΠ, κ. Χρήστο Καψάλη.

Σκοπός του έργου ήταν μεταξύ άλλων η ανάλυση, η μελέτη και η μοντελοποίηση του ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου από ζεύξεις SpW/LVDS παρουσία επιπέδων γείωσης κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά και υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας της ζεύξης.

Στο πλαίσιο του έργου παρασχέθηκαν από τη Thales Alenia Space Italia καλώδιο SpaceWire και φύλλο Carbon-Fiber-Reinforced Polymer (CFRP), κατάλληλο για διαστημικές αποστολές (Space Grade), που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη μετρήσεων, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στα Κεφάλαια 2 έως 5. Αξίζει να αναφερθεί η δυσκολία ανεύρεσης μονάδων εξοπλισμού και γενικότερα υλισμικού για την αξιόπιστη υλοποίηση των ζεύξεων, γεγονός άλλωστε που οδήγησε στην υλοποίηση του συστήματος όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2. Τα ηλεκτρονικά που αναπτύχθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων προσομοιώνουν τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά του SpaceWire εξοπλισμού και αποτέλεσαν μια λειτουργική πρώτη προσέγγιση για την ανάπτυξη του θεωρητικού υποβάθρου καθώς και ένα πρώτο πεδίο εφαρμογής των εργαλείων που αναπτύχθηκαν. Ωστόσο, αρκετά στοιχεία έλειπαν για να είναι δυνατή μια πλήρης εποπτεία και αντιμετώπιση της ζεύξης SpaceWire.

Πολύ αργότερα, στο πλαίσιο της δράσης «1η Προκήρυξη Ερευνητικών Έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση Μεταδιδακτόρων Ερευνητών/Τριών», στην οποία συμμετέχει ο συγγραφέας ως μέλος της ομάδας εργασίας του ερευνητικού έργου «Μοντελοποίηση Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών Διαστημικού Εξοπλισμού για Σκοπούς Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας και Καθαρότητας» με επιστημονικό υπεύθυνο τον Δρ. Χρήστο Νικολόπουλο, κατέστη δυνατή η απόκτηση του εξοπλισμού iSAFT SpaceWire Simulator/Recorder από την TELETEL S.A. Ο iSAFT προσφέρει τη δυνατότητα ρεαλιστικής προσομοίωσης οργάνων και συσκευών SpaceWire σε όλα τα επίπεδα λειτουργίας ενός συστήματος επικοινωνίας - από το φυσικό μέχρι και αυτό του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, καθιστά τα οποιαδήποτε συμπεράσματα και παρατηρήσεις προκύψουν κατά τη χρήση του, άμεσα συνδεδεμένα με τα πραγματικά συστήματα αεροδιαστημικής τα οποία εντέλει προσπαθούν να περιγράψουν. Αν και ο iSAFT κατέστη διαθέσιμος σχετικά αργά στην πορεία της παρούσας εργασίας, συνετέλεσε καθοριστικά στην ολοκλήρωσή της, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6,

για τη λήψη των μετρήσεων, την ανάπτυξη του μοντέλου και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τέλος, σημειώνεται ότι η απόδοση των τεχνικών όρων στην ελληνική γλώσσα έχει γίνει σύμφωνα με τη βάση τηλεπικοινωνιακών όρων TELETERM, που προσφέρεται από τον Οργανισμό Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος (ΟΤΕ), την Ελληνική Εταιρεία Ορολογίας (ΕΛΕΤΟ) και τη Μόνιμη Ομάδα Τηλεπικοινωνιακής Ορολογίας (ΜΟΤΟ). Η επισήμανση αυτή γίνεται, αφού δεν έχει υποπέσει στην αντίληψη του συγγραφέα προγενέστερη απόδοση του προτύπου (ολόκληρο ή έστω τμηματικά) στην ελληνική γλώσσα και οφείλει να αναγνωρίσει τη δυσκολία ενός τέτοιου εγχειρήματος. Οποιαδήποτε σχόλια, υποδείξεις και διορθώσεις είναι ευπρόσδεκτα.

# Κεφάλαιο 1

---

## Το Πρότυπο SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C

Το SpaceWire είναι ένα πρότυπο μεταφοράς δεδομένων υψηλών ταχυτήτων μέσω ζεύξεων επικοινωνίας και δικτύων για χρήση σε μονάδες και συστήματα συσκευών διαστημικού εξοπλισμού. Το SpaceWire καθορίστηκε στο πρότυπο (standard) ECSS-E50-12A [1] της Ευρωπαϊκής Συνεργασίας για την Τυποποίηση του Διαστήματος (European Cooperation for Space Standardization - ECSS) το 2003. Το πρότυπο αυτό συντάχθηκε από την ομάδα εργασίας SpaceWire Working Group με κύριο συντελεστή τον Steve Parkes από το Πανεπιστήμιο του Dundee και συμμετοχές από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA), την ευρωπαϊκή βιομηχανία διαστήματος, διάφορα Πανεπιστήμια και τη National Aeronautics and Space Administration (NASA). Αντικαταστάθηκε από το πρότυπο ECSS-E-ST-50-12C [2] για να διασφαλιστεί ότι το πρότυπο ήταν σε συμφωνία με το νέο αριθμητικό σύστημα ονοματοδοσίας προτύπων ECSS. Δεν υπάρχουν τεχνικές διαφορές ανάμεσα στο περιεχόμενο του ECSS-E-ST-50-12A και του ECSS-E-ST-50-12C και παρουσιάζουν τις ίδιες πληροφορίες [3].

Το πρότυπο προσδιορίζει τα πρωτόκολλα των φυσικών μέσων διασύνδεσης και της επικοινωνίας δεδομένων για να καταστήσει δυνατή την αξιόπιστη αποστολή δεδομένων αναμεσα σε δύο μονάδες με υψηλή ταχύτητα, μεταξύ 2 Mbps και 400 Mbps. Οι ζεύξεις του SpaceWire είναι δισειμιακές (point-to-point), σειριακές (serial) και πλήρως αμφίδρομες (full-duplex). Από τότε που δημοσιεύτηκε πρώτη φορά το πρότυπο SpaceWire από την European Cooperation for Space Standardization, έχει υιοθετηθεί από την ESA, τη NASA, τη Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), και τη Roscosmos State Corporation for Space Activities (ROSCOSMOS) για αρκετές αποστολές και χρησιμοποιείται ευρέως σε μονάδες και συστήματα με εφαρμογές σε διάφορες περιοχές, όπως επιστημονικές, εμπορικές, παρατήρησης της Γης και άλλες. Αποστολές υψηλού προφίλ, που χρησιμοποιούν το πρότυπο SpaceWire, είναι μεταξύ άλλων οι JUICE [4], EUCLID [5], Sentinel-1 [6], Gaia [7], ExoMars [8], Bepi-Colombo [9], GOES-R [10], Lunar Reconnaissance Orbiter [10], ASTRO-H [11], GOCE [12] και James Webb Space Telescope [12], [13].

Η ανάγκη για εφαρμογές, που χρειάζεται να επεξεργάζονται δεδομένα επί του διαστημικού σκάφους ή του δορυφόρου, αποτέλεσαν την αφορμή για την ανάπτυξη της τεχνολογίας SpaceWire. Το πρότυπο παρέχει μια επίσημη βάση για την εκμετάλλευση του SpaceWire σε ένα ευρύ φάσμα των συστημάτων επεξεργασίας επί του σκάφους (on-board). Ένα παράδειγμα είναι η ενσωμάτωση και η δοκιμή πολύπλοκων on-board υποσυστημάτων με

παράλληλη υποστήριξη του εξοπλισμού εδάφους, τα οποία συνδέονται κατευθείαν στο on-board υποσύστημα διαχείρισης δεδομένων. Το SpaceWire επιδιώκει να προσφέρει συμβατότητα εξοπλισμού και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης εξαρτημάτων και υποσυστημάτων. Καθίσταται δηλαδή δυνατή η απευθείας σύνδεση ενός εξαρτήματος, που κατασκευάστηκε για ένα υποσύστημα, σε ένα άλλο και η λειτουργία του χωρίς προβλήματα, με αποτέλεσμα να γίνεται χωρίς τροποποιήσεις χρήση συστημάτων σε μία αποστολή που είχαν αναπτυχθεί για άλλη αποστολή, μειώνοντας έτσι το κόστος ανάπτυξης, προσφέροντας αρχιτεκτονική ευελιξία, βελτιώνοντας την αξιοπιστία και κυρίως αυξάνοντας σημαντικά το επιστημονικό έργο που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα πρόγραμμα με περιορισμένο προϋπολογισμό.

Από την έκδοση του προτύπου ECSS-E-ST-50-12C [2], η κοινότητα επιστημόνων και μηχανικών έχει εφαρμόσει τις κατευθυντήριες γραμμές που αυτό υπαγορεύει σε πολλές αποστολές. Οι διάφορες πρακτικές εφαρμογές του επισήμαναν τις βέλτιστες πρακτικές καθώς και διάφορα προβλήματα. Διαφορετικές εφαρμογές έχρηζαν διαφορετικών σχεδιασμών, μερικοί από τους οποίους ήταν δύσκολο να εφαρμοστούν διατηρώντας παράλληλα τη συμμόρφωση με το πρότυπο. Το γεγονός αυτό οδήγησε το 2012 την European Cooperation for Space Standardization να αρχίσει να ενημερώνει το πρότυπο συμπεριλαμβάνοντας τόσο την παρελθούσα εμπειρία όσο και τις μελλοντικές ανάγκες. Το Working Group ECSS-E-ST-50-12C Rev. 1 WG. προετοίμασε την αναθεώρηση 1 (revision 1) [14] του προτύπου, η οποία και εκδόθηκε στις 15 Μαΐου 2019. Το αναθεωρημένο πρότυπο [14] αποτελεί μια ξεκάθαρη δήλωση ως προς την κατεύθυνση στην οποία θέλει να πορευτεί το πρότυπο, την εξέλιξή του δηλαδή για ενσωματώσει τα ισχυρά σημεία των προκατόχων του και να ξεπεράσει τις όποιες αδυναμίες των προηγούμενων εκδόσεων.

Το προσωπικό (τεχνικό και μη), που δραστηριοποιείται στον χώρο των διαστημικών αποστολών, είναι δεδομένο ότι σε κάποιο βαθμό θα κληθεί να αντιμετωπίσει υλοποιήσεις συστημάτων που ακολουθούν το πρότυπο SpaceWire, ειδικά αν ληφθεί υπόψη η ευρεία χρήση του. Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας γενικότερα και συγκεκριμένα του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει συνοπτικά το πρότυπο SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C και ειδικά τα χαρακτηριστικά του, τα οποία παίζουν ρόλο σε προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) και ατρωσίας. Θα γίνει μια προσπάθεια επισήμανσης των σταδίων του προτύπου, τα οποία καθορίζουν τη συμπεριφορά ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας του συστήματος.

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Προτού υπάρξει ένα πρότυπο για διασύνδεση μονάδων, οι κατασκευαστές συσκευών διαστημικού εξοπλισμού χρησιμοποιούσαν ο καθένας τον δικό του, διαφορετικό, δίαυλο επικοινωνίας. Ως αποτέλεσμα, σε



κάθε συσκευή διαστημικού εξοπλισμού χρησιμοποιούνταν πολλές διαφορετικές ζεύξεις επικοινωνίας, αυξάνοντας το κόστος και τον χρόνο που απαιτούνταν για την ενσωμάτωση και τις δοκιμές της συσκευής. Υπήρχε ξεκάθαρη ανάγκη για μία καθορισμένη-τυποποιημένη διεπαφή (interface) επικοινωνίας για τις on-board συσκευές, η οποία θα καθιστούσε πιο απλή την ανάπτυξη συσκευών διαστημικού εξοπλισμού.

Το 1992 ξεκίνησε το πρόγραμμα που στη συνέχεια κατέληξε στο SpaceWire. Εκείνη την εποχή υπήρχε αξιοσημείωτο ενδιαφέρον για συστήματα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος υψηλής απόδοσης, ενώ παράλληλα οι συσκευές με μονό τσιπ (single-chip) δεν μπορούσαν να καλύψουν τις απαιτήσεις. Έτσι, ξεκίνησε έρευνα για τη χρήση της παράλληλης επεξεργασίας, η οποία τελικά κατέληξε σε έρευνα ενός δικτύου διασύνδεσης για τις ανεξάρτητες μονάδες επεξεργασίας. Μελετήθηκε ο Inmos Transputer, ένας επεξεργαστής σχεδιασμένος για παράλληλη επεξεργασία, ενώ οι σειριακοί σύνδεσμοι επικοινωνίας, που αναπτύχθηκαν για τον T9000 Transputer, αναγνωρίστηκαν ως ελκυστική λύση για την on-board δικτύωση σε σκάφη διαστήματος. Έτσι, η συγκεκριμένη τεχνολογία σειριακών ζεύξεων εκδόθηκε στη συνέχεια ως το πρότυπο IEEE 1355-1995. Αναπτύχθηκαν αρκετές συσκευές με ανοχή στη ραδιενέργεια χρησιμοποιώντας το πρότυπο IEEE 1355-1995, το οποίο υιοθετήθηκε σε κάποιες διαστημικές αποστολές. Παρόλα αυτά υπήρχαν αρκετά προβλήματα με το συγκεκριμένο πρότυπο, τα οποία έπρεπε να λυθούν ώστε να ήταν δυνατή η περαιτέρω χρήση της τεχνολογίας αυτής σε διαστημικά σκάφη της ESA. Το Πανεπιστήμιο του Dundee έλαβε συμβόλαιο από την ESA για να εξετάσει και να λύσει αυτά τα προβλήματα, αποτέλεσμα του οποίου ήταν το πρότυπο SpaceWire, του οποίου ακολουθεί σύντομη περιγραφή [15].

## 1.2 Συνοπτική Περιγραφή

Οι ζεύξεις του SpaceWire είναι ζεύξεις δεδομένων σημείο προς σημείο (point-to-point), οι οποίες συνδέουν έναν κόμβο του SpaceWire με έναν άλλο κόμβο ή με έναν μεταγωγέα (switch). Η πληροφορία μεταφέρεται παράλληλα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Οι σύνδεσμοι είναι αμφίδρομοι (full-duplex) και ικανοί να λειτουργούν σε ταχύτητες μεταξύ 2 Mbps και 400 Mbps.

Το πρότυπο SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C [2] χρησιμοποιεί διαφορετική σηματοδότηση χαμηλής τάσης (Low-Voltage Differential Signaling, LVDS), η οποία έχει καθοριστεί στο ANSI/TIA/EIA-644, Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling Interface Circuits [16], ως το φυσικό επίπεδο λόγω της δυνατότητάς του για σημείο προς σημείο επικοινωνία υψηλής ταχύτητας με χαμηλή ισχύ και μικρό θόρυβο.

Η πληροφορία αποστέλλεται μέσω της ζεύξης ως σειριακή ροή δυφίων (bit) με τη χρήση δύο σημάτων, των Data (D) και Strobe (S). Το πρότυπο ANSI/TIA/EIA-644 απαιτεί και τα δύο σήματα, Data και Strobe, να οδηγούνται μέσω της ζεύξης χρησιμοποιώντας LVDS και να

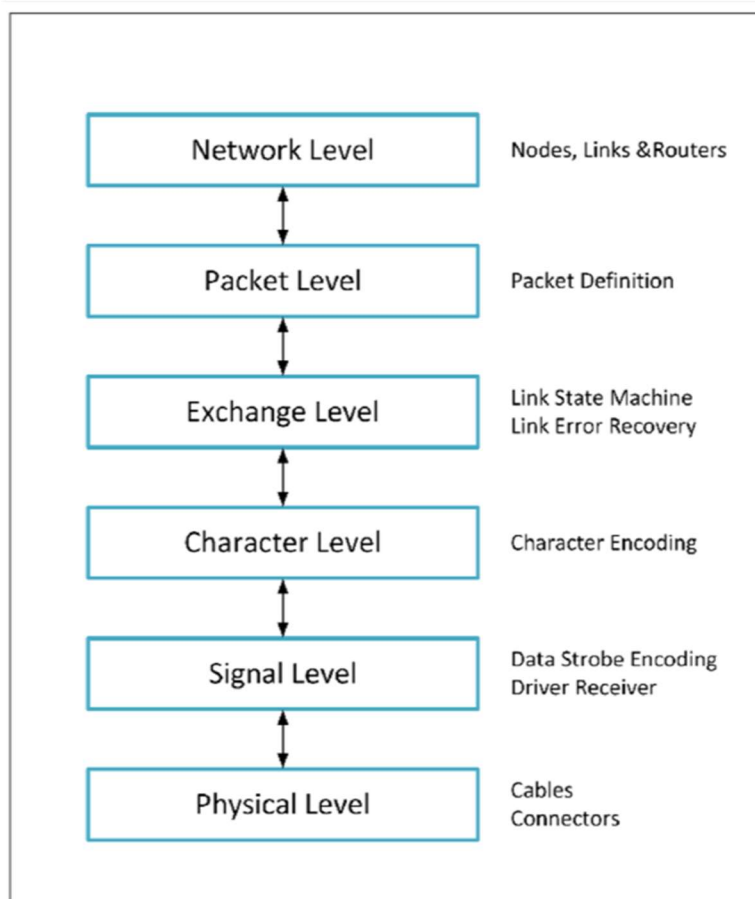
χρησιμοποιούνται δύο καλώδια για κάθε σήμα. Έτσι, το καλώδιο SpaceWire περιέχει τέσσερα μονωμένα καλώδια συνεστραμμένου ζεύγους, ένα για κάθε σήμα (D ή S) για κάθε κατεύθυνση.

Το SpaceWire επιτυγχάνει συγχρονισμό δυφίου (bit synchronization) στέλνοντας ένα σήμα ρολογιού (clock) μαζί με τα σειριακά δεδομένα. Για να μειωθεί η μέγιστη απαίτηση για τη λόξωση (skew) ανάμεσα στα σήματα δεδομένων και ρολογιού, το σήμα ρολογιού είναι κωδικοποιημένο μέσα σε ένα σήμα Strobe έτσι ώστε μια συνάρτηση XOR που δρα πάνω στα σήματα Data και Strobe να παράγει (ανακτά) το σήμα ρολογιού. Τα δεδομένα προς αποστολή μεταδίδονται ως μια ροή από στοιχειώδεις χαρακτήρες. Ο συγχρονισμός των χαρακτήρων γίνεται μόνο κατά την εκκίνηση της ζεύξης. Η ανίχνευση λαθών ισοτιμίας (parity errors) σημαίνει ότι έχει χαθεί ο συγχρονισμός των χαρακτήρων και η μόνη λύση για την ανάκτηση του συγχρονισμού είναι η επανεκκίνηση της ζεύξης.

Υπάρχει ένας απλός μηχανισμός για να ξεκινήσει η ζεύξη, να συνεχίσει να τρέχει, να αποστέλλονται δεδομένα μέσω της ζεύξης, να εξασφαλιστεί ότι τα δεδομένα θα αποσταλούν μόνο αν το άλλο άκρο της ζεύξης είναι έτοιμο, και να ανακάμψει από τυχόν λάθη της ζεύξης. Χρησιμοποιείται μια μηχανή καταστάσεων ζεύξης (link state machine) της διεπαφής SpaceWire, που είναι διαφανής στην εφαρμογή του χρήστη και παρακολουθεί και διαχειρίζεται όλες αυτές τις λειτουργίες.

Το πρωτόκολλο SpaceWire αποτελείται από 6 επίπεδα (levels) ή στρώματα (layers), όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 1:

- **Φυσικό Επίπεδο (Physical Level):** Καθορίζει τους συνδέσμους, τα καλώδια, τη συναρμολόγηση καλωδίων κ.α.
- **Επίπεδο Σήματος (Signal Level):** Καθορίζει την κωδικοποίηση, τα επίπεδα τάσης, τα όρια θορύβου και τον ρυθμό σηματοδότησης.
- **Επίπεδο Χαρακτήρα (Character Level):** Καθορίζει τα δεδομένα και ελέγχει τους χαρακτήρες που χρησιμοποιούνται για να διαχειριστούν τα δεδομένα διαμέσου μιας ζεύξης.
- **Επίπεδο Ανταλλαγής (Exchange Level):** Καθορίζει το πρωτόκολλο για τον συγχρονισμό της ζεύξης, ελέγχει τη ροή, ανιχνεύει και ανακάμπτει από λάθη της ζεύξης.
- **Επίπεδο Πακέτου (Packet Level):** Διαχειρίζεται την πακετοποίηση (packetization) των δεδομένων και τη μετάδοσή τους μέσω μιας ζεύξης SpaceWire.
- **Επίπεδο Δικτύου (Network Level):** Καθορίζει τη δομή του δικτύου SpaceWire και τους κόμβους μεταφοράς δεδομένων από την πηγή προς τον προορισμό. Επιπλέον, καθορίζει τα λάθη της ζεύξης και τη διαχείριση λαθών του επιπέδου δικτύου.



**Σχήμα 1 - Τα επίπεδα του SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C**

Το φυσικό επίπεδο του SpaceWire χρησιμοποιεί LVDS σηματοδότηση κωδικοποιημένη σε Data-Strobe (DS) για να μεταδώσει δεδομένα σειριακά και πλήρως αμφίδρομα. Το ANSI/TIA/EIA-644 καθορίζει μόνο το επίπεδο των ηλεκτρικών σημάτων και όχι το πρωτόκολλο. Αντί αυτού, το πρωτόκολλο καθορίζεται από το πρότυπο SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C. Το LVDS είναι μία μέθοδος για αμφίδρομη μετάδοση μέσω διαφορικού μέσου χρησιμοποιώντας αιώρηση σήματος (signal swing) χαμηλής τάσης με τη χρήση ενός οδηγού (driver) και ενός δέκτη (receiver). Η τιμή του σήματος δεδομένων (Data) μεταδίδεται απευθείας και το σήμα Strobe αλλάζει κατάσταση, όταν το σήμα Data παραμένει αμετάβλητο από το ένα δυψίο στο επόμενο. Μία συνάρτηση XOR, η οποία εφαρμόζεται στα σήματα Data και Strobe, επιστρέφει το ρολόι του σήματος. Υπάρχει μια μικρή καθυστέρηση μεταξύ των ακμών των S και D και του ανακτηθέντος ρολογιού. Το Data είναι κωδικοποιημένο κατά το σχήμα Non Return to Zero (NRZ) και έτσι ένα ρολόι των 100 MHz ισοδυναμεί με ρυθμό δεδομένων 200 Mbps.

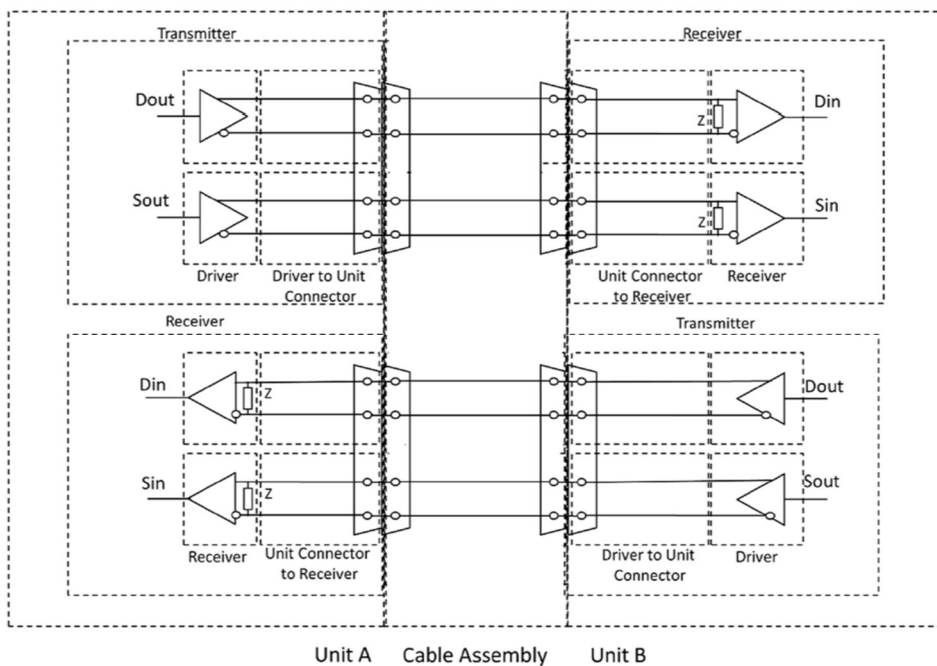
Δύο κατηγορίες χαρακτήρων καθορίζονται στο πρότυπο ECSS-E-ST-50-12C, οι χαρακτήρες δεδομένων και οι χαρακτήρες ελέγχου. Οι χαρακτήρες αυτοί καθορίζονται περαιτέρω ως είτε χαρακτήρες ζεύξης είτε κανονικοί χαρακτήρες. Το επίπεδο ανταλλαγής (exchange level) δεν επιτρέπει σε χαρακτήρα ζεύξης να περάσει στο επίπεδο πακέτου (packet level) με αποτέλεσμα ο χαρακτήρας ζεύξης να μη εισέρχεται στον χώρο μνήμης του κόμβου SpaceWire. Χαρακτήρες ζεύξης είναι το αδειοδοτικό ελέγχου ροής (Flow Control Token - FCT), οι χαρακτήρες διαφυγής (ESCAPE characters - ESC), ο κωδικός ελέγχου μηδενισμού (NULL control code – ένας χαρακτήρας ESC ακολουθούμενος από FCT), οι χαρακτήρες κωδικών χρόνου (time code characters – χαρακτήρας ESC ακολουθούμενο από χαρακτήρα δεδομένων). Ένας κανονικός χαρακτήρας τελειώνει με EOP (End Of Packet) ή EEP (Error End of Packet) και περνάει από το δίκτυο SpaceWire σε επίπεδο πακέτου. Οι χαρακτήρες δεδομένων περιέχουν ένα bit ισοτιμίας, σημαία ελέγχου δεδομένων (data-control flag) και μία τιμή δεδομένων αποτελούμενη από 8 bit μεταδιδόμενη από το λιγότερο σημαντικό δυψίο (LSB) στο περισσότερο σημαντικό δυψίο (MSB). Το ζυγό ή μονό bit ισοτιμίας υπολογίζεται προσθέτοντας τον αριθμό των μονάδων ("1") που περιέχονται στα 8-bit δεδομένων. Αν δηλαδή το σύνολο των μονάδων είναι ζυγός αριθμός, τότε ο χαρακτήρας δεδομένων λέγεται ότι έχει ζυγή ισοτιμία. Υπάρχουν δύο χαρακτήρες ελέγχου, οι οποίοι σχηματίζονται χρησιμοποιώντας χαρακτήρες ελέγχου και χαρακτήρες δεδομένων, οι χαρακτήρες NULL και time code. Οι χαρακτήρες NULL χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αλληλουχίας αρχικοποίησης και όταν δεν στέλνονται δεδομένα ώστε να μένουν ενεργές οι γραμμές SpW/LVDS. Οι κώδικες χρόνου (time codes) χρησιμοποιούνται για την κατανομή χρόνου του συστήματος, αλλά η χρήση τους είναι προαιρετική.

Το επίπεδο ανταλλαγής (exchange level) καθορίζει τους μηχανισμούς για την αρχικοποίηση ζεύξεων, τον έλεγχο ροής των ζεύξεων καθώς και την ανίχνευση και ανάκαμψη από λάθη. Η μηχανή καταστάσεων (state machine) προκαλεί τη ζεύξη SpW να επιχειρεί συνεχώς να κάνει αρχικοποίηση όσο η ζεύξη είναι ενεργή. Λάθη αποσύνδεσης ανιχνεύονται αφού παρέλθουν 850 ns χωρίς να υπάρξει μετάβαση (αλλαγή κατάστασης) των Data και Strobe. Ένα σφάλμα ισοτιμίας εντοπίζεται, όταν λαμβάνεται το πρώτο bit του επόμενου χαρακτήρα, και τότε αρχίζει η ανάκαμψη της ζεύξης. Η αρχικοποίηση εκτελείται στην αρχική έναρξη της ζεύξης ή σε επανεκκίνηση, όταν εντοπίζεται σφάλμα (σφάλμα ισοτιμίας - parity error, σφάλμα διαφυγής - escape error, κ.α.) ή όταν συμβεί αποσύνδεση της ζεύξης. Υπό κανονική λειτουργία, ένας κεντρικός κόμβος του SpaceWire διαχειρίζεται δεδομένα στέλνοντας αδειοδοτικά (tokens) σε έναν κόμβο προορισμού στο άλλο άκρο της ζεύξης. Κάθε token δείχνει στον κόμβο προορισμού ότι ο κεντρικός κόμβος έχει διαθέσιμο προσωρινό αποθηκευτικό χώρο-καταχωρητή (buffer) 8 δυψιοσυλλαβών (bytes). Ο κόμβος προορισμού έχει έναν αντίστοιχο μετρητή, ο οποίος καταγράφει κάθε ληφθέν token. Ο κόμβος προορισμού τότε μπορεί να στείλει δεδομένα στον κεντρικό κόμβο ανάλογα με τα token του προσωρινού καταχωρητή που έχει λάβει.

Τα πακέτα SpaceWire έχουν πολύ ευέλικτη μορφή. Κάθε πακέτο απλά χρειάζεται μια διεύθυνση προορισμού, το φορτίο (cargo) και έναν σημαντήρα τέλους πακέτου (End Of Packet marker - EOP), που σηματοδοτεί το τέλος της μετάδοσης του φορτίου. Η διεύθυνση προορισμού αποτελείται από τον αναγκαίο αριθμό bytes των χαρακτήρων δεδομένων που αντιπροσωπεύουν το μονοπάτι προορισμού του πακέτου, και το φορτίο αποτελείται από τα δεδομένα προς μεταβίβαση χωρίς περιορισμό ως προς το μέγεθος ή τη μορφή τους. Το SpaceWire υποστηρίζει ρυθμό δεδομένων από 2 Mbps έως 400 Mbps. Τα πακέτα ταξιδεύουν μέσα από ένα δίκτυο αποτελούμενο από κόμβους, ζεύξεις και δρομολογητές (routers). Οι κόμβοι SpaceWire μπορεί να είναι δρομολογητές, αισθητήρες, μονάδες μνήμης, επεξεργαστές και υποσυστήματα τηλεμετρίας. Οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν την πηγή και τον προορισμό των πακέτων του SpaceWire και παρέχουν τη διεπαφή για τα συστήματα εφαρμογών. Το πρότυπο SpaceWire υποστηρίζει δρομολόγηση (routing) wormhole, path addressing, logical addressing και group adaptive routing για δικτύωση. Τοπολογίες, όπως καταναμημένα (distributed) και κεντρικοποιημένα (centralized) δίκτυα, προσδίδουν μεγάλη ελευθερία σχεδίασης. Τα καταναμημένα δίκτυα χρειάζονται υποχρεωτικά πίνακες αναζήτησης (look-up tables) για να διαρθρωθούν και να παρέχουν χαμηλότερη μάζα καλωδίωσης (harness mass), καλή επίδοση διεκπεραιωτικότητας (throughput) και αυξημένη αξιοπιστία μέσα από εφεδρικές (πλεονάζουσες) διαδρομές. Ο σχεδιασμός δικτύου με πλεονάζουσες διαδρομές εξασφαλίζει ότι το σύστημα θα παραμείνει λειτουργικό ακόμα και αν ένα ή περισσότερα εξαρτήματα του συστήματος χαλάσουν. Τα κεντρικοποιημένα δίκτυα απαιτούν μεγαλύτερη μάζα καλωδίωσης και προσφέρουν μεγάλη επίδοση διεκπεραιωτικότητας (throughput) και απλή διάρθρωση. Ωστόσο, παρουσιάζουν ισχυρή εξάρτηση από τον κεντρικό δρομολογητή, έτσι χαρακτηρίζονται από μειωμένη ανοχή σε βλάβες (fault tolerance).

### **1.3 Φυσικό Επίπεδο (Physical Level) του SpaceWire**

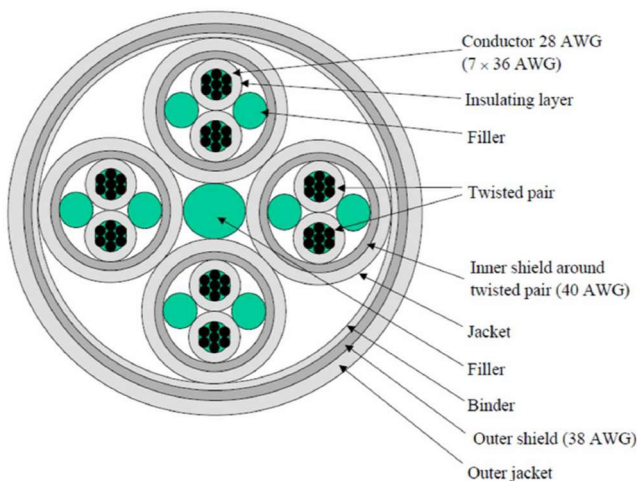
Το φυσικό επίπεδο του προτύπου SpaceWire περιλαμβάνει καλώδια, συνδέσμους (connectors), καλωδικά συναρμολογήματα (cable assemblies) και ίχνη πλακετών τυπωμένου κυκλώματος (Σχήμα 2). Το SpaceWire αναπτύχθηκε για να πληροί τις EMC προδιαγραφές ενός τυπικού διαστημικού σκάφους. Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν μερικές πληροφορίες για την κατασκευή του καλωδίου και των συνδέσεων ώστε να γίνει πιο σαφής η δομή του φυσικού επιπέδου.



**Σχήμα 2 - Εξαρτήματα φυσικού επιπέδου, Z είναι η αντίσταση τερματισμού 100 Ω**

### 1.3.1 Καλώδια

Ένα τυπικό καλώδιο SpaceWire κατασκευάζεται σύμφωνα με το πρότυπο ESCC 3902/003 [17] και αποτελείται από τέσσερα καλώδια συνεστραμμένους ζεύγους με ξεχωριστή θωράκιση γύρω από κάθε ζεύγος και μια ολική θωράκιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 [2].



**Σχήμα 3 - Εγκάρσια τομή της δομής του καλωδίου SpaceWire**

### 1.3.2 Εσωτερικοί Αγωγοί

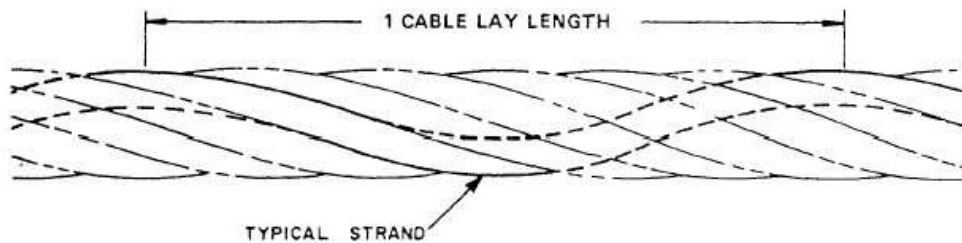
Κάθε σύρμα μεταφοράς σήματος (signal wire) είναι διαμέτρου 28 AWG (American Wire Gauge), αποτελούμενο από επτά νήματα των 36 AWG κράματος χαλκού μεγάλης αντοχής επιστρωμένα με άργυρο. Το ελάχιστο πάχος της επιστρώσης αργύρου είναι 2  $\mu\text{m}$ . Η μέγιστη επιτρεπτή DC αντίσταση του εσωτερικού αγωγού είναι 256  $\Omega/\text{km}$ . Κάθε σύρμα σήματος είναι μονωμένο με λευκό διογκωμένο μικροπορώδες πολυτετραφθοροαιθυλενίο (PolyTetraFluoro-Ethylene - PTFE) χωρίς άλλα προσθετικά, εκτός από αυτά που είναι αναγκαία για την επεξεργασία και τον χρωματισμό του [1], [2], [17]. Στο [17] παρουσιάζονται δύο παρόμοιες εκδοχές της τεχνικής κατασκευής με τη διαφορά της διαμέτρου του σύρματος σήματος στον εσωτερικό αγωγό. Στην εκδοχή 2 η διάμετρος είναι 26 AWG, επομένως όλες οι διαστάσεις είναι ελαφρά μεγαλύτερες. Μιας και το ECSS-E-ST-50-12C προηγείται χρονικά της [17] δεν υπάρχει αναφορά της εκδοχής 2 στο πρότυπο, οπότε σε αυτή την εργασία θεωρείται ότι γίνεται αναφορά στην εκδοχή 1 (διάμετρου 28 AWG). Σε αυτό το σημείο διευκρινίζεται ότι η εκδοχή 1 της [17] είναι πανομοιότυπη με αυτήν των [1] και [2]. Ο Πίνακας 1 παραθέτει τις διαμέτρους σε χιλιοστά του μέτρου των διαφόρων μεγεθών AWG που αναφέρονται στην παρούσα διατριβή.

**Πίνακας 1 - Διαστάσεις American Wire Gauge (AWG)**

AWG #	Διάμετρος σε mm
26	0.4049
28	0.3211
36	0.1270
38	0.1007
40	0.0799

### 1.3.3 Συνεστραμμένο Ζεύγος (Twisted Pair)

Η χαρακτηριστική εμπέδηση κάθε διαφορικού ζεύγους σήματος είναι διαφορικής εμπέδησης  $(100 \pm 6) \Omega$  με την επιτρεπτή τιμή της λόξωσης ανάμεσα σε κάθε σήμα για κάθε διαφορικό ζεύγος σήματος να είναι μικρότερη από 0.1 ns/m. Σύμφωνα με το ECSS-E-ST-50-12C, το βήμα συστροφής (lay-length, Σχήμα 4), των δύο μονωμένων αγωγών, που αποτελούν το διαφορικό ζεύγος σήματος, δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 12 φορές και μεγαλύτερο από 16 φορές από την εξωτερική διάμετρο του συνεστραμμένου ζεύγους χωρίς τη μόνωση, που αντιστοιχεί σε βήμα συστροφής 24-32 mm και εκπεφρασμένο σε στροφές/m καθορίζεται ως 32-41 στροφές/m [17]. Οι πληρωτές (fillers) είναι κατασκευασμένοι από διογκωμένο μικροπορώδες πολυτετραφθοροαιθυλενίο (PTFE) χωρίς άλλα προσθετικά, εκτός από αυτά που είναι αναγκαία για την επεξεργασία. Χρησιμοποιούνται στα ζεύγη διαφορικού σήματος για να εξασφαλίσουν λεία και ενιαία διάμετρο κάτω από τη μόνωση ώστε να προκύπτει ομοιόμορφη εμπέδηση στο καλώδιο. Οι πληρωτές έχουν διάμετρο 1 mm.



**Σχήμα 4 - Μήκος συστροφής (lay length) [18]**

Επιπλέον, όσον αφορά την εσωτερική θωράκιση, το ECSS-E-ST-50-12C [2] προβλέπει ότι το κάθε ζεύγος διαφορεικού σήματος είναι εφοδιασμένο με πλεκτή θωράκιση (braided shield), η οποία είναι τύπου push-back και παρέχει κάλυψη άνω του 90%. Τα σύρματα της πλέξης της θωράκισης είναι διαμέτρου 40 AWG. Όλα τα νήματα, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της θωράκισης, είναι επικαλυμμένα με άργυρο ελάχιστου πάχους 2.5  $\mu\text{m}$ , κατασκευασμένα από υψηλής αγωγιμότητας χαλκό, μαλακό ή ανοπτημένο χωρίς οξυγόνο. Ο προστατευτικός μανδύας του θωρακισμένου ζεύγους διαφορεικού σήματος είναι μια λευκή στρώση από εξωθημένο φθοροπολυμερές PFA με ονομαστικό πάχος τοιχώματος 0.15 mm και αποκλειστικά μόνο εκείνα τα πρόσθετα που είναι αναγκαία για την επεξεργασία και τον χρωματισμό.

#### 1.3.4 Πλήρες Καλώδιο

Το πλήρες καλώδιο έχει μέγιστη διάμετρο 7 mm και μέγιστο βάρος 80 g/m. Είναι κατασκευασμένο από τέσσερα ζεύγη διαφορεικού σήματος συνεστραμμένα περισσότερες από 12 φορές και λιγότερες από 16 φορές μαζί την εξωτερική διάμετρο δύο θωρακισμένων και καλυμμένων ζευγών σήματος, καθορίζοντας έτσι το βήμα συστροφής (lay-length) ανάμεσα σε 55 και 77 mm [17]. Στο κέντρο των τεσσάρων διαφορεικών ζευγών χρησιμοποιείται πληρωτής (filler) διαμέτρου 1 mm για να εξασφαλίσει λεία και ομοιόμορφη διάμετρο κάτω από τη θωράκιση με σκοπό να οδηγήσει σε ομοιόμορφη εμπέδηση κατά μήκος του καλωδίου. Το πληρωτικό υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση του καλωδίου, είναι μικροπορώδες PTFE εμπλουτισμένα μόνο με εκείνα τα πρόσθετα που αφορούν την επεξεργασία. Ένα δεματικό (binder) ίδιου υλικού με τον πληρωτή εφαρμόζεται γύρω από τα τέσσερα διαφορεικά ζεύγη σήματος με τον κεντρικό πληρωτή για να κρατήσει τα ζεύγη καλωδίων και τον πληρωτή μαζί σε σταθερή θέση, τυλιγμένο με μέγιστη επικάλυψη (overlap) 50% [2].

Το σετ των τεσσάρων καλυμμένων και θωρακισμένων διαφορεικών ζευγών σήματος είναι επιπλέον συνολικά θωρακισμένο με εξωτερική πλεκτή θωράκιση (braided shield) τύπου push-back και παρέχει κάλυψη άνω του 90%. Η διάμετρος των αγωγών της θωράκισης είναι 38 AWG. Τα νήματα που



χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της πλεκτής θωράκισης είναι επικαλυμμένα με άργυρο ελάχιστου πάχους 2.5 μm, κατασκευασμένα από υψηλής αγωγιμότητας μαλακό ή ανοπτημένο χαλκό χωρίς οξυγόνο. Οι θωρακίσεις των συνεστραμμένων ζευγών δεν έρχονται σε επαφή η μία με την άλλη αλλά ούτε και με την εξωτερική θωράκιση. Ο εξωτερικός μανδύας (κάλυμμα) γύρω από τα τέσσερα καλυμμένα και μονωμένα διαφορικά ζεύγη σήματος είναι μια λευκή στρώση από εξωθημένο φθοροπολυμερές PFA, που περιέχει αποκλειστικά εκείνα τα πρόσθετα που είναι αναγκαία για την επεξεργασία και τον χρωματισμό. Ο μανδύας αυτός δεν διαθέτει αναγνωριστικά σημάδια μιας και η πίεση που θα ασκούταν στο καλώδιο κατά τη διαδικασία σήμανσης θα επιδρούσε αρνητικά στις ηλεκτρικές ιδιότητες του καλωδίου. Το ονομαστικό πάχος του τοιχώματος του μανδύα για το θωρακισμένο ζεύγος σήματος είναι 0.25 mm [2].

Η λόξωση (skew) ανάμεσα στα μέρη (parts) του διαφορικού σήματος σε ένα ζεύγος διαφορικού σήματος επιτρέπεται να είναι μέχρι 0.1 ns/m. Η λόξωση ανάμεσα σε ένα ζεύγος διαφορικού σήματος και κάθε άλλο ζεύγος διαφορικού σήματος μέσα στο καλώδιο πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή 0.15 ns/m [2].

Το μέγιστο μήκος της συνδεσμολογίας του καλωδίου έχει καθοριστεί στα 10 m για να διασφαλιστεί ότι η από άκρη σε άκρη λόξωση (skew) και ο τρόμος φάσης (jitter), που θα εισαχθεί από το καλώδιο, δε θα ξεπερνά τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές (budget) του καλωδίου. Μακρύτερα καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δεδομένα με μικρό ρυθμό σήματος, βεβαιώνοντας πρώτα ότι δε θα παραβιαστούν τα όρια της απόσβεσης σήματος, της λόξωσης και του τρόμου φάσης που θα εισαχθεί από το σύστημα. Αναλυτικότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 6 του προτύπου ECSS-E-ST-50-12C [2].

### 1.3.5 Πλεκτή Θωράκιση (Braided Shield)

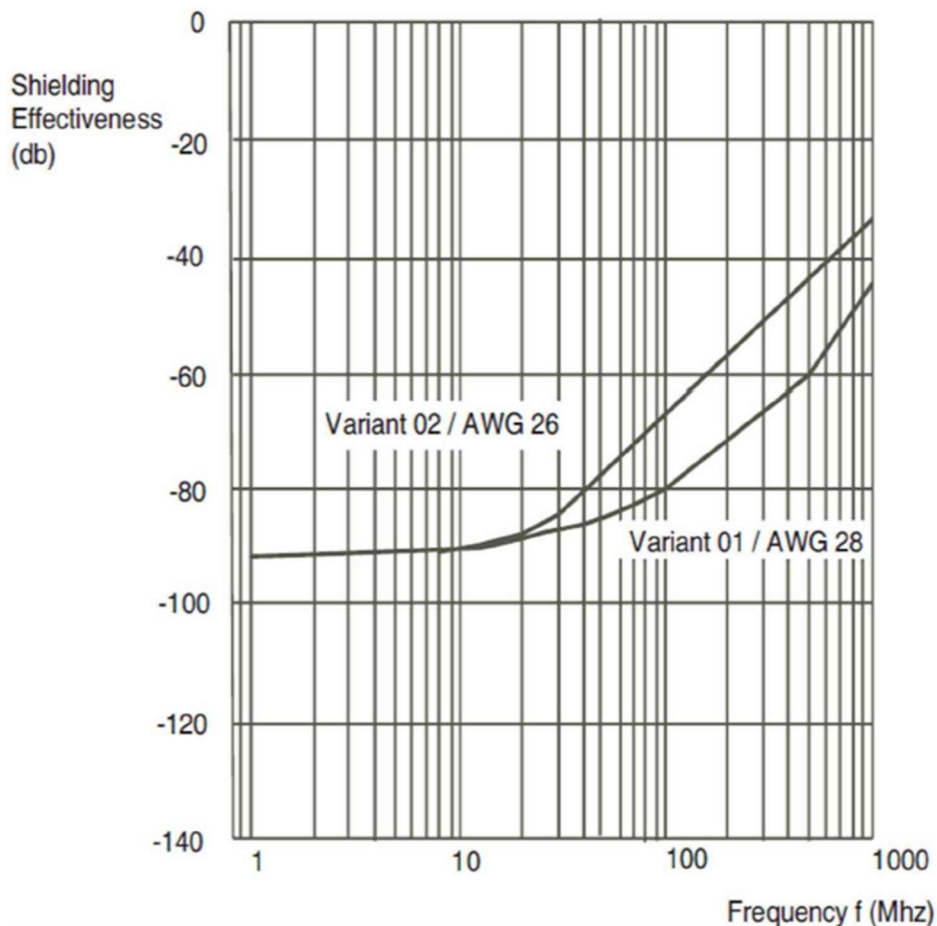
Ο παράγοντας κάλυψης  $K$  (%) της πλεκτής θωράκισης εκφράζεται σε συνάρτηση με τον αριθμό των νημάτων  $N$ , το βήμα (serving pitch)  $P$  σε mm, τη διάμετρο των νημάτων  $d$  σε mm, τη γωνία ύφανσης  $\alpha$  (weave angle) της θωράκισης με τον άξονα του καλωδίου σε μοίρες, την ενεργή (effective) διάμετρο  $D$  του πυρήνα κάτω από τη θωράκιση σε mm και τον αριθμό των φερουσών (carriers)  $C$  ως εξής [17], [19]:

$$K = (2F - F^2) \quad (1)$$

$$F = \frac{N \cdot P \cdot d}{\sin \alpha} \quad (2)$$

$$\tan \alpha = \frac{2\pi(D \cdot 2d) \cdot P}{C} \quad (3)$$

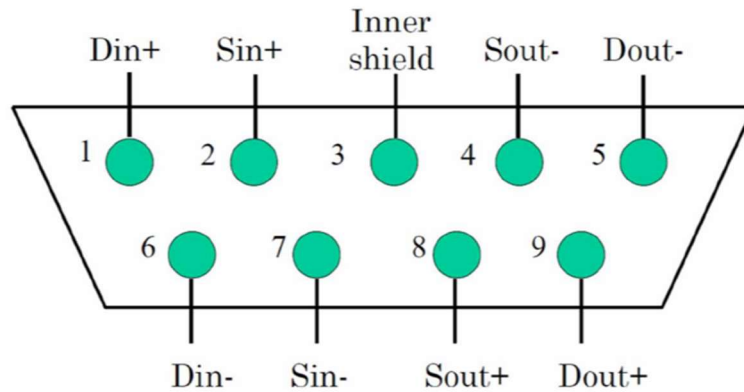
Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης πρέπει να συμμορφώνεται με το όρια που φαίνονται στο Σχήμα 5 για την εκδοχή 1 και την εκδοχή 2 του καλωδίου [17]



Σχήμα 5 - Ελάχιστη αποτελεσματικότητα θωράκισης για τις δύο εκδοχές καλωδίου SpaceWire [17]

### 1.3.6 Σύνδεσμοι (Connectors)

Ο σύνδεσμος του SpaceWire είναι ο micro-miniature D-type 9 ακίδων, οι οποίες μπορεί να είναι είτε πρεσαριστές (crimp) είτε συγκολλημένες (solder) σύμφωνα με το ESCC 3401/071. Στο Σχήμα 6 γίνεται η ταυτοποίηση της κάθε σύνδεσης του συνδέσμου, όπως φαίνεται από την πίσω μεριά του θηλυκού ή την μπροστινή του αρσενικού βύσματος. Η σύνδεση της εσωτερικής θωράκισης (inner shield) συνδέεται με την εσωτερική θωράκιση του καλωδίου SpaceWire και προορίζεται για σύνδεση με τη γείωση του σήματος (signal ground), σύμφωνα με τις EMC απαιτήσεις της αποστολής, μέσω ενός παράλληλα συνδεδεμένου αντιστάτη και πυκνωτή [2].



**Σχήμα 6 - Ταυτοποίηση των επαφών του συνδέσμου SpaceWire**

Στην περίπτωση που η σύνδεση πρόκειται να γίνει απευθείας πάνω σε PCB, χρησιμοποιούνται σύνδεσμοι ελεύθερων αγωγών (flying leads). Αυτοί οι σύνδεσμοι πρέπει να έχουν όλους τους αγωγούς περικυκλωμένους στο ίδιο μήκος (μικρότερο από 25 mm) και τα σύρματα που μεταφέρουν τα διαφορεικά ζεύγη σήματος πρέπει να είναι συνεστραμμένα μαζί για να ελαχιστοποιηθούν οι ασυνέχειες στην εμπέδηση που προκαλούνται από τον σύνδεσμο [2].

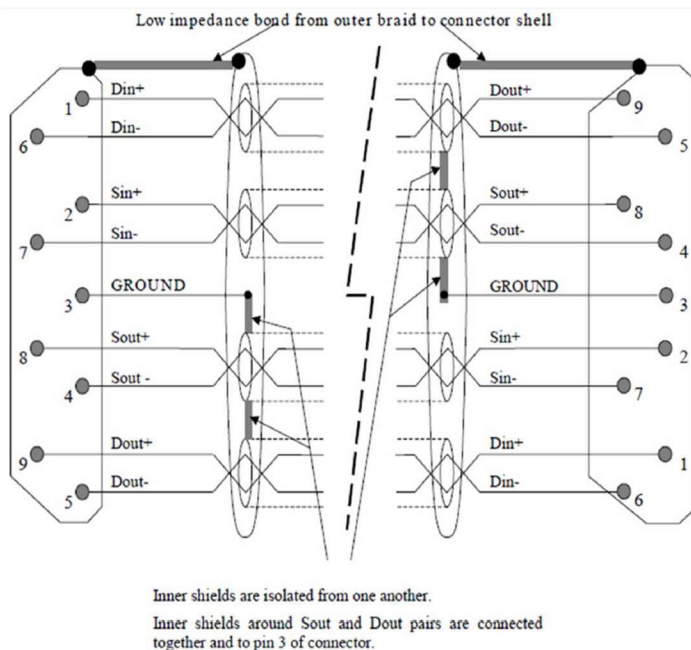
Η χρήση συνδέσμων ορθής γωνίας ( $90^\circ$ ) για συνδέσεις με PCB δεν ενδείκνυται. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν, είναι υποχρεωτική η αντιστάθμιση του μήκους διαδρομής του σήματος (signal path length) μέσω της ρύθμισης του μήκους των ιχνών στο PCB. Στα σήματα που συνδέονται στην πάνω σειρά πρέπει να δοθεί αντίστοιχα μικρότερο μήκος ίχνους επί του PCB από το μήκος ίχνους που αντιστοιχεί στην κάτω σειρά. Αυτό συμβαίνει καθώς η πάνω σειρά από ακίδες (pins) στον ορθογώνιο σύνδεσμο έχει μακρύτερους αγωγούς (leads) από ότι η κάτω σειρά. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή, πρέπει υποχρεωτικά να γίνει αντιστάθμιση στο μήκος ίχνους στην πλευρά του ίχνους (PCB track) που καταλήγει στον σύνδεσμο (connector), ώστε να διατηρηθεί το διαφορεικό σήμα σε ολόκληρη την έκταση το PCB [2].

### 1.3.7 Συναρμολόγηση Καλωδίου

Το συναρμολόγημα (assembly) του καλωδίου SpaceWire αποτελείται από τμήμα καλωδίου SpaceWire με μήκος μέχρι 10 m, το οποίο έχει σε κάθε άκρη του ένα σύνδεσμο micro-miniature D-type 9 ακίδων. Μεγαλύτερα μήκη καλωδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δεδομένα με μικρό ρυθμό σήματος, υπό την αίρεση ότι δεν παραβιάζονται τα όρια του συστήματος σχετικά με την απόσβεση σήματος, τη λόξωση και τον τρόπο φάσης στη λειτουργία για τον δεδομένο ρυθμό σήματος. Για να επιτευχθεί διασύνδεση εκπομπής - λήψης τα σύρματα σήματος μπορούν να διασταυρώνονται, π.χ.

το Dout+ συνδέεται με το Din+ [2]. Το συναρμολόγημα του καλωδίου SpaceWire περιλαμβάνει μία εξωτερική θωράκιση (outer shield), η οποία τερματίζεται κατά 360<sup>0</sup> στο περίβλημα του συνδέσμου σε κάθε άκρο του καλωδίου.

Οι ατομικές εσωτερικές θωρακίσεις των διαφορετικών ζευγών σήματος εξόδου Dout+, Dout-, Sout+ και Sout- συνδέονται μαζί στην ακίδα 3 του συνδέσμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7 και στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2). Με τον τρόπο αυτό, δύο από τα διαφορεικά ζεύγη συνδέονται σε ένα άκρο του καλωδίου και τα υπολειπόμενα δύο στο άλλο άκρο [2].



**Σχήμα 7 - Συνδεσμολογία καλωδίου SpaceWire [2]**

**Πίνακας 2 - Συνδεσμολογία καλωδίων σήματος**

Σήμα στο άκρο A	Ακίδα στο άκρο A		Ακίδα στο άκρο B	Σήμα στο άκρο B
A-Din+	1	Σύνδεση	9	B-Dout+
A-Din-	6	Σύνδεση	5	B-Dout-
A-Sin+	2	Σύνδεση	8	B-Sout+
A-Sin-	7	Σύνδεση	4	B-Sout-
A-(drain ζευγών 5,9 και 4,8)	3	Μη Σύνδεση	3	B-(drain ζευγών 5,9 και 4,8)
A-Sout+	8	Σύνδεση	2	B-Sin+
A-Sout-	4	Σύνδεση	7	B-Sin-
A-Dout+	9	Σύνδεση	1	B-Din+
A-Dout-	5	Σύνδεση	6	B-Din-
A-Shield	Κέλυφος	Σύνδεση	Κέλυφος	B-Shield

Τέλος, υπάρχει ένα μεταλλικό κέλυφος το οποίο ενώνεται με το κύριο μέρος του συνδέσμου με σύνδεση χαμηλής εμπέδησης (λιγότερη από 1 Ω) με σκοπό να παρέχει την απαραίτητη θωράκιση στον σύνδεσμο [2].

### 1.3.8 Ίχνη Πλακέτας Τυπωμένου Κυκλώματος (PCB Tracks)

Το SpaceWire μπορεί επίσης να υλοποιηθεί για εφαρμογές αποκλειστικά σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board - PCB) ή οπισθεπίπεδο (backplane). Σε PCB και backplane είναι δυνατές μόνο συνδέσεις σημείου προς σημείο και όχι πολυτερματικές αρτηριακές δομές (multidrop bus). Σε backplane μπορούν να δομηθούν πολυτερματικές αρτηριακές δομές από συνδέσεις point-to-point μεταξύ κόμβων. Το εύρος ζώνης των σημάτων SpaceWire υψηλής ταχύτητας ξεπερνά το 1 GHz (συχνότητα των ακμών του σήματος), έτσι η κατάστρωση (layout) του PCB πρέπει να σχεδιαστεί με αρκετές προφυλάξεις, όπως τα ίχνη του PCB πρέπει να έχουν διαφορική εμπέδηση ( $100 \pm 6$ ) Ω, τα ζεύγη των ιχνών πρέπει να είναι καλά χωρισμένα από άλλα ίχνη, εξάλειψη των ορθών γωνιών στη διαδρομή των ιχνών, ελάχιστη χρήση vias<sup>1</sup> και τα δύο σήματα του διαφορικού ζεύγους πρέπει έχουν πανομοιότυπο ίχνος και τα ίχνη τους να έχουν το ίδιο μήκος (διαφορά των μηκών ιχνών μικρότερη από 5 mm και μικρότερη από το 5% του μήκους του ίχνους) για την ελαχιστοποίηση της λόξωσης (skew) του διαφορικού σήματος, και το ίδιο πρέπει να ισχύει για τα ίχνη των ζευγών σήματος Data και Strobe, τα οποία πρέπει να έχουν το ίδιο μήκος ιχνών (διαφορά μικρότερη από 5 mm και μικρότερη από το 5% του μήκους τους) για να ελαχιστοποιηθεί η λόξωση που εισάγεται μεταξύ Data και Strobe [2].

## 1.4 SpaceWire Αναθεώρηση 1

Το πρότυπο SpaceWire παραμένει πρακτικά αναλλοίωτο από το 2003 που δημοσιεύτηκε αρχικά. Το 2012 η European Cooperation for Space Standardization αποφάσισε ότι έπρεπε να εκσυγχρονισθεί και να συμπεριλάβει τη συνολική εμπειρία από τα σχεδόν δέκα χρόνια εφαρμογής του. Το Working Group ECSS-E-ST-50-12C Rev. 1 WG. προετοίμασε την πρώτη αναθεώρηση (revision 1) [14] του προτύπου, που τελικά εκδόθηκε στις 15 Μαΐου 2019, το οποίο περιλαμβάνει αρκετές αλλαγές αλλά και νέες προσθήκες, πολλές από τις οποίες είναι εκτός ενδιαφέροντος της παρούσας εργασία. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι πιο σημαντικές αλλαγές εστιάζοντας στα καλώδια και τις συνδεσμολογίες.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις τιμές των μέγιστων επιτρεπτών τιμών απώλειας παρεμβολής σήματος διαμέσου κάθε διαφορικού ζεύγους του καλωδίου, όσον αφορά μόνο το καλώδιο χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι σύνδεσμοι της συνδεσμολογίας.

---

<sup>1</sup> vertical interconnect access – κάθετη διασύνδεση ανάμεσα στα στρώματα του PCB

**Πίνακας 3 - Τιμές των μέγιστων επιτρεπτών τιμών απώλειας παρεμβολής (insertion loss)**

<b>Data rate (Mbps)</b>	<b>Third harmonic (MHz)</b>	<b>Maximum insertion loss (dB/m)</b>
10	15	0.27
100	150	0.45
200	300	0.65
400	600	0.94

Ο Πίνακας 4 και ο Πίνακας 5 παρουσιάζουν τις προδιαγραφές για τα μέγιστα επίπεδα του αθροίσματος ισχύος παραδιαφωνίας (Power Sum Near End crosstalk - PSNEXT) και του αθροίσματος ισχύος τηλεδιαφωνίας (Power Sum Equal Far End crosstalk - PSELFEXT), όπως αποτυπώνονται στην αναθεώρηση 1 [14].

**Πίνακας 4 - Προδιαγραφές καλωδίου PSNEXT**

<b>Frequency (MHz)</b>	<b>PSNEXT (dB)</b>
100	73.0
500	63.5
1000	39.0

**Πίνακας 5 - Προδιαγραφές καλωδίου PSELFEXT**

<b>Frequency (MHz)</b>	<b>PSELFEXT (dB)</b>
100	65.0
500	50.5
1000	41.5

#### 1.4.1 Σύνδεσμοι

Στην αναθεώρηση 1 του προτύπου οι σύνδεσμοι της συνδεσμολογίας καλωδίου SpaceWire μπορεί να είναι είτε τύπου A είτε τύπου B. Ο σύνδεσμος **τύπου A** είναι ο κλασικός micro-miniature D-type 9 ακίδων, οι οποίες μπορεί να είναι είτε πρεσαριστές (crimp) είτε συγκολλημένες (solder) σύμφωνα με το πρότυπο ESCC 3401/071 και το πρότυπο ESCC 3401/071. Εναλλακτικά των συνδέσμων τύπου A, επιτρέπεται και η χρήση συνδέσμων **τύπου B** υπό την προϋπόθεση ότι πληρούν τις απαιτήσεις. Οι σύνδεσμοι τύπου B πρέπει να έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [14]:

- Ζεύγη επαφών με διαφορική εμπέδηση  $(100 \pm 6) \Omega$ .
- Συμβατότητα με καλώδια ESCC 3902/003 ή με συμμετρικά καλώδια ESCC 23902/002.
- Συμβατότητα με το περιβάλλον του διαστήματος, όπως αυτό ορίζεται στο ESCC 3401.

Ο σύνδεσμος με θηλυκές επαφές πρέπει να περιλαμβάνει ένα αγωγίμο παρέμβυσμα (gasket) για μείωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI). Ο σύνδεσμος με αρσενικές επαφές χρησιμοποιείται στο συναρμολόγημα του καλωδίου. Η εξωτερική θωράκιση του καλωδίου SpaceWire πρέπει να τερματίζει κυκλικά στο σώμα του συνδέσμου μέσω κατάλληλου EMI περιβλήματος. Η ηλεκτρική αντίσταση της σύνδεσης της εξωτερικής θωράκισης του καλωδίου με το σώμα του συνδέσμου με αρσενικές επαφές πρέπει να είναι μικρότερη από 10 mΩ σε DC. Οι εσωτερικές θωρακίσεις του καλωδίου SpaceWire πρέπει να είναι συνδεδεμένες στο σώμα του συνδέσμου με DC εμπέδηση μικρότερη από 10 mΩ. Οποιοσδήποτε ουρές (pigtails), οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση της εσωτερικής θωράκισης με το περίβλημα, πρέπει να έχουν μήκος μικρότερο από 10 mm. Όταν χρησιμοποιούνται σύνδεσμοι τύπου A με θηλυκές επαφές για τη σύνδεση δύο καλωδίων, το pin 3 πρέπει να είναι συνδεδεμένο με το σώμα του συνδέσμου. Το pin 3 του συνδέσμου τύπου A με θηλυκές επαφές συνδέεται με την τοπική αναφορά δυναμικού (Circuit Ground) επίσης όταν χρησιμοποιείται με καλώδια τύπου A με σκοπό την αποφυγή συσσώρευσης φορτίου [14].

Στην περίπτωση συνδέσμου τύπου B, η εκχώρηση σημάτων στις επαφές του συνδέσμου καθορίζεται από τον πάροχο ή κατασκευαστή του συνδέσμου, αλλά με τον περιορισμό ότι τα δύο διαφορεικά σήματα σε κάθε ζεύγος αγωγών (Din+ και Din-, Sin+ και Sin-, Dout+ και Dout-, Sout+ και Sout-) πρέπει να εκχωρούνται σε παρακείμενες ακίδες του συνδέσμου. Καμία ακίδα του συνδέσμου δε συνδέεται με τη θωράκιση του καλωδίου. Στην περίπτωση που υπάρχει εξωτερική θωράκιση θα πρέπει να συνδέεται κυκλικά στο σώμα του συνδέσμου. Οι εσωτερικές θωρακίσεις πρέπει να είναι κυκλικά συνδεδεμένες στο σώμα του συνδέσμου όπου αυτό είναι εφικτό [14].

#### 1.4.2 Συναρμολόγημα Καλωδίου

Το συναρμολόγημα καλωδίου **τύπου AL** (τύπος A Legacy) είναι αυτό που καθορίζεται στην τρέχουσα έκδοση του προτύπου SpaceWire [2] πριν από την αναθεώρηση 1. Με την τελική έκδοση της αναθεώρησης 1, το συναρμολόγημα καλωδίου τύπου AL δε προτείνεται για χρήση σε νέα σχέδια [14].

Στην αναθεώρηση του προτύπου αποδεκτά συναρμολογήματα μπορούν να αποτελούνται από:

- δύο πανομοιότυπους συνδέσμους τύπου A με αρσενικές επαφές ενωμένους με ένα μήκος καλωδίου ή,
- δύο συνδέσμους τύπου B ενωμένους με ένα μήκος καλωδίου, ή
- ένα μήκος καλωδίου με σύνδεσμο τύπου A με αρσενικές επαφές στο ένα άκρο και σύνδεσμο τύπου B στο άλλο άκρο.

Η απώλεια παρεμβολής μέσα από κάθε διαφορεικό ζεύγος στη συνδεσμολογία καλωδίου πρέπει να είναι μικρότερη από 7 dB για συχνότητες μέχρι 1.5 φορές τον ρυθμό σηματοδοσίας δεδομένων, έτσι για

παράδειγμα για ρυθμό μετάδοσης 200 Mbps, η συχνότητα στην οποία μετρείται η απώλεια παρεμβολής είναι 300 MHz [14].

Το συναρμολόγημα καλωδίου **τύπου A** χρησιμοποιεί συνδέσμους τύπου A και καλώδιο με εξωτερική θωράκιση. Η ακίδα 3 του συνδέσμου πρέπει να μένει ασύνδετη. Οι ατομικές θωρακίσεις καθενός από τα τέσσερα ζεύγη διαφορικών σημάτων θα ενώνονται με το περίβλημα του συνδέσμου μέσω σύνδεσης χαμηλής εμπέδησης, μικρότερης από 10 mΩ. Ένα μεταλλικό περίβλημα χρησιμοποιείται σε κάθε σύνδεσμο για να δημιουργηθεί μαζί με την εξωτερική θωράκιση ένας συνεχής αγωγίμος φραγμός και να διευκολύνει τον τερματισμό των εσωτερικών θωρακίσεων. Η εξωτερική θωράκιση του καλωδίου πρέπει να τερματίζεται κυκλικά (360°) στο περίβλημα του συνδέσμου με σύνδεση χαμηλής εμπέδησης. Η εμπέδηση της σύνδεσης μεταξύ του κυρίως σώματος του συνδέσμου και του περιβλήματος πρέπει να είναι μικρότερη από 10 mΩ. Η διαφορική τηλεδιαφωνία (far-end crosstalk) και παραδιαφωνία (near-end crosstalk) μεταξύ δύο ζευγών της συνδεσμολογίας του καλωδίου SpaceWire πρέπει να είναι μικρότερη από 20 dB για συχνότητα μέχρι 1 GHz [14].

Το συναρμολόγημα καλωδίου **τύπου B** διαθέτει εξωτερική θωράκιση και συνδέσμους τύπου B (με προσαρμοσμένη εμπέδηση στο καλώδιο), όπως αυτοί καθορίζονται από τον πάροχο ή κατασκευαστή. Στη συνδεσμολογία καλωδίου τύπου B, το καλώδιο μπορεί να είναι κάποια άλλη μορφή καλωδίου με τις ακόλουθες ιδιότητες:

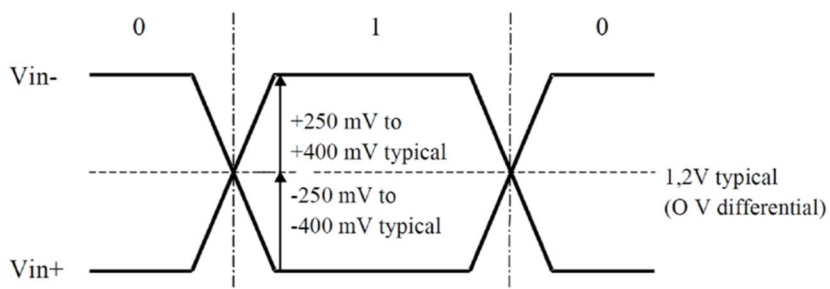
- Διαφορική εμπέδηση (100±6) Ω.
- Συμβατότητα με καλώδια ESCC 3902/003 ή με συμμετρικά καλώδια ESCC 23902/002.
- Συμβατότητα με το περιβάλλον του διαστήματος, όπως αυτό ορίζεται στο ESCC 3401.

Οι ατομικές θωρακίσεις καθενός από τα τέσσερα ζεύγη διαφορικών σημάτων ενώνονται με τη θωράκιση του συνδέσμου με σύνδεση χαμηλής εμπέδησης μικρότερης από 10 mΩ. Ένα μεταλλικό περίβλημα χρησιμοποιείται με κάθε σύνδεσμο για να δημιουργηθεί μαζί με την εξωτερική θωράκιση ένας συνεχής αγωγίμος φραγμός και να διευκολύνει τον τερματισμό των εσωτερικών θωρακίσεων. Η εξωτερική θωράκιση του καλωδίου πρέπει να τερματίζεται κυκλικά (360°) στο περίβλημα του συνδέσμου με σύνδεση χαμηλής εμπέδησης. Η εμπέδηση της σύνδεσης μεταξύ του κυρίως σώματος του συνδέσμου και του περιβλήματος πρέπει να είναι μικρότερη από 10 mΩ. Η διαφορική τηλεδιαφωνία (far-end crosstalk) και παραδιαφωνία (near-end crosstalk) μεταξύ δύο ζευγών της συνδεσμολογίας του καλωδίου SpaceWire πρέπει να είναι μικρότερη από 50 dB για συχνότητα μέχρι 1 GHz συμπεριλαμβάνοντας τη συνεισφορά των καλωδίων και των συνδέσμων [14].

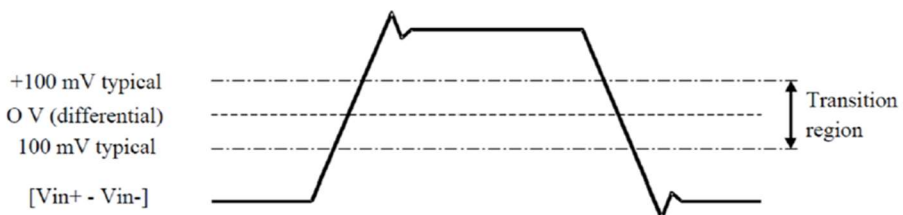


## 1.5 Επίπεδο Σήματος (Signal Level) - Σηματοδοσία LVDS

Το επίπεδο σήματος του προτύπου SpaceWire περιγράφει τα επίπεδα τάσης του σήματος, τα περιθώρια του θορύβου και την κωδικοποίηση του σήματος. Η Διαφορική Σηματοδοσία Χαμηλής Τάσης (Low Voltage Differential Signaling - LVDS), όπως ορίζεται στο ANSI/TIA/EIA-644 [16], έχει καθοριστεί ως η τεχνική σηματοδοσίας του SpaceWire. Η τεχνική LVDS χρησιμοποιεί ισοσταθμισμένα (balanced<sup>2</sup>) σήματα για να παρέχει διασύνδεση πολύ υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιώντας χαμηλή αιώρηση (swing) τάσης (τυπικά 350 mV). Η ισοσταθμισμένη και διαφορική (differential<sup>3</sup>) σηματοδοσία παρέχει επαρκές περιθώριο θορύβου, ώστε να είναι δυνατή η χρήση χαμηλών τάσεων σε πρακτικά συστήματα. Η χαμηλή αιώρηση τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη σχετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος σε υψηλή ταχύτητα. Η LVDS είναι κατάλληλη για σύνδεση μεταξύ πλινθίων (chips) σε μία πλακέτα, μεταξύ πλακετών σε μια μονάδα, και διασύνδεση μονάδας με μονάδα για αποστάσεις ως 10 m ή και μεγαλύτερες (ECSS Secretariat, 2008). Τα επίπεδα σηματοδοσίας της τεχνικής LVDS φαίνονται στο Σχήμα 8 και στο Σχήμα 9.



Σχήμα 8 - Αιώρηση τάσης LVDS για αντιστάτη τερματισμού 100 Ω

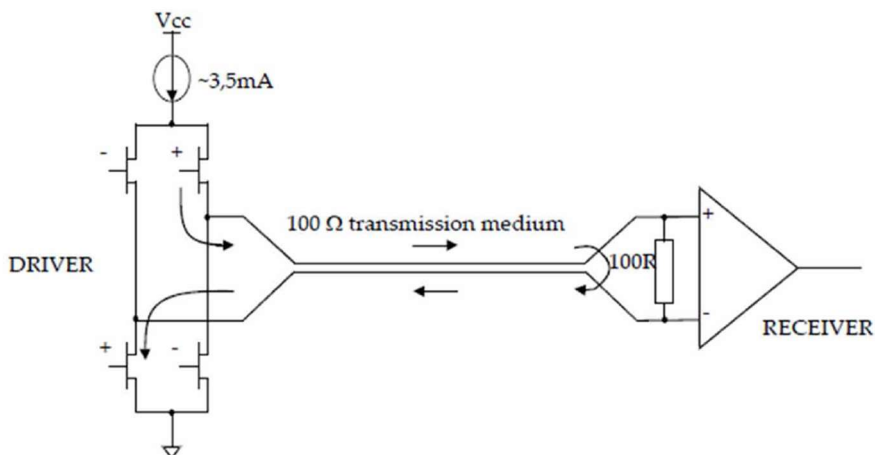


Σχήμα 9 - Κατώφλι εισόδου του δέκτη

<sup>2</sup> Ισοσταθμισμένη (balanced) σηματοδοσία υπάρχει όταν μεταφέρεται από δυο αγωγούς (με προαιρετική θωράκιση) με ίση εμπέδηση ως προς τη γείωση.

<sup>3</sup> Διαφορική (differential) σηματοδοσία υπάρχει όταν υπάρχουν δυο αγωγοί (με προαιρετική θωράκιση) που μεταδίδουν το ίδιο σήμα με αντίθετη πολικότητα.

Στο Σχήμα 10 φαίνονται ένας τυπικός οδηγός (driver) LVDS και ένας δέκτης (receiver) συνδεδεμένοι με ένα μέσο (καλώδιο ή ίχνος PCB) με  $100 \Omega$  διαφορική εμπέδηση. Ο οδηγός LVDS χρησιμοποιεί λογική τρόπου ρεύματος (current mode logic - CML). Μία πηγή συνεχούς ρεύματος, περίπου  $3.5 \text{ mA}$ , παρέχει το ρεύμα που ρέει έξω από τον οδηγό, κατά μήκος του μέσου μετάδοσης, διαμέσου της αντίστασης τερματισμού των  $100 \Omega$  και πίσω στον οδηγό από το μέσο μετάδοσης.



Σχήμα 10 - Η λειτουργία LVDS [2]

Δύο ζεύγη από διακόπτες τρανζίστορ μέσα στον οδηγό ελέγχουν την κατεύθυνση της ροής ρεύματος διαμέσου του αντιστάτη τερματισμού. Όταν τα τρανζίστορ του οδηγού μαρκαρισμένα με "+" ανοίξουν και εκείνα που είναι μαρκαρισμένα με "-" κλείσουν, τότε υπάρχει ροή ρεύματος, όπως υποδεικνύεται στο διάγραμμα, δημιουργώντας θετική τάση κατά μήκος του αντιστάτη τερματισμού. Όταν τα τρανζίστορ του οδηγού μαρκαρισμένα με "-" ανοίξουν και εκείνα που είναι μαρκαρισμένα με "+" κλείσουν, τότε υπάρχει ροή ρεύματος προς την αντίθετη κατεύθυνση δημιουργώντας αρνητική τάση κατά μήκος του αντιστάτη τερματισμού[2].

Η LVDS έχει αρκετά χαρακτηριστικά που την καθιστούν πολύ ελκυστική για σηματοδότηση δεδομένων όπως:

- Σχεδόν σταθερό ολικό ρεύμα οδήγησης ( $+3.5 \text{ mA}$  για λογικό "1" και  $-3.5 \text{ mA}$  για λογικό "0"), το οποίο μειώνει τον θόρυβο μεταγωγής στα τροφοδοτικά.
- Υψηλή ανοσία σε διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις γειώσεις οδηγού και δέκτη, το LVDS μπορεί να ανεχτεί τουλάχιστον  $\pm 1 \text{ V}$  διαφορά δυναμικού γείωσης.
- Υψηλή ανοσία σε επαγόμενο θόρυβο εξαιτίας της διαφορικής σηματοδότησης, και λόγω χρήσης συνεστραμμένου ζεύγους καλώδιου.

- Χαμηλές ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές, επειδή μικρά ίσα και αντίθετα ρεύματα δημιουργούν μικρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα οποία ακυρώνουν το ένα το άλλο.
- Λειτουργία fail-safe (ασφαλής έναντι αποτυχιών).
- Ανεξάρτητη από την παροχή τάσης κάθε ξεχωριστής συσκευής.
- Απλή αντίσταση τερματισμού 100 Ω στον δέκτη.
- Η κατανάλωση ισχύος είναι συνήθως 50 mW ανά ζεύγος οδηγού/δέκτη για τη LVDS σε σύγκριση με τα 120 mW για σήματα ECL ή PECL, που χρησιμοποιούνται στο πρότυπο IEEE 1355-1995.

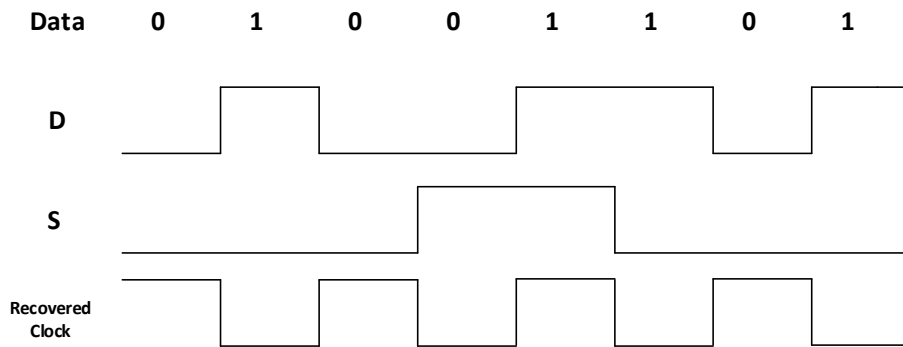
### 1.5.1 Σύντομη Περιγραφή της λειτουργίας Fail-safe της LVDS

Για λειτουργία ασφαλή έναντι αποτυχίας (fail-safe), ή την αποφυγή λειτουργίας του συστήματος υπό εσφαλμένες συνθήκες και για την αποτροπή ανεπιθύμητης συμπεριφοράς, ο σχεδιασμός του οδηγού και του δέκτη πρέπει να περιλαμβάνει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Όταν ο οδηγός δεν τροφοδοτείται, πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη εμπέδηση στην έξοδό του (μεγαλύτερη από 100 kΩ).
- Όταν ο δέκτης δεν τροφοδοτείται πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη εμπέδηση στην είσοδο του (μεγαλύτερη από 100 kΩ).
- Θεωρώντας ότι το κατώφλι θορύβου των 10 mV στην είσοδο του δέκτη δεν έχει ξεπεραστεί, οι έξοδοι του δέκτη πρέπει να είναι κλειδωμένες στην υψηλή κατάσταση (high state), δηλαδή ανενεργοί και να μην ταλαντώνονται όταν:
  - Ο οδηγός δεν τροφοδοτείται, είναι απενεργοποιημένος ή δεν είναι συνδεδεμένος με τον δέκτη.
  - Οι είσοδοι του δέκτη είναι βραχυκυκλωμένοι ή ανοιχτοκυκλωμένοι στην περίπτωση αποσυνδεδεμένου καλωδίου ή αποσυνδεδεμένου σύρματος καλωδίου.

### 1.5.2 Κωδικοποίηση Σήματος

Το SpaceWire χρησιμοποιεί κωδικοποίηση Data-Strobe (DS). Αυτή είναι μια μέθοδος/τεχνική κωδικοποίησης (coding scheme), που κωδικοποιεί το ρολόι μετάδοσης με τα δεδομένα σε Data και Strobe έτσι ώστε το ρολόι να ανακτηθεί (συγχρονισμός bit) εφαρμόζοντας μια συνάρτηση XOR στις γραμμές Data και Strobe. Το σήμα Data ακολουθεί τη ροή δεδομένων, δηλαδή είναι υψηλό όταν το bit δεδομένων είναι "1" και χαμηλό όταν το bit δεδομένων είναι "0", και το σήμα Strobe αλλάζει κατάσταση όταν το σήμα Data δεν αλλάζει κατάσταση από ένα bit στο επόμενο [2]. Αυτό το σχήμα κωδικοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 11.



**Σχήμα 11 - Η κωδικοποίηση Data-Strobe (DS)**

Η κωδικοποίηση DS βελτιώνει την ανοχή λόξωσης (skew) σχεδόν σε χρόνο 1-bit, σε αντίθεση με την ανοχή χρόνου 0.5 bit που παρουσιάζει η απλή κωδικοποίηση με δεδομένα και ρολόι. Η ζεύξη χρησιμοποιεί δύο ζεύγη διαφορικών σημάτων, ένα ζεύγος για τη μετάδοση των σημάτων Data και Strobe προς μία κατεύθυνση και το άλλο ζεύγος για τη μετάδοση των σημάτων Data και Strobe προς την αντίθετη κατεύθυνση, έτσι απαιτεί συνολικά οκτώ αγωγούς για κάθε αμφίδρομη ζεύξη [2].

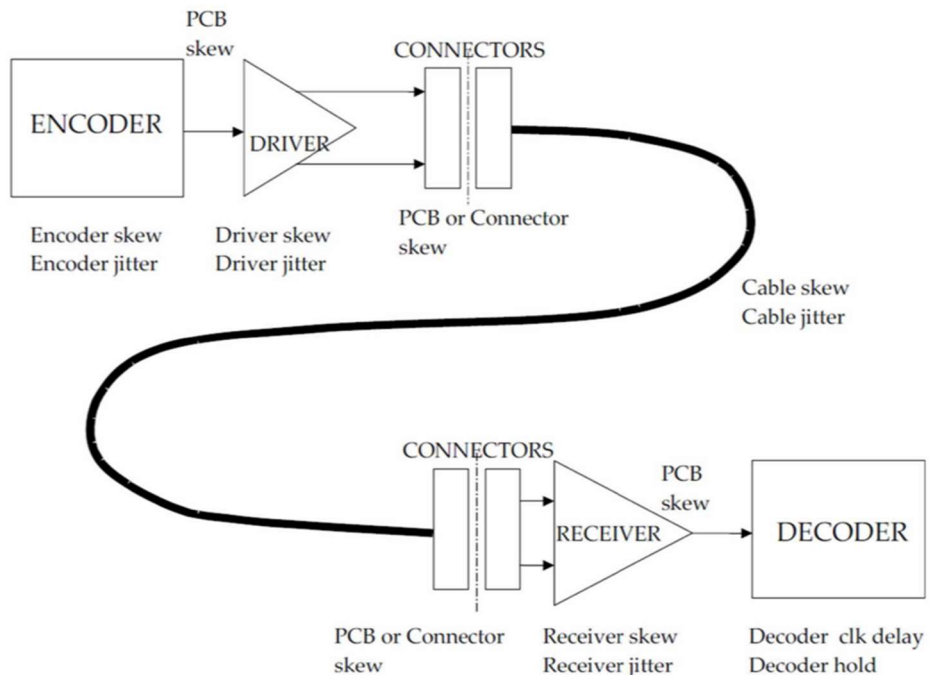
### 1.5.3 Ρυθμός Σηματοδοσίας Δεδομένων

Ο ελάχιστος ρυθμός σηματοδοσίας δεδομένων, στον οποίο επιτρέπεται να λειτουργήσει ο σύνδεσμος SpaceWire, είναι 2 Mbps. Σε αντίθεση, ο μέγιστος ρυθμός σηματοδοσίας είναι αυτός, στον οποίο ο σύνδεσμος SpaceWire μπορεί να λειτουργήσει και καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη λόξωση (skew) και τον τρόπο φάσης (phase jitter) του σήματος. Μια ζεύξη μπορεί να λειτουργεί με διαφορετικό ρυθμό σηματοδοσίας δεδομένων προς τη μία κατεύθυνση από ό,τι στην αντίθετη. Ζεύξεις μέσα σε ένα σύστημα μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικούς ρυθμούς σηματοδοσίας δεδομένων. Μία ζεύξη SpaceWire μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε ρυθμό σηματοδοσίας δεδομένων μεταξύ του ελάχιστου και του μέγιστου δυνατού ρυθμού σηματοδοσίας δεδομένων. Μετά από επανεκκίνηση ή αποσύνδεση, ο μεταδότης του συνδέσμου SpaceWire αρχίζει να λειτουργεί σε ρυθμό σηματοδοσίας δεδομένων  $(10 \pm 1)$  Mbps και συνεχίζει σε αυτό τον ρυθμό μέχρι να του δοθεί διαφορετική εντολή [2].

### 1.5.4 Παράγοντες Συνεισφοράς Λόξωσης (Skew) και Τρόμος Φάσης (Jitter)

Ο μέγιστος ρυθμός σηματοδοσίας δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί είναι διαφορετικός ανάλογα με το σύστημα, και εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως το μήκος του καλωδίου, την τεχνολογία του οδηγού-δέκτη

και τον σχεδιασμό του κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή, και περιορίζεται από τη λόξωση και τον τρόπο φάσης. Οι συνήθεις παράγοντες που συνεισφέρουν στη λόξωση και τον τρόπο φάσης φαίνονται στο Σχήμα 12.



**Σχήμα 12 - Παράγοντες συνεισφοράς στη λόξωση (skew) και τον τρόπο φάσης (jitter)**

Ένας ρυθμός δεδομένων είναι επιτεύξιμος σε δεδομένο σύστημα, όταν το άθροισμα της συνολικής λόξωσης και του τρόμου φάσης του συστήματος με τον ελάχιστο διαχωρισμό ακρών (edge separation) του δέκτη είναι μικρότερο από την περίοδο των δυφίων (bit) για τον συγκεκριμένο ρυθμό δεδομένων [2].

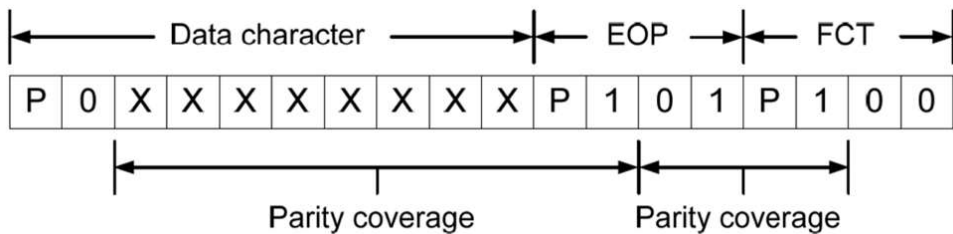
## 1.6 Επίπεδο Χαρακτήρα (Character Level)

Το πρωτόκολλο SpaceWire διαθέτει δύο ειδών χαρακτήρες, τους χαρακτήρες δεδομένων (data characters) και τους χαρακτήρες ελέγχου (control characters), η δομή των οποίων αποτυπώνεται στο Σχήμα 13.



### 1.6.2 Χαρακτήρες Δεδομένων (Data Characters)

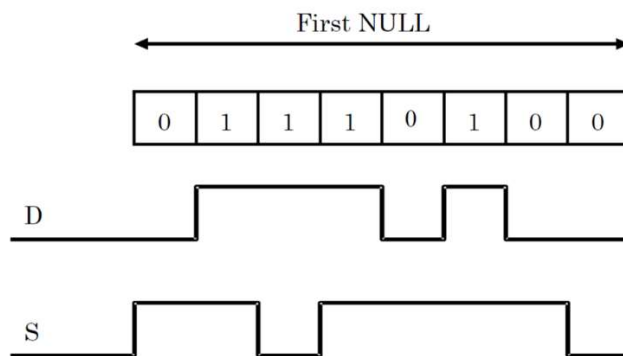
Οι χαρακτήρες δεδομένων περιέχουν ένα δυφίο (bit) ισοτιμίας, μια σημαία (flag) ελέγχου δεδομένων και τα 8 δυφία δεδομένων, τα οποία μεταδίδονται με πρώτο το λιγότερο σημαντικό δυφίο (LSB first). Το bit ισοτιμίας καλύπτει 8 bit του προηγούμενου χαρακτήρα δεδομένων ή τα δύο bit του προηγούμενου χαρακτήρα ελέγχου, το bit ισοτιμίας και τη flag ελέγχου δεδομένων του παρόντος χαρακτήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14. Το bit ισοτιμίας λαμβάνει τέτοια τιμή ώστε να παράγεται περιττή (odd) ισοτιμία, δηλαδή το πλήθος των "1" στο πεδίο κάλυψης ισοτιμίας να είναι περιττός αριθμός. Η σημαία ελέγχου δεδομένων (data-control flag) λαμβάνει την τιμή "0" όταν πρόκειται για χαρακτήρα δεδομένων [2].



Σχήμα 14 - Κάλυψη ισοτιμίας [2]

### 1.6.3 Συγχρονισμός Χαρακτήρων (Character Synchronization)

Ο συγχρονισμός χαρακτήρων επιτελείται μια και μοναδική φορά κατά την εκκίνηση μιας ζεύξης ή κατά την επανεκκίνησή της μετά από μια αποσύνδεση. Μετά από επανέναρξη ή λάθος σε ζεύξη τα σήματα Data και Strobe τίθενται μηδενικά. Κατά την ενεργοποίηση του πομπού μετά την επανέναρξη της ζεύξης το πρώτο bit που αποστέλλεται είναι μηδενικό bit ισοτιμίας ώστε η πρώτη μετάβαση κατάστασης (transition) να συμβεί στο σήμα Strobe, όπως φαίνεται στο Σχήμα 15 [2].



Σχήμα 15 - Ακολουθία bit κατά την εκκίνηση της ζεύξης SpaceWire [2]

## 1.7 Τεχνικές Γείωσης & Δέσμησης

Η τεχνική γείωσης (grounding) είναι ένα πολύ σημαντικό παράγοντα, που επηρεάζει τον ολικό σχεδιασμό ενός διαστημικού σκάφους. Η γείωση χαμηλής επαγωγής και αντίστασης είναι αναγκαία για να υπάρξει μια διαδρομή επιστροφής (return path) για τα ρεύματα διαρροής και τα επαγόμενα ρεύματα από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Συνήθως οι διαδρομές γείωσης κατασκευάζονται από αλουμίνιο, ωστόσο οι διαστημικοί οργανισμοί αναζητούν ελαφρύτερες δομές και έτσι σταδιακά τα πετάσματα αλουμινίου αντικαθίστανται από ελαφρύτερα υλικά, όπως το Carbon-Fiber-Reinforced Polymer (CFRP). Τα συνθετικά υλικά είναι ελαφρύτερα από το αλουμίνιο και χρησιμοποιούνται συχνά αντί για αυτό για την κατασκευή της ατράκτου (haul).

Οι μεθοδολογίες δέσμησης (bonding) κατηγοριοποιούνται ως άμεσες (direct) και έμμεσες (indirect). Στην άμεση, οι επαφές σταθεροποιούνται μαζί χωρίς επιπλέον διακλαδώσεις (joints) και έτσι επιτυγχάνεται μια διαδρομή χαμηλής εμπέδησης βελτιώνοντας την επίδοση ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC). Για τον λόγο αυτό η άμεση δέσμηση είναι προτιμότερη, αλλά η έμμεση είναι μονόδρομος, όταν ο εξοπλισμός εγκαθίσταται σε μερικά αγωγίμες - όπως το CFRP - ή καθόλου αγωγίμες επιφάνειες.

Το δικτύωμα γείωσης - κατασκευάζεται από φύλλα (foils) ή λωρίδες (strips) αλουμινίου, που συνθέτουν μια δομή «ράγας ή σιδηροτροχιάς» (rail), ως μέσο διατήρησης χαμηλής συνολικής μάζας επί του διαστημικού σκάφους, με σκοπό να μειωθεί η αυτεπαγωγή της σύνδεσης γείωσης και το ρεύμα κοινού ρυθμού ή κοινού τρόπου (common mode) - αποτελεί ένα ξεχωριστό τμήμα του σκάφους, που συνίσταται από ράγες γείωσης τοποθετημένες κάτω από τις δέσμες καλωδίων ή από επίπεδα γείωσης τοποθετημένες πάνω στα φύλλα επιφανείας (facesheets) του σκάφους. Αυτή η υλοποίηση ωστόσο δεν είναι πολύ ευέλικτη στην περίπτωση που η δρομολόγηση των δεσμών καλωδίων πρέπει να μεταβληθεί για να προσαρμοστεί σε σχεδιαστικές αλλαγές [20]. Επιπλέον, για να είναι επιτυχημένη η χρήση τους πρέπει να ληφθούν υπόψη πιθανές επιπτώσεις στις επιδόσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των ηλεκτρονικών συστημάτων επί του σκάφους. Ως συνέπεια, όταν χρησιμοποιούνται εναλλακτικά υλικά επίπεδων ή/και εναλλακτικές διατάξεις δικτυωμάτων γείωσης πρέπει να αναλύονται δυνητικά θέματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από τις γραμμές μεταφοράς ψηφιακών σημάτων με υψηλές ταχύτητες. Η ανάλυση αυτή συνήθως είναι βασισμένη στο εκπεμπόμενο ηλεκτρικό πεδίο (E-field).

Στην εργασία [21] μελετάται η χρήση κυλινδρικών αγωγών πάνω από ένα φύλλο CFRP ως αντικαταστάτης του κλασικού δικτυώματος τύπου ράγας. Σε αυτήν, οι συγγραφείς προτείνουν ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα των ανθρακονημάτων (carbon fibers) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απλοποίηση του δικτυώματος γείωσης. Το δίκτυο χαμηλής αντίστασης και αυτεπαγωγής από μεταλλικούς αγωγούς χρησιμοποιείται για να εκτραπούν



τα ρεύματα διαρροής από τη δομή CFRP. Εναλλακτικά σενάρια αποτελούν η επιμετάλλωση των φύλλων επιφανείας CFRP και οι αγωγοί γείωσης. Η χρήση των ραγών, αν αυτές δεν είναι πλατιές και ακολουθούν κατά μήκος ολόκληρη την καλωδίωση, δεν επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα από τη χρήση κυλινδρικών αγωγών, οι οποίοι είναι και ευκολότεροι στην υλοποίηση. Επιπλέον, για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά τα φύλλα επιφανείας CFRP, πρέπει να συνδεθούν οι ηλεκτρονικές μονάδες μέσω συνδέσεων χαμηλής αυτεπαγωγής στα φύλλα επιφανείας.

Οι συγγραφείς της [20] συνέκριναν τα εκπεμπόμενα ηλεκτρικά πεδία για τρία επίπεδα γείωσης με χρήση προγραμμαμάτων προσομοίωσης. Αρχικά, ένα επίπεδο αλουμινίου με διαστάσεις  $2.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , έπειτα ένα ίδιο επίπεδο από CFRP και τέλος μια λωρίδα αλουμινίου διαστάσεων ( $2.5 \text{ m} \times 0.03 \text{ m} \times 0.001 \text{ m}$ ) επί του προηγούμενου επιπέδου CFRP. Η τελευταία διάταξη αφορά μια τυπική υλοποίηση δικτύωματος γείωσης τύπου ράγας. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το επίπεδο αλουμινίου λόγω της εγγενούς χαμηλότερης εμπέδησής του αποτελεί την καλύτερη λύση όσον αφορά την ελαχιστοποίηση του ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου σε ολόκληρη την περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Το επίπεδο CFRP, συγκρινόμενο με και χωρίς το δικτύωμα ράγας, παράγει μεγαλύτερα επίπεδα ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου χωρίς το δικτύωμα, τα οποία παρατηρούνται κυρίως στις χαμηλές συχνότητες (κάτω από τα 200 MHz). Σε κάθε περίπτωση πάντως, τα επίπεδα ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου βρίσκονται εντός των τυπικών απαιτήσεων για διαστημικό εξοπλισμό. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, τα πετάσματα (panel) από CFRP είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για την επιστροφή του ρεύματος κοινού τρόπου (common mode current return). Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται οι μεγάλες επιβαρύνσεις μάζας που επιφέρει η υλοποίηση ενός δικτύωματος γείωσης που καλύπτει ολόκληρη την καλωδίωση [20].

## 1.8 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το πρότυπο ECSS-E-ST-50-12C της ευρωπαϊκής συνεργασίας για την τυποποίηση του διαστήματος (ECSS). Συζητήθηκε η σημασία του λόγω της ευρείας χρήσης συσκευών και συστημάτων που το υιοθετούν σε πολλές διαστημικές αποστολές. Δόθηκε μια σύντομη περιγραφή όλων των επιπέδων του και δόθηκε ιδιαίτερη βάση στην παρουσίαση των επιπέδων και των χαρακτηριστικών εκείνων που έχουν άμεση συνάφεια με την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των ζεύξεων SpaceWire υπό το πρίσμα της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας και Ατρωσίας, ώστε να αποτελέσει το αναγκαίο τεχνικό-θεωρητικό υπόβαθρο για τη συνέχεια της εργασίας. Επίσης συζητήθηκαν πρακτικές γείωσης και δέσμησης, που ακολουθούνται κατά την κατασκευή διαστημικών σκαφών, καθώς και εναλλακτικά υλικά για το επίπεδο γείωσης.



# Κεφάλαιο 2

---

## Μελέτη της Επίδρασης της Ταχύτητας Ζεύξης και του Μήκους Κωδικής Λέξης στις Φασματικές Εκπομπές Ημιαμφίδρομης Ζεύξης SpaceWire /LVDS

### 2.1 Εκπομπές Συστήματος SpaceWire

Κάθε μεταβαλλόμενη τάση ή ρεύμα είναι πηγή εκπομπής ακτινοβολίας. Περιοδικές μεταβολές σε αυτά τα μεγέθη παράγουν συνεχόμενες εκπομπές. Όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχονται από μια γεννήτρια συχνότητας (ρολόι) και με τον τρόπο αυτό γίνονται πηγές εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Επιπλέον, τα ψηφιακά κυκλώματα χρησιμοποιούν σήματα που αλλάζουν γρήγορα από μια κατάσταση σε μια άλλη (αναπαριστώντας ψηφιακές καταστάσεις και προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσουν τα ενδιάμεσα επίπεδα με απροσδιόριστες ψηφιακές καταστάσεις). Αυτοί οι πολύ μικροί χρόνοι ανόδου και καθόδου συντελούν επιπρόσθετα στις ακτινοβολούμενες εκπομπές. Τα ψηφιακά σήματα από το πεδίο του χρόνου (time domain), που είναι το σύνηθες πεδίο αναπαράστασής τους, μετατρέπονται μέσω της ανάλυσης Fourier στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain), που είναι το σύνηθες πεδίο αναπαράστασης των ακτινοβολούμενων εκπομπών. Για τα συστήματα επικοινωνίας η ανάλυση των εκπομπών μπορεί να γίνει σύνθετη (η ψευδοτυχασιότητα στα δεδομένα προκαλεί μεγάλη περιοδικότητα), και είναι σύνηθες η συμπεριφορά να μετριέται απευθείας στο πεδίο της συχνότητας με τη βοήθεια ενός αναλυτή φάσματος (Spectrum Analyzer). Ο κύριος σκοπός της μελέτης των εκπομπών είναι η ελαχιστοποίηση των επιπέδων τους ώστε να μη λαμβάνονται στις συχνοτικές περιοχές που δεν είναι απαραίτητο, δηλαδή να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές.

Οι μηχανισμοί σύζευξης (coupling) παρεμβολών ποικίλουν και μπορεί να είναι αντιστασικοί (resistive), χωρητικοί (capacitive), επαγωγικοί (inductive) και ακτινοβολίας (radiative). Ενώ οι τρεις πρώτες κατηγορίες αφορούν περισσότερο τυπωμένα κυκλώματα και το εσωτερικό περιβλημάτων (enclosures), η τελευταία (radiative coupling) αφορά ιδιαίτερα τις περιπτώσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται μακριά σύρματα (long wires), όπως για παράδειγμα καλώδια σύνδεσης.

Με ρυθμούς δεδομένων αρκετών MHz και χρόνους ανόδου και καθόδου ακμής (edge rise and fall time) της τάξης των ns το φάσμα εκπομπών μπορεί να φτάσει από 1 MHz έως αρκετά GHz. Τα αντίστοιχα μήκη κύματος είναι από 300 m έως μικρότερα από 100 mm και καλύπτουν τα μήκη καλωδίων που χρησιμοποιούνται. Καλώδια με μήκος πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του σήματος είναι ιδιαίτερα καλοί ακτινοβολητές ή δέκτες γι' αυτά τα σήματα. Έτσι, η καλωδίωση συνεισφέρει στη συνολική ακτινοβολία ενός σκάφους τουλάχιστον όσο και οι επιμέρους μονάδες εξοπλισμού. Το SpaceWire, παρόμοια με το καλώδιο SFTP (Shielded Foiled Twisted Pair), ανήκει στην κατηγορία των θωρακισμένων καλωδίων με πολλαπλούς αγωγούς (multiconductor). Αν και άλλες καλωδιώσεις πολλαπλών αγωγών έχουν μελετηθεί στο παρελθόν, [22] - [24], αποτυπώνοντας τη σημασία της μελέτης της ακτινοβολίας από σύνθετες δομές καλωδίων για το πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, οι ακτινοβολούμενες εκπομπές του καλωδίου SpaceWire δεν έχουν μελετηθεί ιδιαίτερα στη βιβλιογραφία.

Οι συγγραφείς της εργασίας [25] προσέγγισαν τις εκπομπές του SpaceWire από την οπτική του φασματικού περιεχομένου επί του καλωδίου και παρουσίασαν τη χαμηλότερη συχνότητα που παρουσιάζεται στο σύστημα επικοινωνίας και τη σχέση της (αντιστρόφως ανάλογη) με τη μεγαλύτερη περιοδικότητα του σήματος. Αυτή είναι πολλαπλάσια του χρόνου δυφίου (bit time) μιας και η συνήθης μονάδα μετάδοσης είναι ομάδες δυφίων, όπως μία δυφιοσυλλαβή (byte) των 8-bit. Η μονάδα μετάδοσης είναι υποπολλαπλάσιο του δυφιακού ρυθμού (bit-rate). Η τυχαιότητα των αποστελλομένων δεδομένων μπορεί να μειώσει περαιτέρω την ελάχιστη συχνότητα, αφού και επιμηκύνει την περιοδικότητα, αν και η βασική ομαδοποίηση των bit του συστήματος μπορεί να δώσει ισχυρές εκπομπές. Οι αρμονικές των ψηφιακών σημάτων περιορίζονται από τους χρόνους ανόδου (rise time) και καθόδου (fall time). Το πλάτος των αρμονικών πέφτει κατά 20 dB/δεκάδα (6 dB/οκτάβα) μέχρι κάποια συχνότητα «γόνατος» ("knee" frequency), όπου ο ρυθμός μείωσης του πλάτους αυξάνει. Αυτή η συχνότητα γόνατος καθορίζεται από τους χρόνους ανόδου και καθόδου ως το αντίστροφο του διπλάσιου του χρόνου ανόδου (ή καθόδου). Έτσι, για χρόνο ανόδου (ή καθόδου) 1 ns η συχνότητα γόνατος είναι 500 MHz. Τα δεδομένα, που αποστέλλονται στην πραγματικότητα, δεν είναι εντελώς τυχαία και το φάσμα χάνει την ομαλότητα του και εμφανίζει αιχμές (spikes) σε σημαντικές συχνότητες, όπως αυτές καθορίζονται από το σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται. Οι συγγραφείς της εργασίας [25] επιχειρηματολογούν ότι ένας λόγος για τις αυξημένες εκπομπές είναι οι γρήγοροι - γρηγορότεροι από ότι χρειάζονται για τη μετάδοση του σήματος - οδηγοί (drivers) LVDS. Αυτή η μεγάλη ταχύτητα προσφέρει αυξημένο περιθώριο λειτουργίας σε βάρος ενός αρκετά εκτεταμένου φάσματος εκπομπών. Αν οι χρόνοι ανόδου και καθόδου των παλμών είναι προσαρμοσμένοι στον ρυθμό δεδομένων, οι υψηλότερες συχνότητες που παράγονται μπορούν να περιοριστούν με αποτέλεσμα να «λερώνεται» λιγότερο το φάσμα. Ένας τρόπος για να συμβεί

αυτό είναι με τον έλεγχο του ρυθμού ακμών (edge rate) μέσω χωρητικού φορτώματος (capacitive loading). Με την προσθήκη ενός πυκνωτή στα άκρα κάθε ενός από τα ζεύγη εκπομπής μειώνεται αρκετά το φάσμα των εκπομπών [25].

Εναλλακτικά, προτείνεται η μεταβολή της χρονικής διάρκειας του bit, της διαπόστασης άκρου έως άκρου, με τυχαία ακολουθία, μια τεχνική γνωστή ως χρονισμός φασματικής εξάπλωσης (spread spectrum clocking). Η τεχνική αυτή εξαπλώνει την ενέργεια από αιχμές μοναδικών συχνοτήτων σε ένα εύρος γειτονικών συχνοτήτων και μειώνει σημαντικά τα επίπεδα των κορυφών. Εφαρμόζεται εύκολα στο SpaceWire, αφού αυτό δεν έχει περιορισμό στον ρυθμό μεταβολής του ρυθμού δεδομένων και υποστηρίζει ενδογενώς τον μηχανισμό μεταβολής του ρυθμού, αφού η ζεύξη ξεκινά στα 10 Mbps και έπειτα μεταβάλλεται στη διάρκεια της μετάδοσης στον επιθυμητό ρυθμό λειτουργίας. Το αποτέλεσμα της εξάπλωσης - η τυχαιοποίηση του ρυθμού (rate randomization) - είναι όπως αναφέρθηκε η κηλίδωση (smearing) της ενέργειας μιας αιχμής σε μια μοναδική συχνότητα σε ένα εύρος συχνοτήτων, γεγονός που μειώνει το μέσο επίπεδο εκπομπών. Η μείωση εξαρτάται από το μέγεθος της εξάπλωσης και το πόσο «αιχμηρό» - το πλήθος και το πλάτος δηλαδή των αιχμών - είναι το αρχικό σήμα. Επιπλέον, η τεχνική αυτή προσφέρει οικονομία ισχύος λόγω της μείωσης της ταχύτητας μετάδοσης. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω τεχνικών συντελεί σε σημαντική ελάττωση του παραγομένου φάσματος και συνεπώς στη μείωση των εκπομπών του συστήματος [25].

Οι συγγραφείς της [25] στηρίζουν την επιχειρηματολογία τους στις μετρήσεις ενός συστήματος με ένα δομοστοιχείο (module) SpaceWire που τροφοδοτεί 2.5 m καλωδίου με ένα σύνδεσμο βρόχου ανακύκλωσης (loopback) στο τέλος. Χρησιμοποίησαν ένα παθητικό δίκτυο ώστε εξασθενήσουν και να συνδυάσουν τα σήματα Data και Strobe με έναν μετασχηματιστή να εκτελεί τη συμμετρο-ασυμμετρική (balanced to unbalanced) μετατροπή.

Η ταχύτητα της ζεύξης και το μήκος της κωδικής λέξης των ψηφιακών συστημάτων των διαστημικών σκαφών παίζει καίριο ρόλο στον σχεδιασμό εξοπλισμού σε όρους λειτουργίας και ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Στο παρόν κεφάλαιο η συμπεριφορά μια ζεύξης SpaceWire/LVDS αξιολογείται μέσω μετρήσεων τόσο εκπεμπόμενης ακτινοβολίας όσο και φασματικού περιεχομένου του σήματος επί του καλωδίου. Δοκιμάζονται διαφορετικές συχνότητες παλμών και διαφορετικά μήκη λέξεων και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υψηλότερη συχνότητα παλμών αυξάνει τις ακτινοβολούμενες εκπομπές του συστήματος. Οι εκπομπές επηρεάζονται επίσης από το μήκος της κωδικής λέξης (pattern length), αφού το πλάτος και η απόσταση των φασματικών γραμμών μεταβάλλονται με το μήκος της κωδικής λέξης. Οι ψηφιακές ζεύξεις SpaceWire/LVDS χρησιμοποιούνται ευρέως σε αποστολές της ESA, όπως GAIA, ExoMars, BepiColombo και Sentinel 1 - 3 & 5, καθώς και μελλοντικές, όπως JUICE, EUCLID, THOR and PLATO ή αποστολές της NASA,

όπως SWIFT, Lunar Reconnaissance Orbiter, LCROSS, GOES-R και άλλες [12]. Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, που επιδρούν στα διάφορα υποσυστήματα, είναι πολύ βασική παράμετρος στη φάση σχεδιασμού κάθε αποστολής [20], [21]. Η μελέτη των παραμέτρων της ζεύξης με έμφαση στην επίδοση του συστήματος και στις ακτινοβολούμενες εκπομπές είναι κρίσιμη για τη βέλτιστη σχεδίαση της καλωδίωσης του διαστημικού σκάφους. Η μέτρηση των διάφορων μεγεθών και χαρακτηριστικών προσφέρει διορατικότητα στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα καθώς και επιβεβαίωση (ή μη) των αναπτυσσόμενων θεωριών. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση ενός συστήματος SpW/LVDS ο αναγκαίος εξοπλισμός για την υλοποίηση μιας πλήρους διάταξης με σκοπό τη μέτρησή της είναι αρκετά ακριβός και όχι ευρέως διαθέσιμος.

Η εργασία [26] είχε παρόμοιους σκοπούς με την προηγούμενη [25], αλλά αυτή τη φορά από τη σκοπιά των μετρήσεων ακτινοβολούμενης ακτινοβολίας. Αποσκοπούσε στη μέτρηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών μιας ημιαμφίδρομης (half duplex) ζεύξης SpaceWire. Αφού δεν υπήρχε διαθέσιμος πραγματικός εξοπλισμός SpaceWire – παρά μόνο το πραγματικό καλώδιο – υλοποιήθηκε μια προσομοίωση της ζεύξης SpaceWire με τον εξής τρόπο. Μετά τη μελέτη του συστήματος αποφασίστηκε τα σήματα Data και Strobe από την έξοδο 50 Ω της γεννήτριας παλμικών δεδομένων (Agilent 81130A) να οδηγούνται σε μια κάρτα τυπωμένου κυκλώματος PCB, στο οποίο υλοποιείται η διεπαφή LVDS και στη συνέχεια στο καλώδιο SpaceWire των 100 Ω. Στην άλλη άκρη του καλωδίου τοποθετείται μια πανομοιότυπη κάρτα PCB. Και τα δύο PCB είναι εφοδιασμένα με αντιστάσεις τερματισμού για τα σήματα που προέρχονται από την άλλη πλευρά της ζεύξης. Έτσι υλοποιείται μια ημιαμφίδρομη ζεύξη. Τα PCB μαζί με τις αντιστάσεις τερματισμού τοποθετήθηκαν μέσα σε θωρακισμένα μεταλλικά κουτιά γειωμένα στο αγωγίμο επίπεδο αλουμινίου. Οι αντιστάσεις τερματισμού επιλέχθηκαν να είναι 100 Ω ώστε να προσαρμόζονται στη γραμμή. Σε αυτή την εργασία υλοποιήθηκε ένα σύστημα ημιαμφίδρομης επικοινωνίας χαμηλού κόστους και χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση ακτινοβολούμενων εκπομπών όσο και της φασματικής πυκνότητας του κατά LVDS κωδικοποιημένου σήματος στο κάθε ζεύγος αγωγών.

Δύο από τις πιο σημαντικές παραμέτρους μιας ζεύξης SpW/LVDS είναι η ταχύτητα της ζεύξης και το μήκος της κωδικής λέξης. Και οι δύο έχουν επίδραση στο φασματικό περιεχόμενο του μεταδιδόμενου σήματος επί του καλωδίου και ως αποτέλεσμα στις ακτινοβολούμενες εκπομπές του συστήματος. Στη συνέχεια, συγκρίνονται διαφορετικές συχνότητες παλμών και μήκη δεδομένων εισόδου με βάση τη φασματική πυκνότητα του σήματος επί του καλωδίου και τις ακτινοβολούμενες εκπομπές.

Οι μετρήσεις της [26] ελήφθησαν ακολουθώντας τις οδηγίες των [27] και [28], ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιστότητα και η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, στα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν αρκετές διαφορές κατά τη διάρκεια της περιόδου μετρήσεων. Μια πιθανή πηγή

αποκλίσεων είναι ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων οι εσωτερικές θωρακίσεις (των ζευγών) του καλωδίου τερματιζόταν ανά ζεύγη στην ακίδα 3 του συνδέσμου σε συμφωνία με το ECSS-E-ST-50-12C. Πλέον αυτή η σύνδεση αναγνωρίζεται ως μη βέλτιστη πρακτική και προτείνεται η σύνδεση όλων των θωρακίσεων στην ακίδα 3 και στους δύο συνδέσμους καθώς και στο περίβλημα (backshell). Άλλη πιθανή αιτία των μεταβολών της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, πέρα από τα φυσιολογικά ανεκτά όρια στο EMC, είναι ο micro miniature D-type σύνδεσμος 9 ακίδων, όπως αυτός καθορίζεται στο πρότυπο SpaceWire, ο οποίος δεν είναι σχεδιασμένος για ισοσταθμισμένα συμμετρικά (balanced) σήματα και προκαλεί εκπομπές ειδικά στις υψηλότερες συχνότητες.

Η επίδοση του micro D-type συνδέσμου αποτελεί γνωστό πρόβλημα. Για να ξεπεραστεί, η Axon Cable ανέπτυξε για την ESA ένα νέο συνεπτυγμένο με προσαρμογή εμπέδησης σύνδεσμο SpaceWire. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής δίνονται στην εργασία [29], όπου παρουσιάστηκε ένας σύνδεσμος επιθυμητών χαρακτηριστικών με σημαντικά βελτιωμένη ηλεκτρική και EMC συμπεριφορά με την ονομασία “MicroMach”. Η μείωση του μεγέθους αντισταθμίστηκε με την απώλεια της ένωσης 360° της θωράκισης στο περίβλημα του συνδέσμου (backshell). Προκαταρκτικές μετρήσεις για την αντίσταση δέσμησης (bonding resistance) ανάμεσα στους αρσενικούς και θηλυκούς συνδέσμους αναφέρουν τιμές μικρότερες από 5 mΩ, near-end και far-end crosstalk (NEXT/FEXT) λιγότερο από -50 dB μέχρι το 1 GHz, και απώλειες ανακλάσεων (return loss) μικρότερες από -20 dB επίσης μέχρι το 1 GHz. Ο νέος σύνδεσμος MicroMach SpaceWire προσφέρει, σε μέγεθος οριακά μεγαλύτερο από τον υπάρχοντα micro-D σύνδεσμο, σημαντικά βελτιωμένη επίδοση σε ρυθμό μετάδοσης, EMC και crosstalk συγκρινόμενος με οποιοδήποτε λύση που υπάρχει στην αγορά [29].

## 2.2 Σχεδιασμός και Υλοποίηση της Διάταξης Μέτρησης

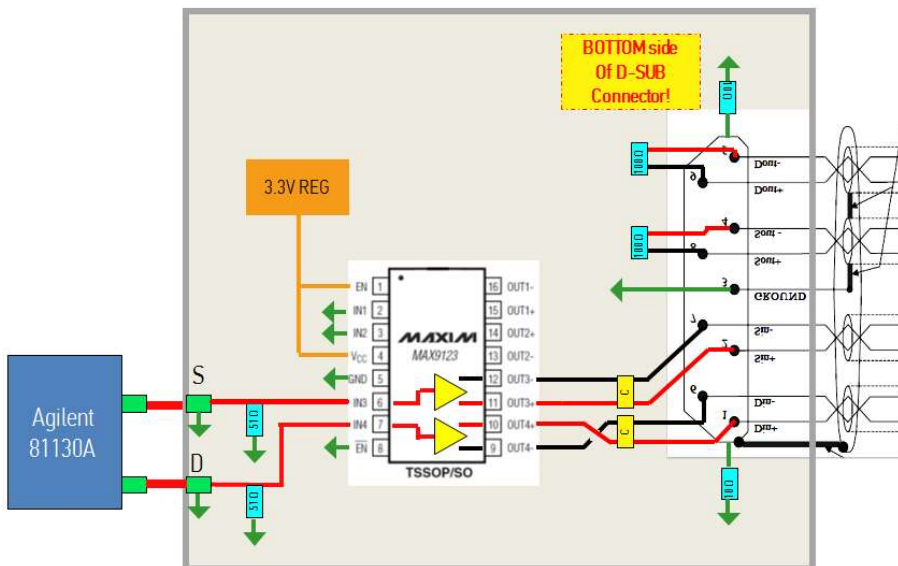
Η διάταξη μέτρησης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 16, είναι σε συμφωνία με τα ευρωπαϊκά πρότυπα μετρήσεων [27], [28]. Καλώδιο SpW μήκους 1 m τοποθετείται σε ύψος 0.05 m πάνω σε επίπεδο γείωσης από αλουμίνιο διαστάσεων  $2.5 \times 1 \times 0.005$  m, και σε απόσταση 0.1 m από την ακμή του επιπέδου. Ο άξονας της κεραίας λήψης είναι εγκάρσιος στη διεύθυνση του καλωδίου και η κεραία έχει τοποθετηθεί σε απόσταση 1 m από το κέντρο του μετρούμενου μήκους καλωδίου. Το ύψος του σημείου αναφοράς της κεραίας είναι 1.2 m, ενώ το ύψος του επιπέδου γείωσης από αλουμίνιο είναι 0.9 m.

Με σκοπό την προσομοίωση της λειτουργίας μιας ζεύξης SpW/LVDS [2], υλοποιήθηκε μια μικρών διαστάσεων κάρτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB), της οποίας το σχηματικό διάγραμμα και η υλοποίηση φαίνονται στο Σχήμα 17 και στο Σχήμα 18, αντίστοιχα, που λειτουργεί ως μια πλήρης

διεπαφή LVDS [16], ώστε να οδηγεί το σήμα από την έξοδο 50 Ω της γεννήτριας παλμικού σήματος στο 100 Ω καλώδιο SrW.



Σχήμα 16 - Υλοποίηση βασικής διάταξης μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου (κεραία/καλώδιο)



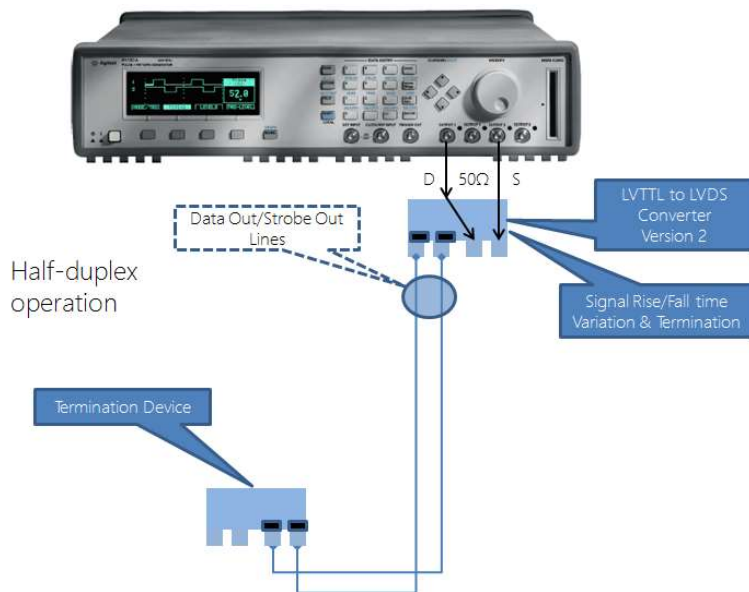
Σχήμα 17 - Σχηματικό διάγραμμα του PCB με τον οδηγό LVDS



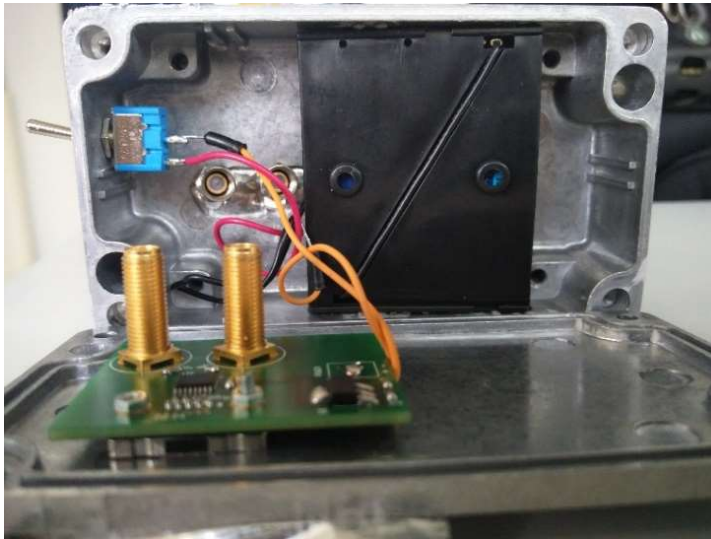


**Σχήμα 18 - Υλοποίηση τυπωμένου κυκλώματος (PCB) οδηγού LVDS**

Ο οδηγός LVDS τροφοδοτείται από τις εξόδους της γεννήτριας 81130A [30] της Agilent με τα σήματα Data και Strobe και προσφέρει έξοδο LVDS. Ο οδηγός διαθέτει αντιστάσεις 100 Ω ως αντιστάσεις τερματισμού (Σχήμα 17) των σημάτων που έρχονται από το απέναντι άκρο της ζεύξης SpW/LVDS ώστε να προσομοιώνεται η ημιαμφίδρομη λειτουργία της ζεύξης SpW/LVDS (Σχήμα 19). Το PCB της διεπαφής LVDS καθώς και οι αντιστάσεις τερματισμού βρίσκονται εγκιβωτισμένα σε θωρακισμένο κουτί (Σχήμα 20), το οποίο έχει γειωθεί στο επίπεδο αλουμίνιου με σκοπό να αποκόπτει τις εκπομπές του PCB ώστε αυτό να μη συνεισφέρει στις μετρούμενες ακτινοβολούμενες εκπομπές. Εντός του θωρακισμένου κουτιού τοποθετήθηκε και η ανεξάρτητη συνεχής (DC) τροφοδοσία του PCB.



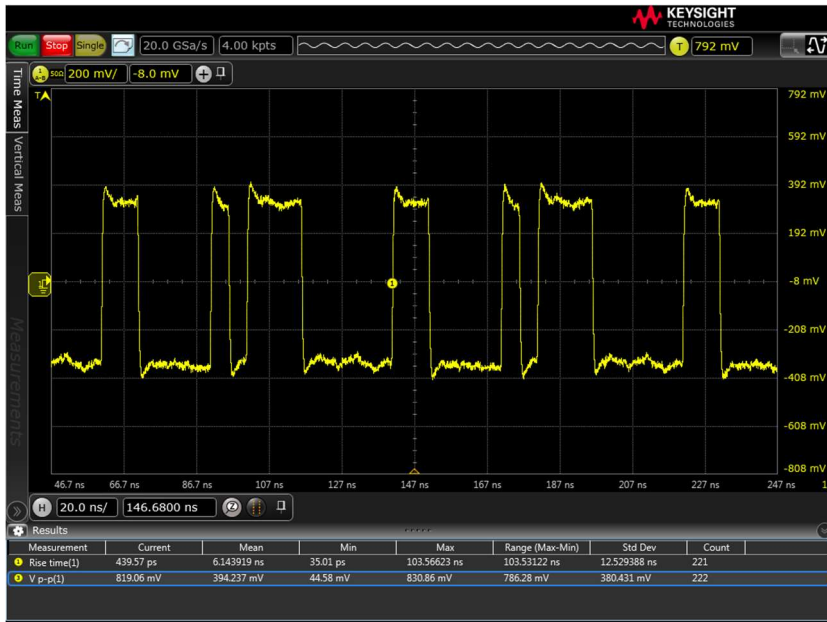
**Σχήμα 19 - Ημιαμφίδρομη λειτουργία**



**Σχήμα 20 - Το PCB του οδηγού LVDS εντός του θωρακισμένου κουτιού**

Με αυτό τον τρόπο όλα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος μπορούν να προσομοιωθούν. Επιπλέον, στο τυπωμένο κύκλωμα του οδηγού LVDS προστέθηκε η δυνατότητα της μεταβολής του χρόνου ανόδου (rise) και καθόδου (fall time) ή αλλιώς του χρόνου μετάβασης (slew rate) των παλμών των σημάτων μέσω της χρήσης πυκνωτών SMD, τοποθετημένους παράλληλα στο διαφορικό ζεύγος όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Το πρότυπο ANSI/TIA/EIA-644 [16] ορίζει ως ελάχιστη αποδεκτή τιμή για τους χρόνους ανόδου/καθόδου για όλους τους υποστηριζόμενους ρυθμούς δυφίων (bit rates) τα 0.26 ns. Στο PCB που υλοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκαν πυκνωτές 8.2 pF ώστε ο χρόνος ανόδου να λάβει τιμή  $\tau_r \sim 0.5$  ns, μια τιμή πολύ κοντά στην ελάχιστη αποδεκτή για τους υπό μελέτη ρυθμούς δυφίων. Στο Σχήμα 18 (δεξιό τμήμα) φαίνεται ο θηλυκός σύνδεσμος τύπου D micro-miniature του PCB για τη διασύνδεση με το καλώδιο SpW. Στο αριστερό τμήμα του ίδιου σχήματος φαίνονται οι σύνδεσμοι εισόδου του οδηγού (ένας για το σήμα Data, ένας για το σήμα Strobe ).

Για να επιβεβαιωθεί ότι το PCB προσφέρει την απαραίτητη λειτουργικότητα πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική μέτρηση με διαφορικό παλμογράφο. Στο Σχήμα 21 φαίνεται το σήμα εξόδου Data στην έξοδο του LVDS οδηγού, όταν τροφοδοτήθηκε από τυχαία ακολουθία δεδομένων που παρήγαγε η γεννήτρια με ταχύτητα 50 MHz και παρουσιάζει την επιθυμητή κυματομορφή [2].



**Σχήμα 21 - Κυματομορφή του σήματος Data για ακολουθία παλμών 50 MHz μετρημένο από την έξοδο του υλοποιημένου οδηγού LVDS με διαφορικό παλμογράφο.**

Με τη χρήση μιας δεύτερης πανομοιότυπης κάρτας, η οποία θα τροφοδοτείται από μια άλλη γεννήτρια παλμών, μπορεί να υλοποιηθεί πλήρως αμφίδρομη λειτουργία.

## 2.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων της Ζεύξης SpW/LVDS

Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν στον ανηχοϊκό θάλαμο (διαστάσεων M: 6.75 m, Π: 3.35 m, Υ: 2.75 m) του Εργαστήριου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων της ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ. Ο εξοπλισμός για τις μετρήσεις των ακτινοβολούμενων εκπομπών και της φασματικής πυκνότητας του σήματος επί του καλωδίου παρουσιάζονται στον πίνακα εξοπλισμού (Πίνακας 6).

**Πίνακας 6 - Εξοπλισμός μετρήσεων**

Εξοπλισμός	Περιγραφή
Schaffner CBL6141A	Bilog Antenna, 30 MHz – 2 GHz, VSWR: <2.0:1
Schaffner SMR 4503	EMI Measuring Receiver, 9 kHz – 2.75 GHz
Agilent 81130A	Arbitrary Function Generator
SpaceWire assembly	2.5 metres-long. Cable AWG 28. Standard construction and wiring per ECSS-E-ST-50-12C
Anritsu MS2721A	Handheld Spectrum Analyzer
Agilent N5182A MXG	RF Vector Signal Generator

Οι ρυθμίσεις του δέκτη EMI για τα διαφορετικά εύρη συχνοτήτων αποτυπώνονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 7) και βασίζονται στις οδηγίες του [27] για τα αντίστοιχα εύρη συχνοτήτων.

**Πίνακας 7 – Ρυθμίσεις δέκτη EMI (Schaffner SMR 4503)**

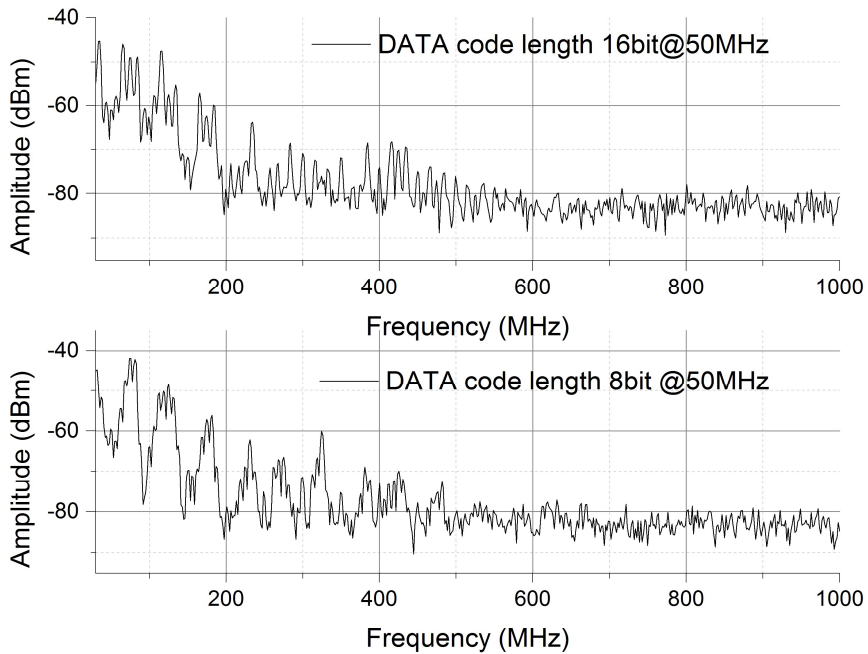
FREQUENCY RANGE	6 dB BANDWIDTH	MEASUREMENT TIME	MINIMUM MEASUREMENT TIME
30 MHz - 1 GHz	100 kHz	0,015 s	0,15 s/MHz
>1 GHz	1 MHz	0,015 s	15 s/GHz

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η απεικόνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών επιλέχθηκε να γίνει σε μονάδες έντασης ηλεκτρικού πεδίου (dBμV/m), αντί για τις τιμές τάσης (dBμV) που επιστρέφει ο δέκτης EMI, επειδή είναι το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Έτσι, σε όλη την έκταση της εργασίας γίνεται μετατροπή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων χωρίς επιπλέον αναφορά σε αυτή σύμφωνα με την εξίσωση (4):

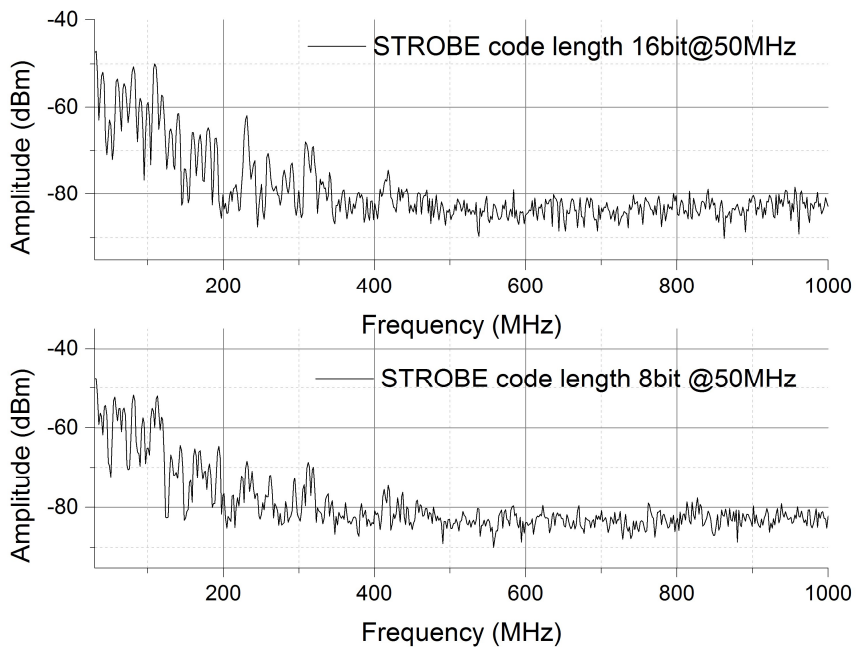
$$E_{dB\mu V/m} = V_{dB\mu V} + AF_{dB/m} + CL_{dB} \quad (4)$$

όπου  $AF$  είναι ο παράγοντας/συντελεστής κεραίας (antenna factor) και  $CL$  οι απώλειες του καλωδίου που συνδέει την κεραία μέτρησης με τον δέκτη EMI. Για τις μετρήσεις της φασματικής πυκνότητας επί του καλωδίου για κάθε διαφορετικό σήμα Data και Strobe, κάθε ένα από τα ζεύγη αγωγών μετρήθηκε ξεχωριστά επί της αντίστασης τερματισμού 100 Ω.

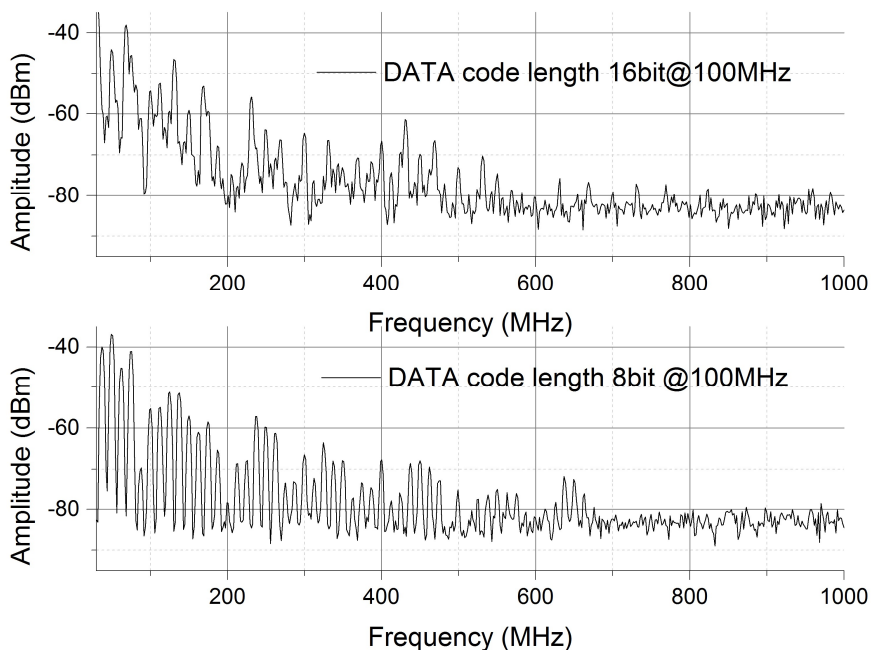
Για να διερευνηθεί η επίδραση του μήκους κωδικής λέξης στη φασματική πυκνότητα του σήματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μήκη 8 και 16 bit. Τα δύο μήκη κωδικής λέξης μετρούνται για 3 τιμές συχνότητας παλμών 50, 100 και 150 MHz και τα συγκριτικά αποτελέσματα για το σήμα Data για κάθε συχνότητα παρουσιάζονται στο Σχήμα 22, στο Σχήμα 24 και στο Σχήμα 26. Τα αποτελέσματα της μέτρησης για την περίπτωση του σήματος Strobe απεικονίζονται στο Σχήμα 23, στο Σχήμα 25 και στο Σχήμα 27 αντίστοιχα.



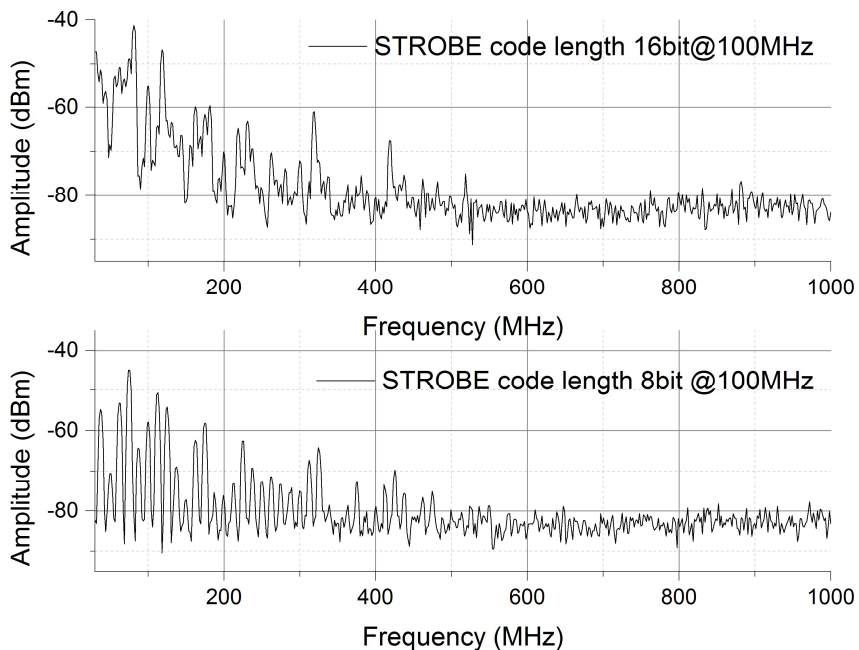
**Σχήμα 22 – Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Data επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 50 MHz**



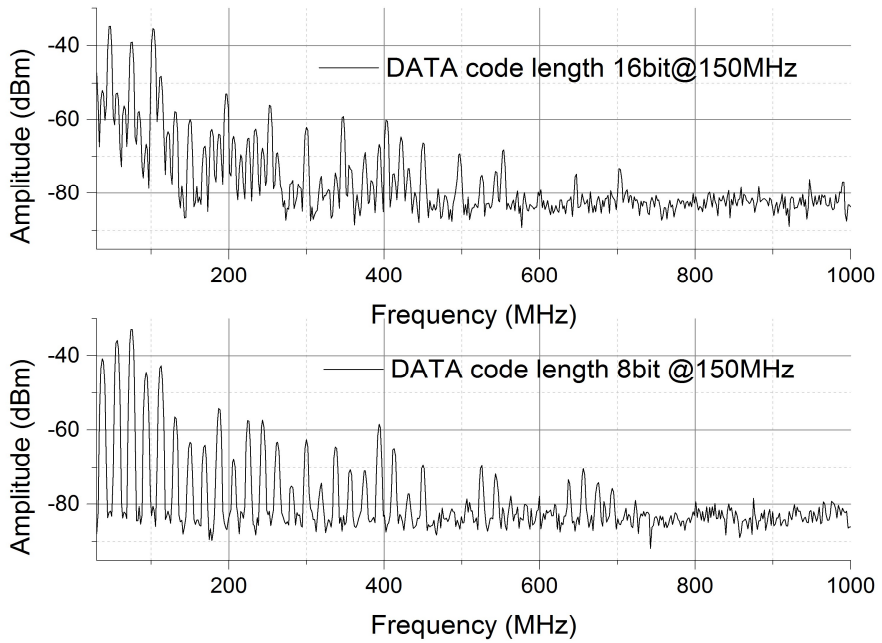
**Σχήμα 23 – Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Strobe επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 50 MHz**



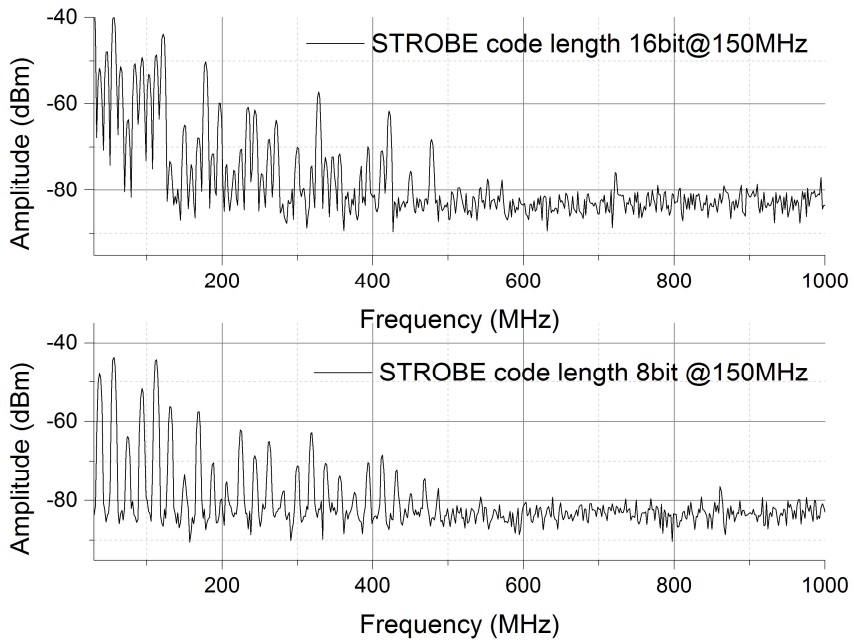
**Σχήμα 24 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Data επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 100 MHz**



**Σχήμα 25 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Strobe επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 100 MHz**

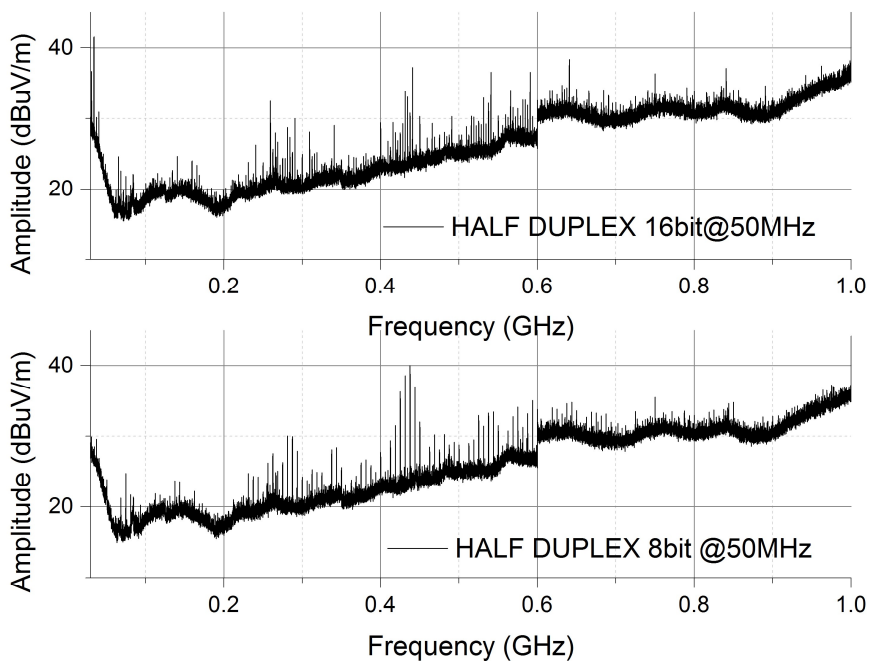


**Σχήμα 26 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Data επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 150 MHz**



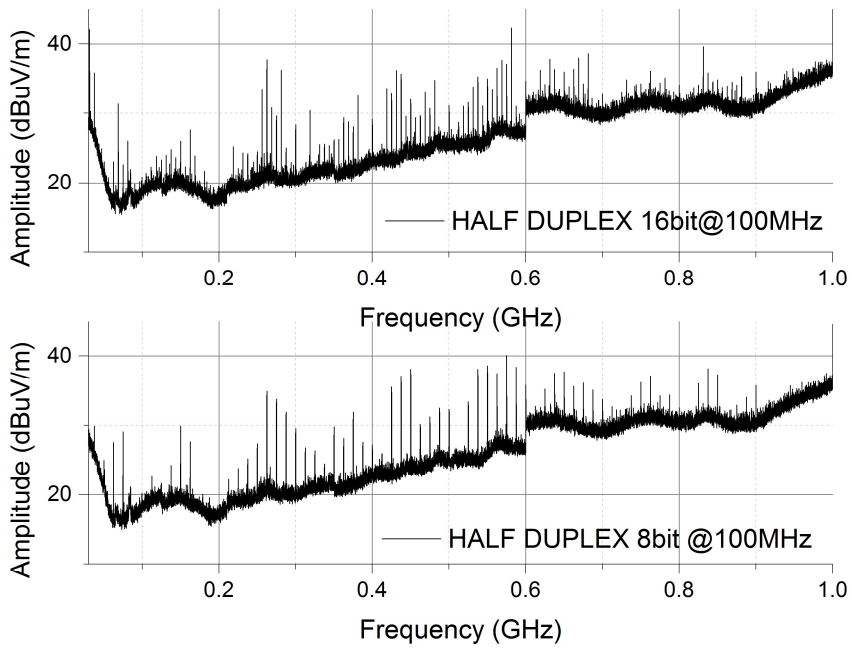
**Σχήμα 27 - Συγκριτικά αποτελέσματα μετρούμενου φάσματος σήματος Strobe επί του καλωδίου για ρυθμό παλμού 150 MHz**

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των ακτινοβολούμενων εκπομπών στην περίπτωση της συχνότητας 50 MHz, για ημιαμφίδρομη λειτουργία 8 bit και 16 bit μήκος κωδικής λέξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 28. Είναι ξεκάθαρο ότι το μεγαλύτερο μήκος (16 bit) παρουσιάζει μειωμένο πλάτος και απόσταση σε σχέση με το μήκος 8 bit. Αυτή η συμπεριφορά επαναλαμβάνεται ανεξάρτητα από την ταχύτητα (συχνότητα παλμών), όπως γίνεται εμφανές από το Σχήμα 29 (συχνότητα παλμών 100 MHz) και το Σχήμα 30 (συχνότητα παλμών 150 MHz). Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα σχήματα αυτά, όσο η ταχύτητα ζεύξης αυξάνεται τα επίπεδα των ακτινοβολούμενων εκπομπών αυξάνονται σε ολόκληρο το φάσμα. Αυτό το αποτέλεσμα της μεταβολής της ταχύτητας, όπως και η επίδραση του μήκους λέξης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να μειωθεί η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή σε περιοχές ενδιαφέροντος. Ανεπιθύμητες φασματικές γραμμές μπορούν να μεταφερθούν μακριά από ιδιαίτερα ευαίσθητες περιοχές του φάσματος ή να μειωθεί το πλάτος τους με κατάλληλη μεταβολή του μήκους λέξης.

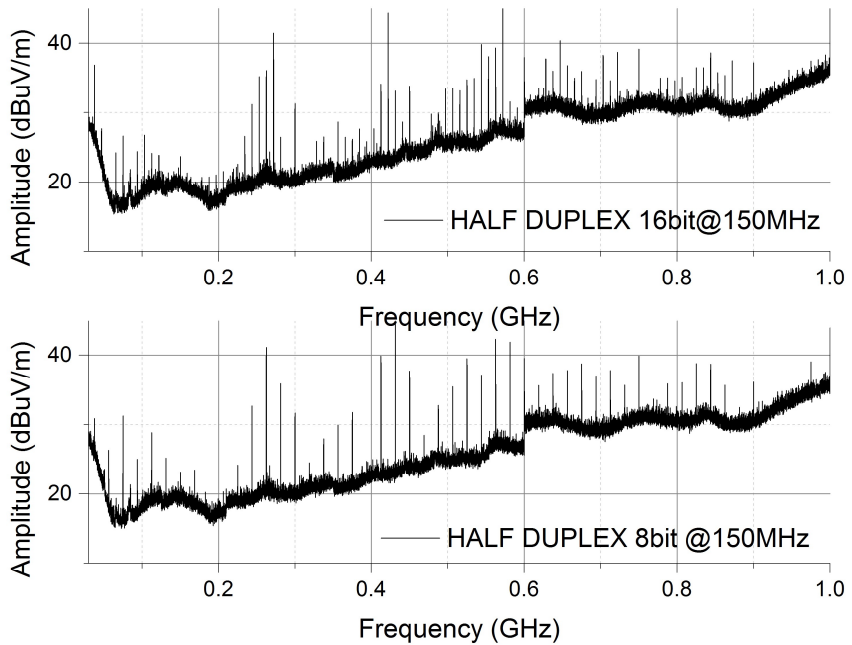


**Σχήμα 28 - Συγκριτικές ακτινοβολούμενες εκπομπές για συχνότητα παλμού 50 MHz, ημιαμφίδρομη λειτουργία, κάθετη πόλωση**





**Σχήμα 29 - Συγκριτικές ακτινοβολούμενες εκπομπές για συχνότητα παλμού 100 MHz, ημιαμφίδρομη λειτουργία, κάθετη πόλωση**



**Σχήμα 30 - Συγκριτικές ακτινοβολούμενες εκπομπές για συχνότητα παλμού 150 MHz, ημιαμφίδρομη λειτουργία, κάθετη πόλωση**

## 2.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ένα σύνολο μετρήσεων μιας συντεθειμένης ημιαμφίδρομης ζεύξης SpW/LVDS και τα αποτελέσματα αποσαφηνίζουν την επίδραση του μήκους κωδικής λέξης και της ταχύτητας της ζεύξης στα επίπεδα ακτινοβολούμενων εκπομπών και στο φασματικό περιεχόμενο του σήματος επί του καλωδίου. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ξεκάθαρα ότι με την αύξηση του μήκους κωδικής λέξης το πλάτος και η απόσταση των φασματικών συνιστωσών μειώνονται. Επιπλέον, με την αύξηση της ταχύτητας της ζεύξης (συχνότητα παλμών) το πλάτος των ακτινοβολούμενων εκπομπών αυξάνεται. Αυτά τα συμπεράσματα μπορούν να ωφελήσουν τον σχεδιασμό συστημάτων και ειδικά των πολύ ευαίσθητων διαστημικών, καθώς προσφέρουν τρόπους για τη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) σε φασματικές περιοχές ενδιαφέροντος βελτιώνοντας της ευρωστία (robustness) του συστήματος.

# Κεφάλαιο 3

---

## Μοντελοποίηση Ακτινοβολούμενων Ηλεκτρομαγνητικών Εκπομπών Θωρακισμένης Καλωδίωσης

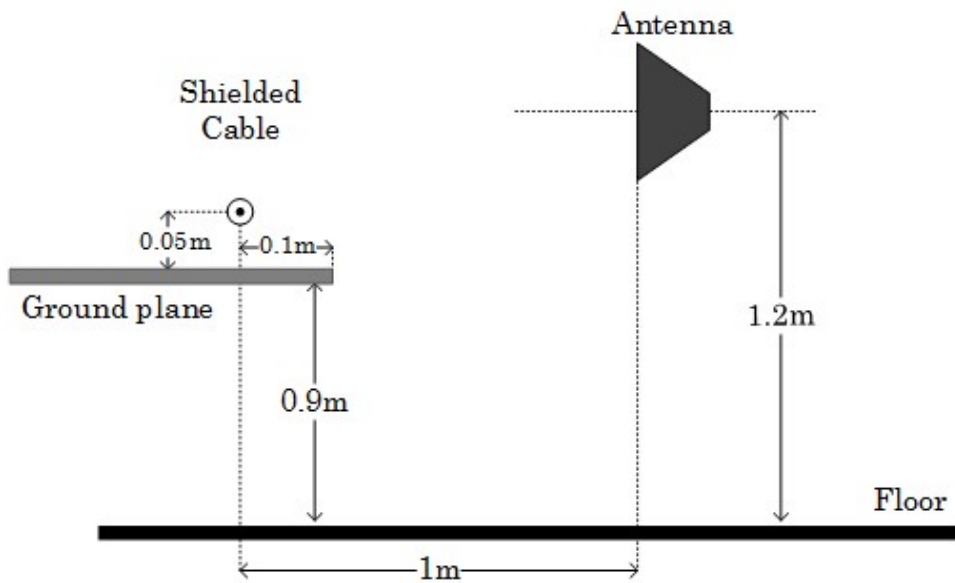
Τα συστήματα των δορυφόρων και των διαστημικών σκαφών είναι γενικά αρκετά ευαίσθητα και υπό συνθήκες τρωτά σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τα θωρακισμένα καλώδια, που συνδέουν τα συστήματα και τα υποσυστήματα, αποτελούν έναν από τους κύριους παράγοντες των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών. Η ελαχιστοποίηση των εκπομπών αυτών είναι κρίσιμη για την επίτευξη της αναγκαίας ηλεκτρομαγνητικής καθαρότητας για την εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων και την αξιοπιστία των μετρήσεων που λαμβάνονται. Ένα μοντέλο πρόβλεψης των εκπομπών αυτών είναι πολύτιμο και αναγκαίο εργαλείο, γιατί προσφέρει τη δυνατότητα εύκολης περιγραφής της συμπεριφοράς τους και παράλληλα δίνει τη δυνατότητα για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μεθοδολογία μοντελοποίησης ακτινοβολούμενων εκπομπών για θωρακισμένα καλώδια [31], παρέχοντας τη δυνατότητα πρόβλεψης των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών βασισμένο στην αποσύνθεση (decomposition) των συνεισφερόντων φαινομένων συμπεριλαμβανομένων των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του επιπέδου γης (ground plane). Το μοντέλο είναι βασισμένο σε τυποποιημένες (standardized) μετρήσεις και επαληθεύεται για διαφορετικές περιπτώσεις τόσο υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένο το επίπεδο γης, όσο και της θέσης του υπό μοντελοποίηση καλωδίου.

### 3.1 Εισαγωγή

Η ανάγκη για την εύρεση ενός ισοδύναμου ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου για την εκτίμηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών του ηλεκτρικού πεδίου ενός δοκιμίου (Equipment Under Test - EUT) με βάση μετρήσεις EMI/EMC έχει αντιμετωπισθεί σε πολλά επιστημονικά προβλήματα [32]-[35]. Η αξιολόγηση της επίδρασης του υλικού του επιπέδου γείωσης (ground plane) στην επίδοση ψηφιακών δίαυλων υψηλής ταχύτητας από τη σκοπιά των ακτινοβολούμενων εκπομπών είναι ένα θέμα που έχει συγκεντρώσει μεγάλο ενδιαφέρον [20], [21], [25], [36], ειδικά όσον αφορά τα υποσυστήματα των διαστημικών σκαφών. Η στρατηγική γείωσης είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό θέμα, όσον αφορά τον σχεδιασμό ενός

διαστημικού σκάφους. Μια διαδρομή γης χαμηλής αντίστασης και επαγωγής είναι αναγκαία, ώστε να παρέχει ένα μονοπάτι επιστροφής των ρευμάτων διαρροής και των επαγόμενων ρευμάτων από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Αν και αυτό συνήθως κατασκευάζεται από αλουμίνιο, πλέον οι διαστημικές υπηρεσίες απαιτούν πολύ ελαφριές κατασκευές, τα διαδεδομένα πετάσματα (panel) αλουμινίου αντικαθίστανται σταδιακά από ελαφρύτερα υλικά. Αυτό συνεπάγεται ότι οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και οι παρεμβολές πρέπει να αναλυθούν εκ νέου όταν χρησιμοποιούνται τέτοια υλικά. Η κύρια παράμετρος, που χρησιμοποιείται για μια τέτοια αξιολόγηση, είναι το ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο (radiated E-field) από τους ψηφιακούς διαύλους υψηλών ταχυτήτων, όπως για παράδειγμα το SpaceWire [2], σε συνδυασμό με τη διαφορική σηματοδότηση χαμηλής τάσης (LVDS). Έως και σήμερα η αξιολόγηση γίνεται μέσω προτυποποιημένων μετρήσεων του ηλεκτρικού πεδίου, ωστόσο οι μηχανικοί διαστημικών σκαφών χρειάζονται μια απλή μεθοδολογία ώστε αξιόπιστα, αλλά και εύκολα παράλληλα (και με χαμηλό κόστος), να προβλέπουν τις ακτινοβολούμενες εκπομπές.

Στο πρότυπο ECSS-E-ST-20-07C Rev. 1 [27] για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) παρέχεται μια πρότυπη μετρητική διάταξη, η οποία χρησιμοποιείται ως βάση και στην παρούσα εργασία (Σχήμα 31).



**Σχήμα 31 - Βασική διάταξη μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου (κεραία/καλώδιο)**

Σύμφωνα με την [27] οι μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου εκτελούνται με δεδομένη χωροθέτηση του δοκιμίου και την κεραία λήψης (μέτρησης) σε συγκεκριμένη θέση ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση των διαφορετικών υλικών

και διατάξεων για το επίπεδο γείωσης (ground plane). Οι μετρήσεις εκτελούνται για φάσμα συχνοτήτων από 30 MHz ( $f_{min}$ ) έως 1 GHz ( $f_{max}$ ).

Ανεξάρτητα του τύπου καλωδίωσης και της μεθόδου σηματοδοσίας, οι εκπομπές από τα καλώδια τελικά προέρχονται από ρεύματα που επάγονται με κάποιο μηχανισμό στη θωράκιση του καλωδίου. Αυτά τα ρεύματα μπορούν να ανιχνευθούν ως ρεύματα διαρροής λόγω της αναποτελεσματικότητας της θωράκισης ή ρεύματα κοινού τρόπου λόγω λοξώσεων (skew) των σημάτων, ανακλάσεων, παρεμβολών λόγω σχηματομορφών (pattern), καθυστερήσεων διάδοσης (propagation delays) και συζευγμένου θορύβου [37] - [39].

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα πρωτότυπο σχήμα μοντελοποίησης, το οποίο ως απλουστευμένο μοντέλο αντιμετωπίζει κάθε τύπο καλωδίου αποκλειστικά ως τη θωράκισή του. Οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές του καλωδίου βρίσκουν τις γενεσιουργές τους αιτίες στα επαγόμενα ρεύματα στην επιφάνεια της θωράκισης. Βασική επιδίωξη του μοντέλου είναι η δυνατότητα να εξαχθούν όλες τις αναγκαίες πληροφορίες από μια τυποποιημένη μέτρηση με σκοπό την πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών του θωρακισμένου καλωδίου σε αυθαίρετη θέση λαμβάνοντας υπόψη τις διηλεκτρικές ιδιότητες του επιπέδου γείωσης. Η πρόβλεψη αυτή γίνεται μέσω της αποσύνθεσης των συνεισφερόντων φαινομένων. Με βάση αυτή την πρόβλεψη, η αξιολόγηση της επίδοσης του επιπέδου γείωσης και η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών καθίσταται δυνατή.

## 3.2 Διατύπωση του Προβλήματος

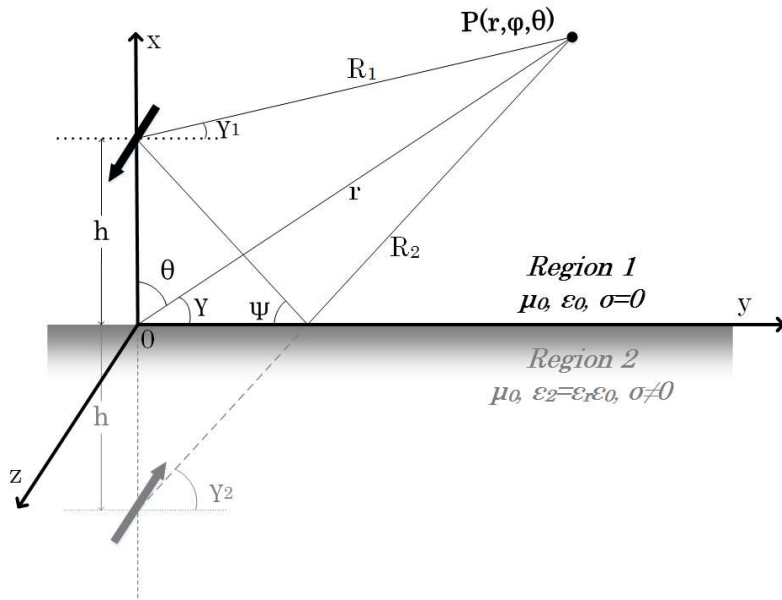
### 3.2.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο και Διατύπωση Προβλήματος

Η βασική υπόθεση για τη δημιουργία του μοντέλου είναι ότι η θωράκιση κάθε τερματισμένης γραμμής (ομοαξονικό καλώδιο, καλώδιο Ethernet, SpaceWire, κ.α.) μπορεί να παρασταθεί ως μια κεραία οδεύοντος κύματος (travelling wave antenna). Η κεραία οδεύοντος κύματος πάνω από τέλεια αγωγίμο επίπεδο γείωσης (άπειρης αγωγιμότητας) σύμφωνα με τη θεωρία ειδώλων αναμένεται να εκπέμπει σχεδόν ελάχιστο ηλεκτρικό πεδίο στο προτυποποιημένο σημείο μέτρησης [27], έτσι η συγκεκριμένη μέτρηση θεωρείται ως ελάχιστο επίπεδο αναφοράς (η πραγματικά ελάχιστη τιμή 0 αναμένεται στο επίπεδο του ύψους του επιπέδου γείωσης). Έτσι, η αξιολόγηση των διαφορετικών επιπέδων γείωσης χαμηλής αγωγιμότητας μπορεί να γίνει συγκριτικά με αυτό ελάχιστο επίπεδο αναφοράς.

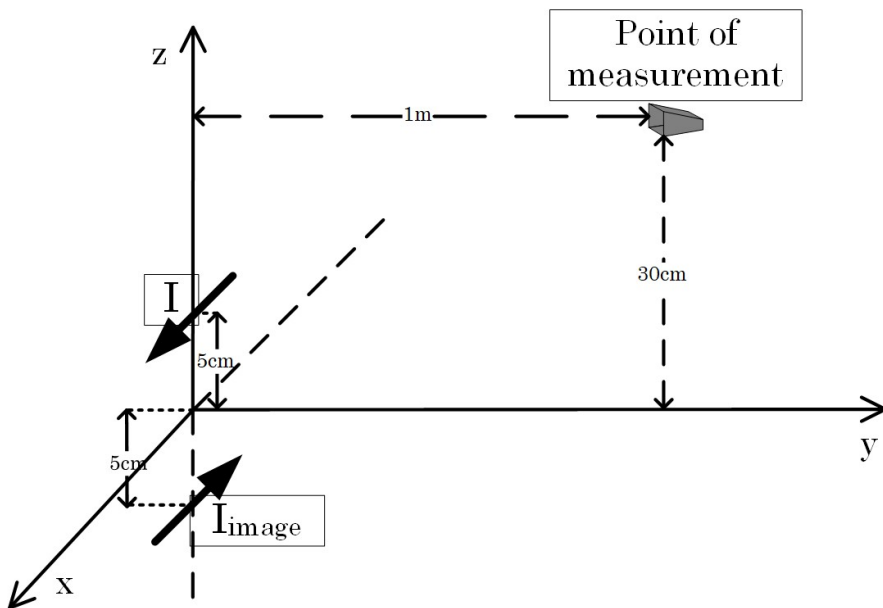
Αν θεωρήσουμε οριζόντια κατανομή ρεύματος (πηγή του ηλεκτρικού πεδίου) πάνω από άπειρο αγωγίμο επίπεδο γείωσης (Σχήμα 32 και Σχήμα 33), το ολικό ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης (μέτρησης)  $P(r, \theta, \varphi)$  είναι το άθροισμα του προσπίπτοντος κύματος  $E_{\gamma}^1$  και του ανακλώμενου  $E_{\gamma}^2$ .

Η πηγή θεωρείται ότι έχει το κέντρο της στο σημείο  $(0, 0, h)$  και το αγώγιμο επίπεδο γείωσης είναι το επίπεδο  $xy$ . Δηλαδή:

$$E_{\gamma} = E_{\gamma}^1 + E_{\gamma}^2 \quad (5)$$



Σχήμα 32 - Υπολογισμός ολικού πεδίου κατανομής ρεύματος λόγω ανάκλασης



Σχήμα 33 - Μοντελοποίηση με δύο κεραίες οδεύοντος κύματος

Στην περιοχή του μακρινού πεδίου το προσπίπτον πεδίο (incident field) είναι:

$$E_{\gamma}^1 = E_0 \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi R_1} f(\gamma_1) \quad (6)$$

όπου  $E_0 = j\omega\mu$  και  $f(\gamma) = \sin\gamma \frac{1 - e^{-jk(1-\cos\gamma)}}{jk(1-\cos\gamma)}$ .

Το ανακλώμενο (reflected) κύμα είναι  $E_{\gamma}^2 = \Gamma E_0 \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi R_2} f(\gamma_2)$ , όπου  $\Gamma$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient), ο οποίος στην περίπτωση του τέλεια αγωγίμου (άπειρη αγωγιμότητα) επιπέδου γείωσης παίρνει την τιμή -1.

Λαμβάνοντας υπόψη την τυποποιημένη μέτρηση, στην οποία υποθέτουμε  $r \gg h$ , μπορεί να γίνουν οι επόμενες θεωρήσεις [37] - [39]:

$$\frac{1}{4\pi R_1} \cong \frac{1}{4\pi R_2} \cong \frac{1}{4\pi r} \quad (7)$$

$$f(\gamma_1) \cong f(\gamma_2) \cong f(\gamma) \quad (8)$$

Κάνοντας επίσης χρήση των προσεγγίσεων

$$R_1 = \sqrt{r^2 + h^2 - 2rh \cos\theta} \approx r - h \cos\theta \text{ και}$$

$$R_2 = \sqrt{r^2 + h^2 + 2rh \cos\theta} \approx r + h \cos\theta$$

προκύπτει ότι

$$e^{-jkR_1} \approx e^{-jkr} e^{jkh \cos\theta} \text{ και } e^{-jkR_2} \approx e^{-jkr} e^{-jkh \cos\theta}$$

Επίσης, από το γινόμενο των μοναδιαίων διανυσμάτων  $\mathbf{y}$  και  $\mathbf{r}$  προκύπτει ότι  $\cos\gamma = \sin\theta \sin\varphi$ . Έτσι, το ολικό πεδίο στο σημείο μέτρησης  $P$  είναι:

$$\begin{aligned} E_{\gamma} &= E_{\gamma}^1 + E_{\gamma}^2 = E_0 \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi R_1} f(\gamma_1) + \Gamma E_0 \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi R_2} f(\gamma_2) = \\ &= \frac{E_0 e^{-jkr}}{4\pi R} [e^{jkh \cos\theta} + \Gamma e^{-jkh \cos\theta}] f(\gamma) \end{aligned} \quad (9)$$

Και στην υπό εξέταση περίπτωση ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} E_{\gamma} &= \frac{j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi R} [e^{jkh \cos\theta} + \Gamma e^{-jkh \cos\theta}] \\ &\sqrt{1 - \sin^2\theta \sin^2\varphi} \frac{1 - e^{-jkL(1 - \sin\theta \sin\varphi)}}{jk(1 - \sin\theta \sin\varphi)} \end{aligned} \quad (10)$$

Στη γενική περίπτωση ενός μέσου με απώλειες, ο μιγαδικός συντελεστής ανάκλασης  $\Gamma$ , για την οριζόντια πόλωση, είναι:

$$\Gamma = \frac{\sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}) - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}) - \cos^2 \psi}} \quad (11)$$

ενώ για την κάθετη πόλωση είναι:

$$\Gamma = \frac{(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}) \sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}) - \cos^2 \psi}}{(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}) \sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}) - \cos^2 \psi}} \quad (12)$$

όπου  $\mu, \epsilon_r, \sigma$  είναι, αντίστοιχα, η σχετική διαπερατότητα, η σχετική διηλεκτρική σταθερά (relative permittivity) και η αγωγιμότητα (conductivity) του υλικού του επιπέδου γείωσης,  $\psi$  είναι η γωνία (εφαπτομενικής) πρόσπτωσης (grazing angle). Τέλος, θεωρούμε οριζόντια πόλωση λόγω της διάταξης της μέτρησης.

Στην περίπτωση που υπάρχει ατελής τερματισμός της θωράκισης, υπάρχει ένας επιπλέον όρος επαγόμενου ρεύματος στη θωράκιση λόγω ανάκλασης που πρέπει να εισαχθεί στην εξίσωση (9), δηλαδή:

$$E_\gamma = [f(\gamma) + af'(\gamma)] I(\omega) \frac{j\omega\mu e^{-jkR}}{4\pi R} [e^{jkh \cos \theta} + \Gamma e^{-jkh \cos \theta}] \quad (13)$$

όπου  $\alpha = |\alpha| e^{j \text{Arg}(\alpha)}$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης του ρεύματος λόγω του ατελούς τερματισμού της θωράκισης. Ο όρος  $f'(\gamma)$  αντιστοιχεί στο ανακλώμενο ρεύμα και το είδωλο του:

$$f'(\gamma) = \sin \gamma \frac{e^{jkL(1+\cos \gamma)} - 1}{jk(1+\cos \gamma)} \quad (14)$$

### 3.2.2 Διάγραμμα Ροής του Προτεινομένου Μοντέλου

Η διαδικασία για την σύνθεση του μοντέλου μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Αρχικά, τοποθετείται η κεραία οδεύοντος κύματος στη θέση  $(0,0,h)$ , και επιλέγεται ένα σημείο παρατήρησης  $P$ . Έτσι η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο μέτρησης αναπαρίσταται με  $E_{\text{Measurement}}$ . Για δεδομένη τιμή συχνότητας  $\omega_i$  το μοντέλο υπολογίζει τον συντελεστή ανάκλασης του επιπέδου γείωσης  $\Gamma$  μέσω της (11), λαμβάνοντας υπόψη τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υλικού. Με γνωστό τον  $\Gamma$  για να υπολογιστεί το μέτρο και η φάση του συντελεστή ανάκλασης  $\alpha$  όσο και το πλάτος του ρεύματος  $I$  για τη συχνότητα αυτή χρησιμοποιείται μια στοχαστική μέθοδος ώστε να ταυτίσει την τιμή της μέτρησης με την αντίστοιχη που παράγεται από το μοντέλο.

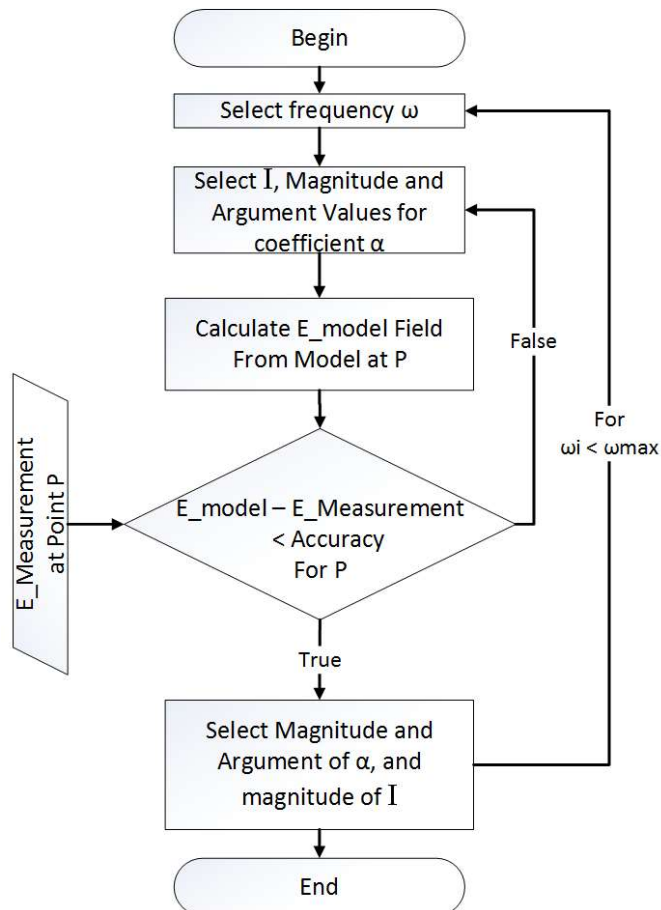
Ως στοχαστική μέθοδος για την υλοποίηση αυτή επιλέχθηκε ο ευρέως γνωστός και διαδεδομένος σε επιστημονικά προβλήματα γενετικός αλγόριθμος (Genetic Algorithm - GA). Σε κάθε γενεά (generation) ο γενετικός



αλγόριθμος δίνει τιμές στο μέτρο και στη φάση της μιγαδικής παραμέτρου  $\alpha$  και στο πλάτος του  $I$ , υπολογίζοντας το ηλεκτρικό πεδίο (που παράγεται από το μοντέλο) στο σημείο μέτρησης (παρατήρησης)  $P$  σύμφωνα με την (13), με κριτήριο την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης καταλληλότητας/κόστους (fitness/cost function). Στο προτεινόμενο σχήμα η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την καταλληλότητα κάθε γενεάς είναι η

$$f_{fitness} = \left| 1 - \frac{E_{model}}{E_{measurement}} \right|^2 \quad (15)$$

Όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο ελαχιστοποίησης ο γενετικός αλγόριθμος σταματά και η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου για τη συγκεκριμένη συχνότητα  $\omega_i$  υπολογίζεται για τις παραμέτρους  $\alpha$  και  $I$  που επιστρέφονται ως λύση από τον γενετικό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις συχνότητες μέχρι τη μέγιστη  $\omega_{max}$ , που αντιστοιχεί σε τιμή 2 GHz. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 34.

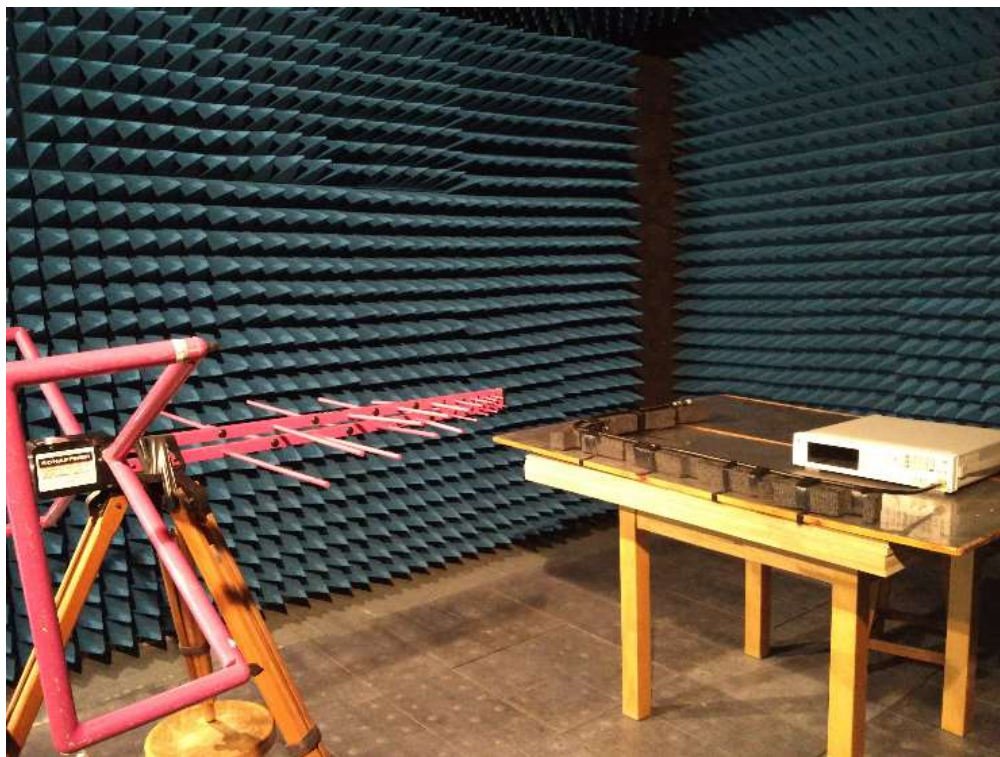


Σχήμα 34 - Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μοντελοποίησης

### 3.3 Προκαταρκτικές Μετρήσεις & Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Οι μετρήσεις έγιναν στον ανηχοϊκό θάλαμο του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων στο ΕΜΠ (διαστάσεων Μ: 6.75 m, Π: 3.35 m, Υ: 2.75 m). Ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ακτινοβολούμενων εκπομπών, δίνεται στον πίνακα εξοπλισμού (Πίνακας 6).

Το μετρούμενο δοκίμιο αποτελείται από τερματισμένο ομοαξονικό καλώδιο RG58C/U MIL-C-17 μήκους 1 m, τοποθετημένου εγκάρσια στη διεύθυνση της κεραίας [27], [28], όπως φαίνεται στο Σχήμα 35.



**Σχήμα 35 - Ανηχοϊκός Θάλαμος ΕΜΠ - Βασική διάταξης μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου (κεραία/καλώδιο)**

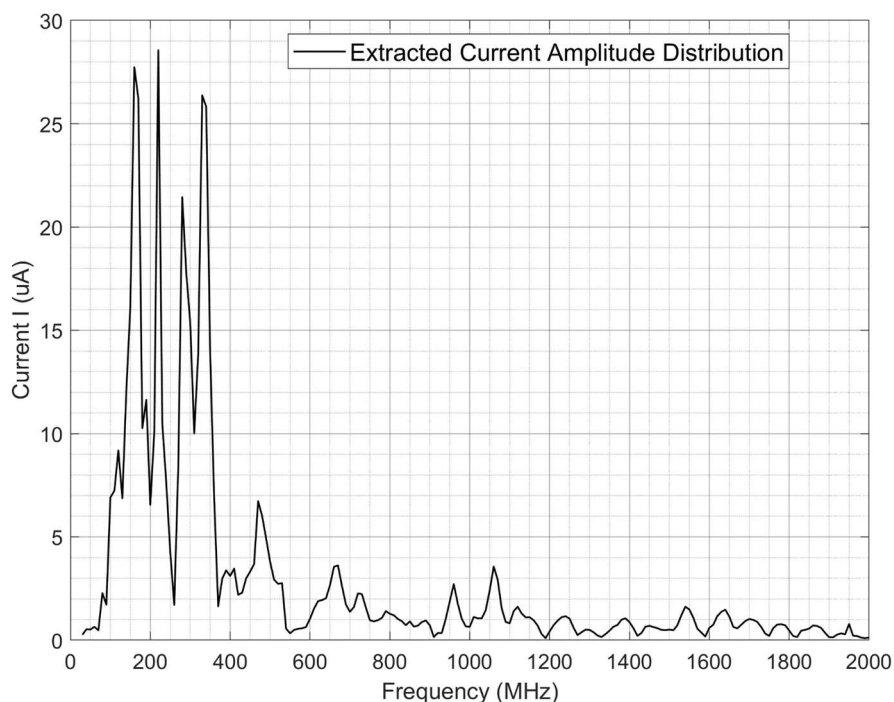
Διεξήχθησαν δύο σετ μετρήσεων για δύο διαφορετικά υλικά του επιπέδου γείωσης (αλουμίνιο και ξύλο), καθώς και για δύο διαφορετικές τιμές ύψους του καλωδίου από το επίπεδο γείωσης, 5 και 10 cm. Από τον υπολογισμό των  $\Gamma$ ,  $\alpha$  και  $I$  για τα δύο επίπεδα γείωσης με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις, υπολογίζονται οι τιμές του μοντέλου του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο μέτρησης  $P$ . Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τις διηλεκτρικές

ιδιότητες των υλικών του επιπέδου γείωσης, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του  $\Gamma$  σε κάθε περίπτωση.

**Πίνακας 8 – Διηλεκτρικά χαρακτηριστικά υλικών επιπέδου γείωσης**

	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\mu$
Αλουμίνιο	1	$38 \cdot 10^6$	1
Ξύλο	3.1	$10^{-14}$	1

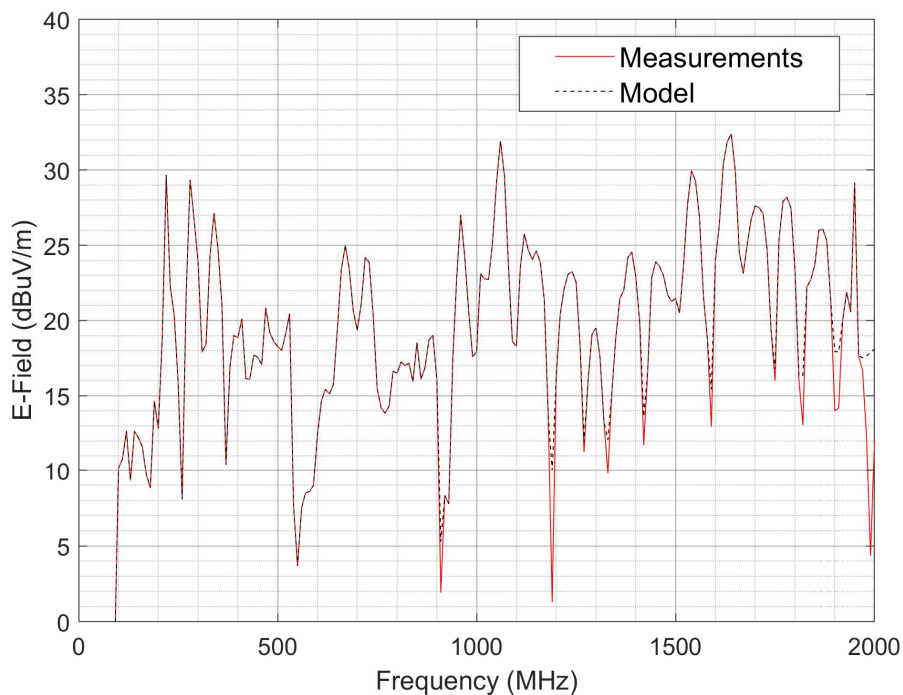
Από τον γενετικό προκύπτει ότι το πλάτος και η φάση του μιγαδικού συντελεστή  $a$  για τα δύο επίπεδα γείωσης λαμβάνουν τις μέσες τιμές 0.24 και  $93.17^\circ$ , αντίστοιχα. Το Σχήμα 36 παρουσιάζει το πλάτος της ρευματικής κατανομής για κάθε συχνότητα όπως προκύπτει από τον γενετικό αλγόριθμο.



**Σχήμα 36 – Αποτέλεσμα πρόβλεψης πλάτους ρεύματος για επίπεδο αλουμίνιου μέσω γενετικών αλγορίθμων (GA)**

Το καλώδιο (κεραία οδεύοντος κύματος) είναι τοποθετημένη σε ύψος  $h = 5 \text{ cm}$  πάνω από το επίπεδο γείωσης και στις δύο περιπτώσεις. Για το σημείο μέτρησης  $P$ , η απόσταση  $r$  είναι 1.14 m, η γωνία  $\theta = 74.75^\circ$  και η γωνία  $\varphi = 90^\circ$ . Στο Σχήμα 37 παρουσιάζονται οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου, όπως αυτές παράγονται σύμφωνα με το μοντέλο σε σύγκριση με τις μετρήσεις για το επίπεδο γείωσης από αλουμίνιο. Είναι εμφανές ότι υπάρχει καλή

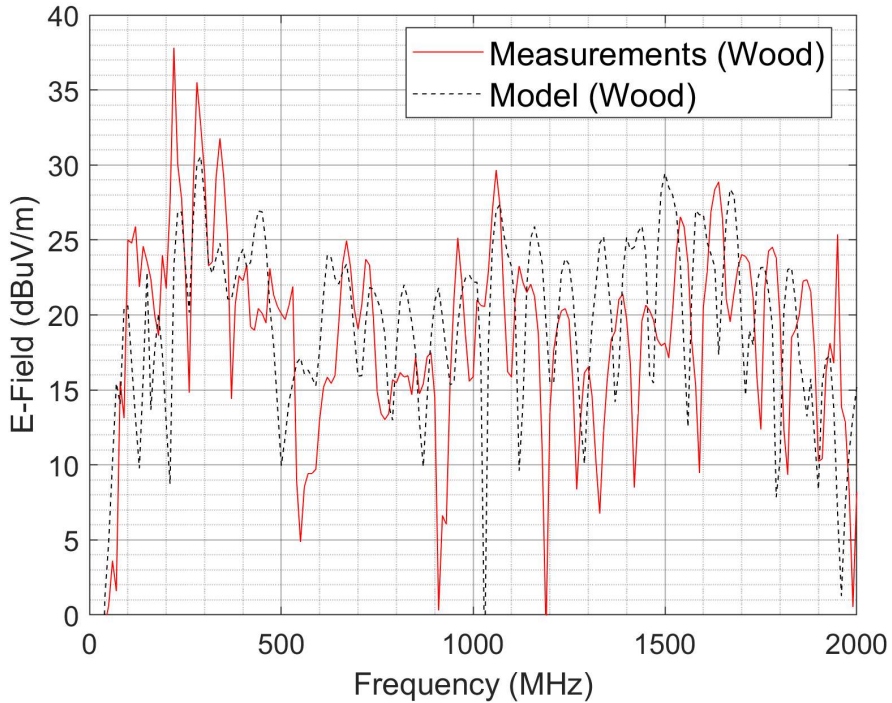
συμφωνία ανάμεσα στις μετρήσεις και στις παραγόμενες τιμές από το μοντέλο.



**Σχήμα 37 - Σύγκριση μετρήσεων ηλεκτρικού πεδίου με αποτελέσματα μοντέλου για επίπεδο αλουμίνιου**

Η καινοτομία της συγκεκριμένης μεθοδολογίας μοντελοποίησης είναι η δυνατότητα που προσφέρει για την πρόβλεψη των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών για μεταβλητό ύψος καλωδίου και για κάθε υλικό επιπέδου γείωσης μέσω της χρήσης μιας τυποποιημένης μέτρησης (aluminum ground, ύψος 5 cm). Η πρόβλεψη επιτυγχάνεται μέσω της αποσύνθεσης (decomposition) των συνεισφερόντων φαινομένων στις ακτινοβολούμενες εκπομπές του δοκιμίου. Όπως προκύπτει από την (13), υπάρχουν 3 συνεισφέροντες παράγοντες: η ρευματική κατανομή (απεικονίζεται στο Σχήμα 36, όπως έχει εξαχθεί από τον γενετικό αλγόριθμο), τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του επιπέδου γείωσης (που καθορίζουν τον συντελεστή ανάκλασης Reflection Coefficient  $\Gamma$ ) και το ανακλώμενο ρεύμα επί του καλωδίου καθώς και το είδωλο του. Το Σχήμα 38 αποτελεί τη βάση για μια αρχική εκτίμηση αυτής της ιδέας. Παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πρόβλεψης του μοντέλου στην περίπτωση ενός ξύλινου επιπέδου γείωσης, τα οποία βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις μετρήσεις. Για την πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων εκπομπών οι τιμές των  $a$  και  $I$ , που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του καλωδίου θεωρούνται σταθερές και παίρνουν τις τιμές που εξήχθησαν από το μοντέλο για το επίπεδο γείωσης από

αλουμίνιο(πρότυπη μέτρηση). Η μόνη παράμετρος που αλλάζει στην περίπτωση του ξύλινου επιπέδου γείωσης είναι ο συντελεστής ανάκλασης  $\Gamma$ .

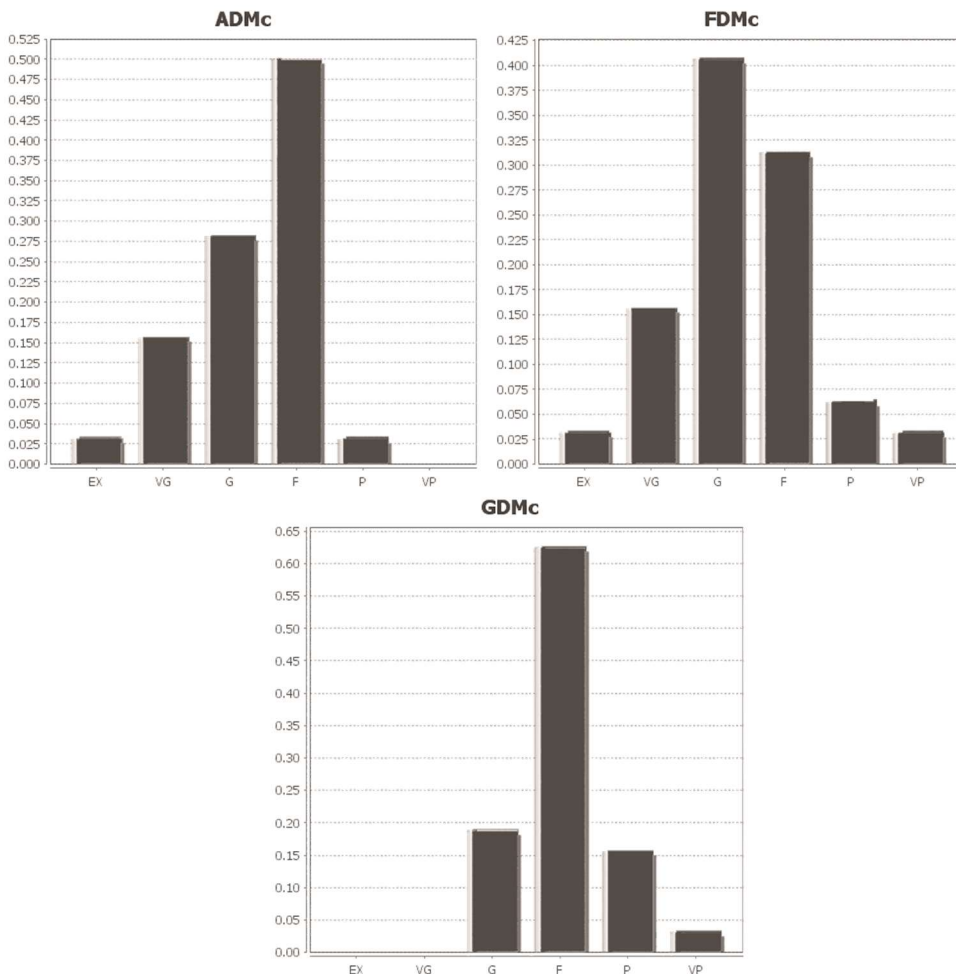


**Σχήμα 38 - Σύγκριση μετρήσεων ηλεκτρικού πεδίου με αποτελέσματα μοντέλου για επίπεδο ξύλου**

Σε τέτοιου είδους μετρήσεις είναι αναμενόμενα αρκετά μεγάλα επίπεδα αβεβαιότητας, έτσι μια ορθότερη εκτίμηση για την καλή συμφωνία (ή μη) μετρήσεων και προβλέψεων του μοντέλου μπορεί να γίνει μέσω κατάλληλων μετρικών, όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Square Error -MSE), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMS ή η τυποποιημένη τεχνική επικύρωσης επιλεκτικών χαρακτηριστικών (Feature Selective Validation - FSV) [40] - [42]. Η τεχνική FSV χρησιμοποιεί το μέτρο διαφοράς πλάτους (Amplitude Difference Measure - ADM), το μέτρο διαφοράς χαρακτηριστικών Feature Difference Measure - FDM) και το μέτρο καθολικής διαφοράς (Global Difference Measure - GDM) ως μετρικές για την εκτίμηση διαφορετικών συνόλων δεδομένων και επιστρέφει για καθεμία μετρική, βαθμό (GRADE) και έκταση (SPREAD). Ο βαθμός (Grade) αποτελεί μια αριθμητική ένδειξη της ποιότητας της σύγκρισης και η έκταση (Spread) αποτελεί μια αριθμητική ένδειξη του επιπέδου εμπιστοσύνης που μπορεί να αποδοθεί στη σύγκριση [40] - [42].

Για την περίπτωση του ξύλινου επιπέδου γείωσης τα αποτελέσματα για αυτές τις μετρικές παρουσιάζονται στο Σχήμα 39 και οι αντίστοιχες τιμές για τα GRADE και SPREAD καθώς και το RMSE παρουσιάζονται στον επόμενο

πίνακα (Πίνακας 9), όπου το επίπεδο εμπιστοσύνης για τις μετρικές του λήφθηκε 85%. Από τις τιμές αυτές εξάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στις μετρήσεις και στις προβλεπόμενες τιμές από το μοντέλο, ειδικά αν λάβουμε υπόψη και την ολική αβεβαιότητα των μετρήσεων, η οποία είναι 6 dB σύμφωνα με το EN 55016-4-2 [43]. Επιπλέον, η δυνατότητα του μοντέλου για την πρόβλεψη του άνω ορίου (worst-case) της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας για αρκετά ευρεία περιοχή συχνοτήτων είναι αρκετά υποσχόμενη, ειδικά αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι βασίζεται αποκλειστικά και μόνο σε μια τυποποιημένη μέτρηση σε ένα σημείο πάνω από τον κοινότερο τύπο επιπέδου γείωσης (αλουμίνιο). Η πρόβλεψη που παρέχεται δίνει μια ασφαλή εκτίμηση για τα μέγιστα επίπεδα εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

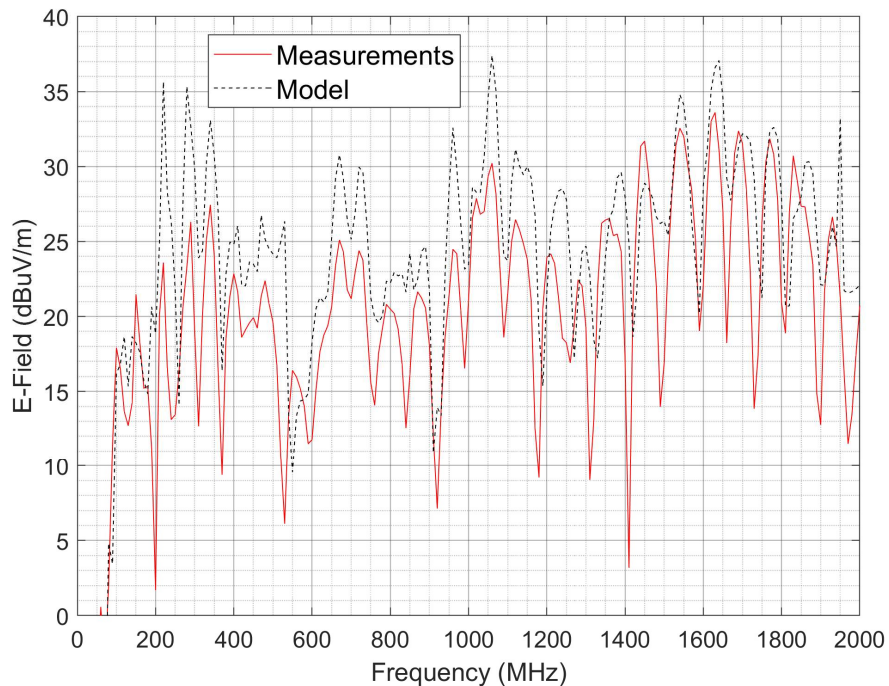


**Σχήμα 39 - Μετρικές τεχνικής FSV για ξύλινο επίπεδο (ADM, FDM, and GDM) (EX= Excellent, VG=Very Good, G=Good, F=Fair, P=Poor, VP=Very Poor)**

**Πίνακας 9 - Τιμές Grade και Spread της Τεχνικής FSV και RMS για ξύλινο επίπεδο και ύψος καλωδίου 5 cm**

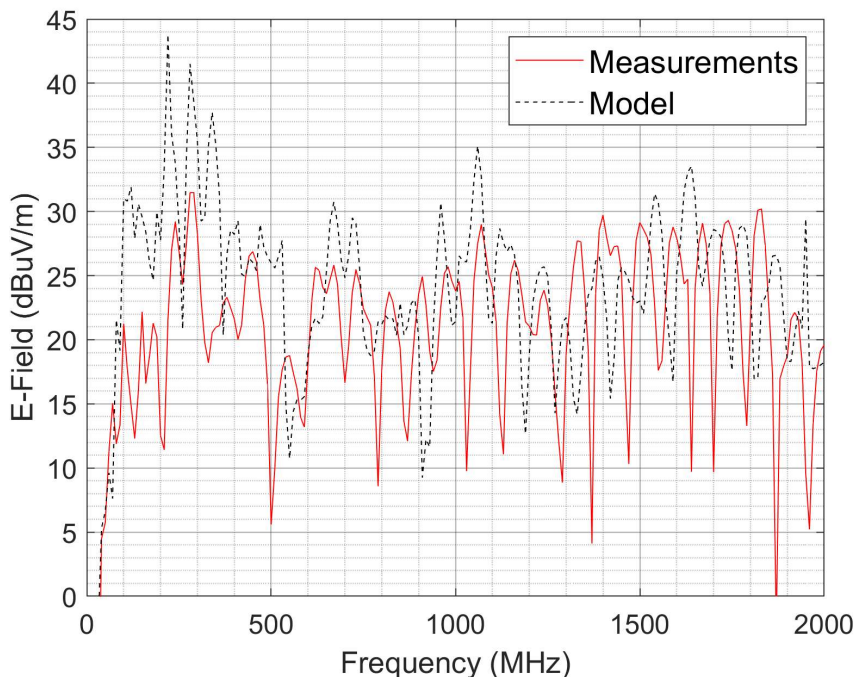
	GRADE	SPREAD
ADM	4	3
FDM	4	3
GDM	5	3
RMSE	6.14 dBuV/m	

Για να διερευνηθεί περαιτέρω η εγκυρότητα του προτεινομένου μοντέλου κατά την πρόβλεψη του εκπεμπόμενου ηλεκτρικού πεδίου εξετάστηκε μια διαφορετική θέση του δοκιμίου για τα δύο επίπεδα γείωσης. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση γίνεται πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων εκπομπών για ύψος καλωδίου  $h = 10 \text{ cm}$ , διατηρώντας σταθερές τις τιμές για τον συντελεστή ανάκλασης του καλωδίου  $\alpha$  (όπως στην προηγούμενη περίπτωση), για τα δύο διαφορετικά υλικά επιπέδου γείωσης. Στο Σχήμα 40 και στο Σχήμα 41 φαίνεται η σύγκριση ανάμεσα στις προβλέψεις του μοντέλου για τις ακτινοβολούμενες εκπομπές και τις αντίστοιχες μετρήσεις για επίπεδο γείωσης από αλουμίνιο και ξύλο, αντίστοιχα. Οι μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου είναι σε συμφωνία με τις εξαγόμενες τιμές από το μοντέλο όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 40 και στο Σχήμα 41.



**Σχήμα 40 - Πρόβλεψη μοντέλου για το ηλεκτρικό πεδίο στην περίπτωση επιπέδου αλουμινίου- ύψος καλωδίου = 10 cm**

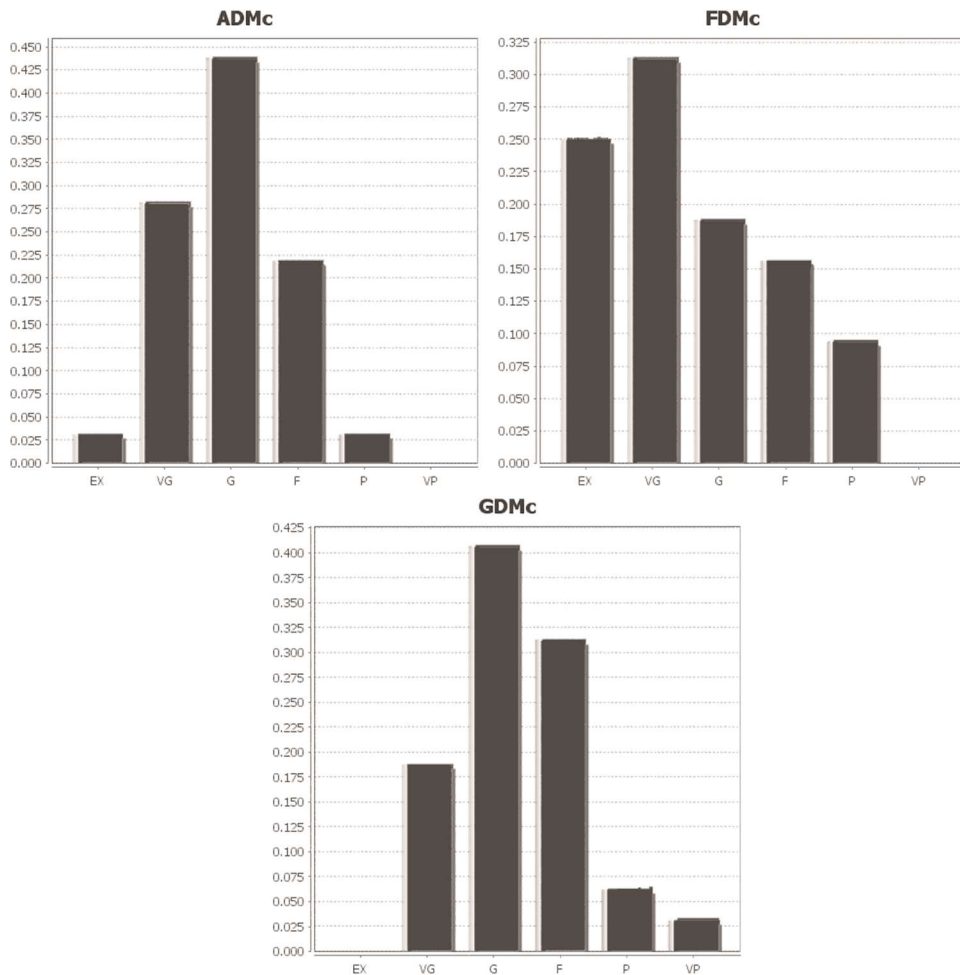
Για την αξιολόγηση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος FSV και το RMSE όπως και προηγούμενα, και τα αποτελέσματά τους, τα οποία συνοψίζονται στους επόμενους πίνακες (Πίνακας 10 και Πίνακας 11), ενισχύουν την εγκυρότητα του μοντέλου. Επιπλέον, το Σχήμα 42 και το Σχήμα 43 αποδίδουν γραφικά τις μετρικές της τεχνικής FSV για τις δύο περιπτώσεις επιπέδου γείωσης. Και για τα δύο υλικά του επιπέδου γείωσης, οι τιμές του προβλεπόμενου πεδίου από το μοντέλο ακολουθούν αυστηρά τις καμπύλες των μετρήσεων για ολόκληρο το συχνοτικό εύρος και για τα δύο επίπεδα, με εξαίρεση μικρές αποκλίσεις πλάτους, γεγονός που υποδεικνύει ότι το μοντέλο περιγράφει με ακρίβεια τον μηχανισμό ακτινοβολίας.



**Σχήμα 41 - Πρόβλεψη μοντέλου για το ηλεκτρικό πεδίο στην περίπτωση ξύλινου επιπέδου- ύψος καλωδίου = 10 cm**

Αυτές οι αποκλίσεις πλάτους αποδίδονται κυρίως στις πεπερασμένες διαστάσεις του επιπέδου γείωσης, οι οποίες εισάγουν επιπλέον φαινόμενα σκεδάσεων ακμής, καθώς και στα σφάλματα μέτρησης. Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι η θεώρηση του συντελεστή ανάκλασης του καλωδίου  $\alpha$  ως σταθερού ίσως εισάγει επιπλέον σφάλματα, τα οποία συνεισφέρουν στις αποκλίσεις πλάτους.





**Σχήμα 42 - Μετρικές τεχνικής FSV για επίπεδο αλουμινίου (ADM, FDM, and GDM) (EX= Excellent, VG=Very Good, G=Good, F=Fair, P=Poor, VP=Very Poor)**

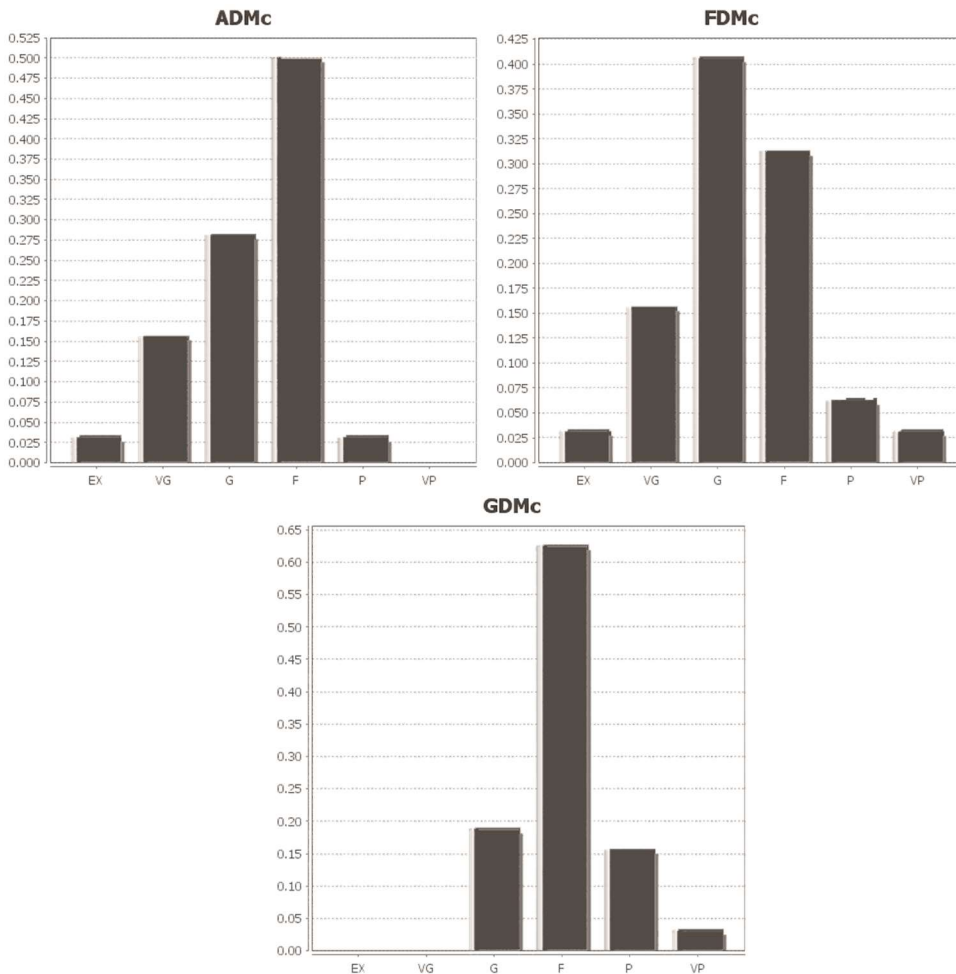
Το επίπεδο εμπιστοσύνης και για τις δύο περιπτώσεις θεωρήθηκε 85%. Τα αποτελέσματα για την τεχνική FSV εξήχθησαν από το διαθέσιμο εργαλείο FSV\_Tool\_2\_0\_9L [41], [42].

**Πίνακας 10 - Τιμές Grade και Spread της τεχνικής FSV και RMS για επίπεδο αλουμινίου και ύψος καλωδίου 10 cm**

	GRADE	SPREAD
<b>ADM</b>	4	3
<b>FDM</b>	4	4
<b>GDM</b>	4	3
<b>RMSE</b>	5.31 dBuV/m	

**Πίνακας 11 - Τιμές Grade και Spread της τεχνικής FSV και RMS για ξύλινο επίπεδο και ύψος καλωδίου 10 cm**

	GRADE	SPREAD
<b>ADM</b>	4	3
<b>FDM</b>	4	3
<b>GDM</b>	5	3
<b>RMSE</b>	7.28 dBuV/m	



**Σχήμα 43 - Μετρικές τεχνικής FSV για ξύλινο επίπεδο (ADM, FDM, and GDM) (EX= Excellent, VG=Very Good, G=Good, F=Fair, P=Poor, VP=Very Poor)**

### 3.4 Συμπεράσματα

Η μοντελοποίηση, οι προσομοιώσεις και οι προκαταρκτικές μετρήσεις υποδεικνύουν ότι το μοντέλο που παρουσιάστηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει με σημαντική ακρίβεια τις ακτινοβολούμενες εκπομπές του ηλεκτρικού πεδίου ενός θωρακισμένου καλωδίου, ανεξάρτητα από τον

τύπο καλωδίου, όταν βρίσκεται πάνω από δεδομένο επίπεδο γείωσης. Η περιγραφή αυτή βασίζεται στην αποσύνθεση των συνεισφερόντων φαινομένων. Για την προσαρμογή των ιδιοτήτων του μοντέλου σε συγκεκριμένο ζεύγος καλωδίου - υλικού επιπέδου γείωσης είναι αναγκαία μια μοναδική τυποποιημένη μέτρηση EMI/EMC, καθιστώντας δυνατή την πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων εκπομπών σε κάθε σχετική θέση πάνω από οποιοδήποτε επίπεδο γείωσης (γνωστών διηλεκτρικών χαρακτηριστικών) χωρίς καμία περαιτέρω εκ των προτέρων γνώση των χαρακτηριστικών του καλωδίου. Το μοντέλο αυτό προσφέρει μία ασφαλή εκτίμηση για τα μέγιστα επίπεδα ακτινοβολούμενων εκπομπών σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Περαιτέρω εκμετάλλευση της προτεινόμενης μοντελοποίησης περιλαμβάνει την πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων εκπομπών στην περίπτωση ψηφιακών σημάτων υψηλών ζεύξεων (π.χ. Spacewire - LVDS). Η μεθοδολογία μοντελοποίησης μπορεί στην πράξη να εξαγάγει τη μοντελοποιημένη χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος καλώδιο - επίπεδο γείωσης. Το γινόμενο του συντομευμένου μετασχηματισμού Fourier ενός χρονικού σήματος με τη μοντελοποιημένη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος καλωδίου - επιπέδου γείωσης παράγει τις ακτινοβολούμενες εκπομπές για τις υπό μελέτη συχνότητες. Η παρούσα εργασία μπορεί να συνεισφέρει στην εκτίμηση των εκπομπών του συστήματος υπό κάθε σχήμα σηματοδοσίας, απλοποιώντας με αυτό τον τρόπο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του συστήματος, τόσο σε όρους χωροθέτησης/διάταξης όσο και υλικών γείωσης.



## Κεφάλαιο 4

---

# Επαλήθευση της Μεθοδολογίας Μοντελοποίησης Εκπεμπόμενης Ακτινοβολίας στην περίπτωση Ζεύξης SpaceWire/ LVDS με γείωση CFRP

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία μοντελοποίησης και πρόβλεψης ακτινοβολούμενων ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών θωρακισμένης καλωδίωσης και εφαρμόστηκε στην περίπτωση θωρακισμένου ομοαξονικού καλωδίου λαμβάνοντας υπόψη τις διηλεκτρικές ιδιότητες του επιπέδου γείωσης. Η βασική θεώρηση της μεθοδολογίας είναι ότι το θωρακισμένο ομοαξονικό καλώδιο αντιμετωπίζεται ως κεραία οδεύοντος κύματος και οι επιμέρους συνεισφορές των διαφόρων φαινομένων επαληθεύθηκαν για διάφορα υλικά και ύψη του επιπέδου γείωσης μέσω μετρήσεων του ηλεκτρικού πεδίου. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε πιο σύνθετες δομές [44] και ειδικά στην περίπτωση του καλωδίου SpaceWire πάνω από επίπεδο γείωσης κατασκευασμένο από CFRP. Η συγκεκριμένη διάταξη επιλέγεται, γιατί είναι μεγάλου ενδιαφέροντος για διαστημικές εφαρμογές μιας και αποτελεί την καλωδίωση και τη διάταξη γείωσης για την πλειονότητα των αποστολών, οπότε η μοντελοποίηση έχει ήδη βρει και το πεδίο εφαρμογής της. Η σύνθετη δομή του καλωδίου SpaceWire, όπως έχει προηγούμενα παρουσιαστεί, απλοποιείται αρκετά με τη θεώρηση της μεθοδολογίας. Έτσι, καθίσταται δυνατή η πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων εκπομπών της.

### 4.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, που επηρεάζουν τα συστήματα του διαστημικού σκάφους, είναι παράμετρος ζωτικής σημασίας κατά τον σχεδιασμό των διαστημικών αποστολών. Η μοντελοποίηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών των διαφόρων μονάδων καθώς και οι επιπτώσεις του υλικού κατασκευής του επιπέδου γείωσης στις ακτινοβολούμενες εκπομπές των υψίσυχων ψηφιακών γραμμών του συστήματος είναι σημαντικά βήματα κατά τη σχεδίαση διαφόρων τομέων της αποστολής, όπως ασφαλής λειτουργία έναντι αποτυχίας (fail-safe), ακεραιότητα των δεδομένων, ατρωσία των οργάνων, οικονομική αποδοτικότητα και συμμόρφωση με τα κατά περίπτωση πρότυπα.

Τα συνθετικά υλικά, όπως το Carbon-Fiber-Reinforced Polymer (CFRP), είναι ελαφρύτερα από το αλουμίνιο και κερδίζουν έδαφος στη χρήση του για την κατασκευή της ατράκτου του διαστημικού σκάφους. Ωστόσο, για να είναι επιτυχημένη η αντικατάσταση του αλουμινίου από συνθετικά υλικά πρέπει να εξεταστεί και η επίδρασή τους στις ακτινοβολούμενες εκπομπές των ηλεκτρονικών συστημάτων του σκάφους [20]. Η παράμετρος, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, είναι το ηλεκτρικό πεδίο (E-field) που εκπέμπεται από τις υψίσυχνες ψηφιακές γραμμές, όπως ο συνδυασμός SpaceWire/LVDS. Μια ταχεία εκτίμηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εντός της ατράκτου, η οποία λαμβάνει υπόψη το υλικό του επιπέδου γείωσης, είναι αναγκαία.

Η καλωδίωση SpW που μεταφέρει σηματοδότηση LVDS πάνω από επίπεδο γείωσης από υλικό CFRP είναι η ψηφιακή ζεύξη που χρησιμοποιείται στις περισσότερες αποστολές της NASA και της ESA [12]. Το καλώδιο SpW αποτελείται από 4 θωρακισμένα συνεστραμμένα ζεύγη αγωγών εντός μιας επιπλέον εξωτερικής πλεκτής θωράκισης. Σε ένα σχήμα μετάδοσης με πολλαπλούς αγωγούς, όπως το SpW, υπάρχουν αρκετοί τύποι λόξωσης (skew), όπως για παράδειγμα ανάμεσα σε κάθε σήμα ενός διαφορικού ζεύγους και ανάμεσα στα σήματα Data και Strobe. Η λόξωση αυτή αποτελεί την πηγή ρεύματος κοινού τρόπου (Common Mode - CM) Έτσι, στο SpW υπάρχουν πολλαπλές πηγές ακτινοβολούμενων εκπομπών λόγω ρευμάτων κοινού τρόπου, που μπορούν να παρεμβάλουν άλλες ευαίσθητες συσκευές. Αυτές οι πηγές ακτινοβολίας είναι δύσκολο να αναλυθούν και να μοντελοποιηθούν [26], [44].

Ένα ακριβές μοντέλο ακτινοβολίας για τη διάταξη αυτή μπορεί να εξαχθεί αρκετά γρήγορα και με ελάχιστους πόρους με χρήση της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 3 [31]. Το εξαχθέν μοντέλο του καλωδίου, το οποίο αποτελείται από δύο παραμέτρους (την κατανομή του ρεύματος  $I(f)$  και τον μιγαδικό συντελεστή ανάκλασης  $\alpha$ ), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ακτινοβολίας της διάταξης, για τη λήψη αποφάσεων για την τοποθέτηση του ευαίσθητου εξοπλισμού εντός του διαστημικού σκάφους και την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI).

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 3 σε μια αρκετά σύνθετη διάταξη, δηλαδή καλώδιο πολλαπλών αγωγών SpaceWire πάνω από επίπεδο γείωσης CFRP παρέχοντας αρκετά ακριβή αποτελέσματα και ενισχύοντας την υπόθεση της γενικότερης εφαρμογής της σε περιπτώσεις θωρακισμένης καλωδίωσης. Η συγκεκριμένη διάταξη εκτός από πολύπλοκη έχει και ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της σημασίας της σε διαστημικές εφαρμογές. Η υλοποίηση των διατάξεων μέτρησης για τη λήψη των δεδομένων βασίστηκε στο στρατιωτικό πρότυπο MIL-STD-461-G [28].

## 4.2 Σύνοψη Μεθοδολογίας Μοντελοποίησης

Όπως παρουσιάστηκε στην εργασία [31] και συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η βασική ιδέα της μεθοδολογίας είναι η αναπαράσταση ενός θωρακισμένου καλωδίου από τη θωράκιση του, η οποία στη συνέχεια αντιμετωπίζεται ως κεραία οδεύοντος κύματος. Έτσι, οι ακτινοβολούμενες εκπομπές έχουν ως αίτιο το ρεύμα που διαρρέει τη θωράκιση. Μια εκτίμηση του ρεύματος μπορεί να γίνει μέσω μιας πρότυπης μέτρησης EMI/EMC [27], [28] στο συχνοτικό εύρος ενδιαφέροντος. Σε αυτή τη μεθοδολογία, η πρόβλεψη των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών γίνεται μέσω της αποσύνθεσης των συνεισφερόντων φαινομένων. Σύμφωνα με την ανάλυση της [31], τρεις συνεισφέρουσες παράμετροι λαμβάνονται υπόψη: η κατανομή ρεύματος  $I(\omega)$ , οι διηλεκτρικές ιδιότητες του επιπέδου γείωσης καθώς και το ανακλώμενο ρεύμα επί της θωράκισης μαζί με το είδωλο του. Σημειώνεται εδώ ότι η θωράκιση είναι τερματισμένη στο περίβλημα του συνδέσμου και από εκεί στο μεταλλικό περίβλημα του εξοπλισμού. Επιπλέον, αφού η θωράκιση θεωρείται ως γραμμή μεταφοράς μπορεί να είναι ατελώς τερματισμένη. Η μεθοδολογία συνυπολογίζει αυτό τον ατελή τερματισμό με την προσθήκη του ανακλώμενου τμήματος της κατανομής ρεύματος. Αυτό το φαινόμενο εκφράζεται με τον μιγαδικό συντελεστή ανάκλασης του ρεύματος  $\alpha = |\alpha|e^{j*Arg(\alpha)}$ . Τελικά το ηλεκτρικό πεδίο ανά τιμή συχνότητα μέτρησης εκφράζεται από την εξίσωση (13) του Κεφαλαίου 3.

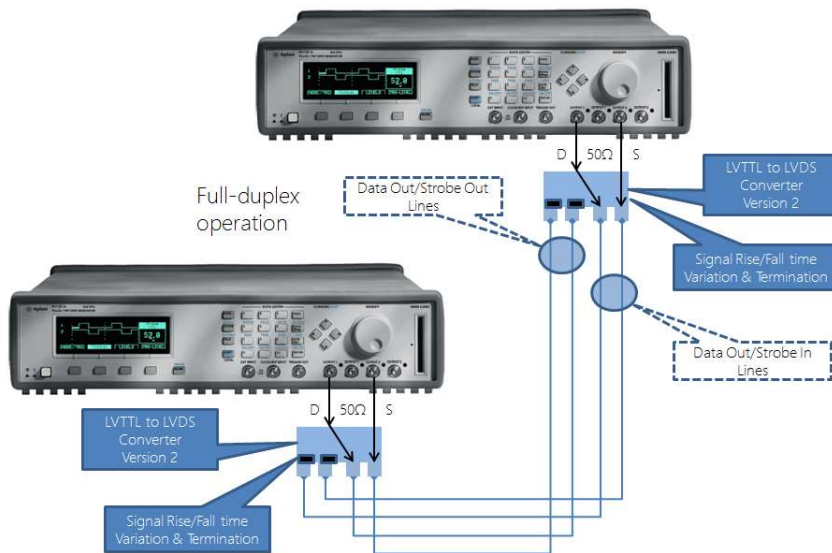
Λαμβάνοντας ως δεδομένα τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του επιπέδου γείωσης, τα χωροταξικά χαρακτηριστικά (απόσταση σημείου μέτρησης από καλώδιο και επίπεδο γείωσης, κ.τ.λ.) της μέτρησης καθώς και τα αποτελέσματα της μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου σύμφωνα με τη EMI/EMC πρότυπη μέτρηση με χρήση της επαναληπτικής διαδικασίας που απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου μοντελοποίησης (Σχήμα 34) μπορεί να εξαχθούν οι τιμές του ρεύματος  $I(\omega)$  και του μιγαδικού συντελεστή  $\alpha$  για κάθε τιμή συχνότητας ενδιαφέροντος  $\omega$ .

Έτσι, για την εφαρμογή της μεθοδολογίας μοντελοποίησης, αρχικά γίνεται μια μέτρηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών του καλωδίου με το καλώδιο τοποθετημένο σε δεδομένο ύψος πάνω από το επίπεδο γείωσης αλουμινίου. Έπειτα, από τα δεδομένα της μέτρησης, ο αλγόριθμος προσπαθεί να βρει το βέλτιστο μοντέλο που θα αναπαράγει τις μετρήσεις για τις δεδομένες συνθήκες. Το μοντέλο αποτελείται από τις βέλτιστες (αυτές που παράγουν την καλύτερη συμφωνία τιμών μέτρησης-μοντέλου) τιμές για την κατανομή του ρεύματος  $I(\omega)$  και του μιγαδικού  $\alpha$  ανά τιμή συχνότητας. Η εύρεση των τιμών των παραμέτρων γίνεται με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, οι οποίοι αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα αεροδιαστημικής και μηχανικής [45], [46]. Αυτές οι δύο παράμετροι χαρακτηρίζουν πλήρως το καλώδιο. Διαθέτοντας τις τιμές των δύο παραμέτρων μπορεί να γίνει εκτίμηση, με χρήση της εξίσωσης (13), των ακτινοβολούμενων εκπομπών του καλωδίου όταν αυτό τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε ύψος πάνω από επίπεδο γείωσης οποιουδήποτε υλικού (αρκεί

να είναι γνωστά τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του) και φυσικά σε οποιοδήποτε σημείο παρατήρησης  $P$  χωρίς να υπάρχει διαθέσιμη άλλη πληροφορία για τη γεωμετρία του καλωδίου. Η επανάληψη της διαδικασίας για ολόκληρο το συχνοτικό φάσμα ενδιαφέροντος προσφέρει τη δυνατότητα ασφαλούς εκτίμησης για τα μέγιστα επίπεδα ακτινοβολούμενων εκπομπών σε ολόκληρο το φάσμα [31].

### 4.3 Υλοποίηση Διάταξης Μέτρησης

Για την εκτέλεση των αναγκαίων μετρήσεων υλοποιήθηκε σύστημα πλήρως αμφίδρομης επικοινωνίας σύμφωνα με την παράγραφο 2.2, με την προσθήκη μιας επιπλέον, πανομοιότυπης με την αρχική, γεννήτριας και ενός πανομοιότυπου οδηγού LVDS. Οι δύο αυτές προσθήκες προσομοιάζουν τη λειτουργία του δεύτερου άκρου της ζεύξης και επιτρέπουν την ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων σε όλα τα ζεύγη του καλωδίου SpaceWire. Η διάταξη του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 44.

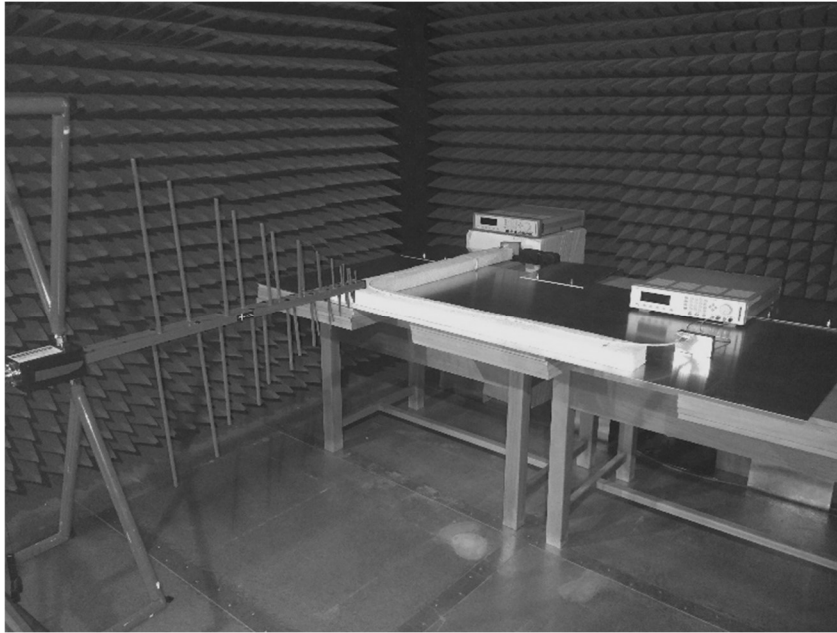


Σχήμα 44 - Σύστημα πλήρως αμφίδρομης επικοινωνίας(full -duplex )

Για τη μετρητική διάταξη διερευνήθηκαν διαφορετικές υλοποιήσεις τεχνικής γείωσης [46], τελικά όμως επιλέχθηκε για τη διαδικασία μέτρησης η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στις διαστημικές αποστολές [2]. Στην επιλεχθείσα τεχνική γείωσης, οι εσωτερικές θωρακίσεις των ζευγών  $S_{out}$  και  $D_{out}$  συνδέονται στην ακίδα "3" του συνδέσμου τύπου D, ενώ και οι δύο ακίδες "3" είναι απομονωμένες από τη μια πλευρά της ζεύξης ( $T_x$ ) στην άλλη ( $R_x$ ) και αιωρούνται (floating) σύμφωνα με το Σχήμα 7 του Κεφαλαίου 1. Η διάταξη μέτρησης, που υλοποιήθηκε στον ανηχοϊκό θάλαμο του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του ΕΜΠ,



είναι πανομοιότυπη με αυτή της παραγράφου 2.2 και φαίνεται στο Σχήμα 45 για επίπεδο γείωσης κατασκευασμένο από αλουμίνιο. Ο Πίνακας 6 της παραγράφου 2.3 παρουσιάζει τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις, ενώ ο Πίνακας 7 αποτυπώνει τις ρυθμίσεις του EMI Receiver με τον οποίο μετρήθηκαν οι ακτινοβολούμενες εκπομπές.



**Σχήμα 45 - Υλοποίηση βασικής διάταξης μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου (κεραία/καλώδιο)**

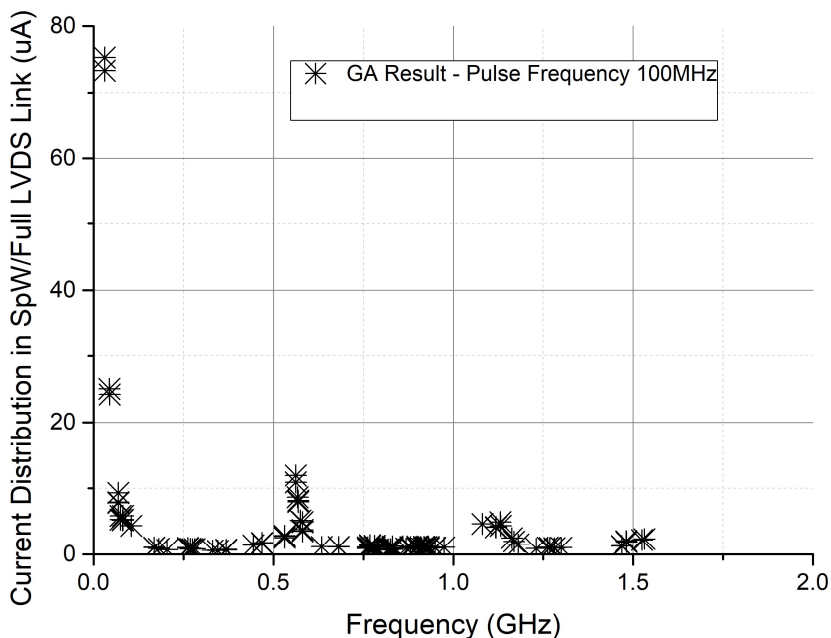
#### **4.4 Μετρήσεις και Αποτελέσματα Μοντελοποίησης**

Με βάση τα βήματα της μεθοδολογίας, αρχικά γίνεται μέτρηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών στην περίπτωση που το επίπεδο γείωσης είναι από αλουμίνιο. Λήφθηκαν δύο σετ μετρήσεων για συχνότητες επανάληψης παλμών 100 και 200 MHz. Τα αποτελέσματα της μέτρησης υποβάλλονται σε αποθρομβοποίηση, θεωρώντας το κατώφλι των 10 dBuV/m ως κατώφλι θορύβου. Οποιαδήποτε μέτρηση κάτω από το κατώφλι δεν τροφοδοτείται στον αλγόριθμο για μοντελοποίηση μειώνοντας έτσι τον υπολογιστικό χρόνο. Για τον καθορισμό της τιμής κατωφλίου έγινε μια προκαταρκτική μέτρηση εντός του ανηχοϊκού με όλο τον εξοπλισμό ενεργό (εκτός της μεταφοράς δεδομένων), ώστε οποιαδήποτε ανεπιθύμητη συνιστώσα εκπομπής να συνυπολογιστεί στο επίπεδο θορύβου και σε μια προσπάθεια η μέτρηση που ακολουθεί να περιέχει εκπομπές μόνο από το καλώδιο. Υπενθυμίζεται ότι στη θεώρηση της μεθοδολογίας ως καλώδιο θεωρείται το συναρμολόγημα του καλωδίου μαζί με τους συνδέσμους που είναι ένας από τους κυρίους παράγοντες εκπομπών EMC.

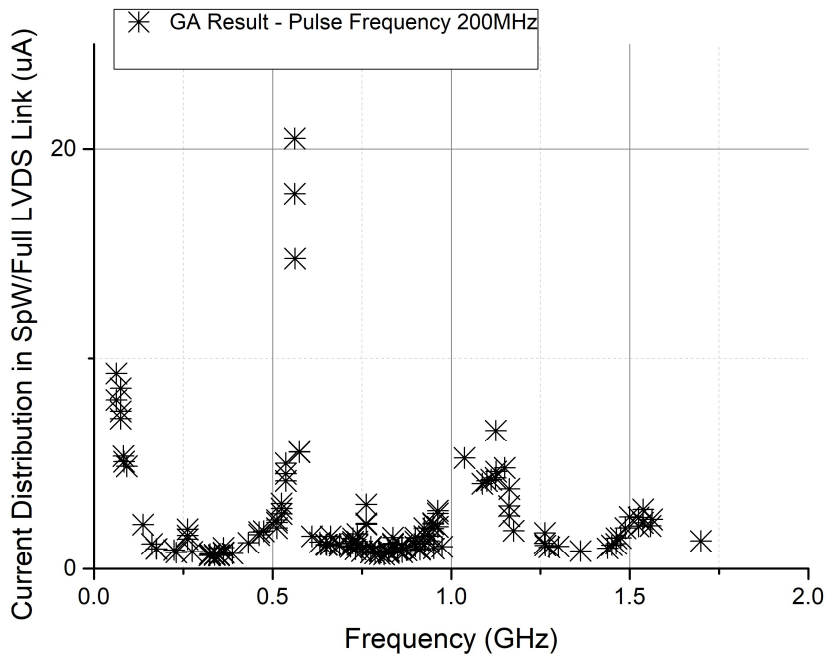
Από τα αποτελέσματα και τη γεωμετρία της μέτρησης, με χρήση του αλγορίθμου εξάγεται η κατανομή ρεύματος και η παράμετρος  $\alpha$ . Τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά των υλικών των επιπέδων γείωσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12). Ο γενετικός αλγόριθμος επιστρέφει ένα σύνολο τιμών για τη μιγαδική μεταβλητή  $\alpha$ , το οποίο έχει μέση τιμή μέτρου και ορίσματος 0.726 και 76.89° για την ταχύτητα επανάληψης παλμών 100 MHz, και 0.712 και 62.02° για την ταχύτητα 200 MHz. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 46 και Σχήμα 47) φαίνεται η κατανομή του πλάτους του ρεύματος που διαρρέει τη θωράκιση με τη συχνότητα για τις ταχύτητες 100 και 200 MHz, αντίστοιχα.

**Πίνακας 12 - Διηλεκτρικά χαρακτηριστικά υλικών επιπέδου γείωσης [47], [48]**

	$\epsilon_r$	$\sigma(\text{S/m})$	$\mu$
<b>Aluminum</b>	1	$38 \cdot 10^6$	1
<b>CFRP</b>	2530	28.3	1



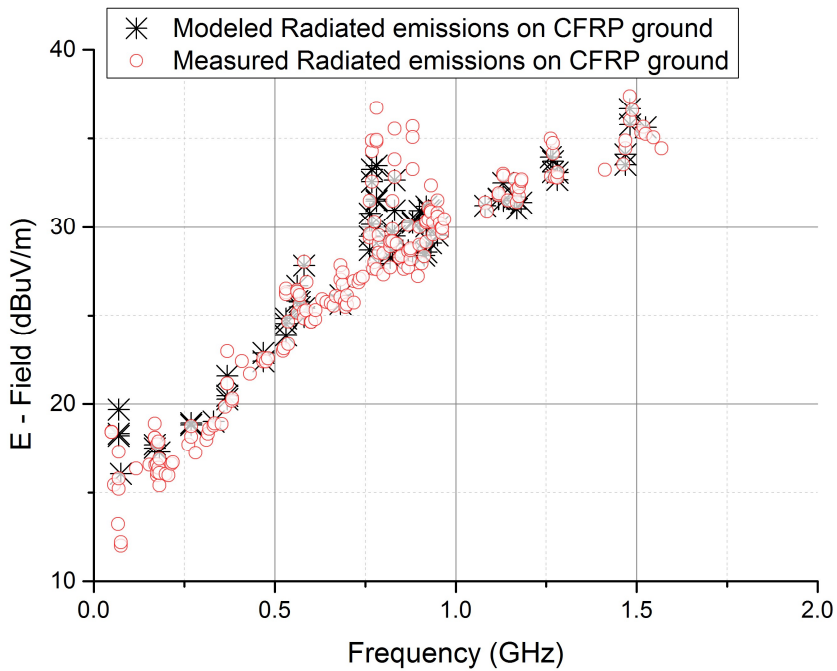
**Σχήμα 46 - Κατανομή ρεύματος θωράκισης (ταχύτητα επανάληψης παλμών 100 MHz)**



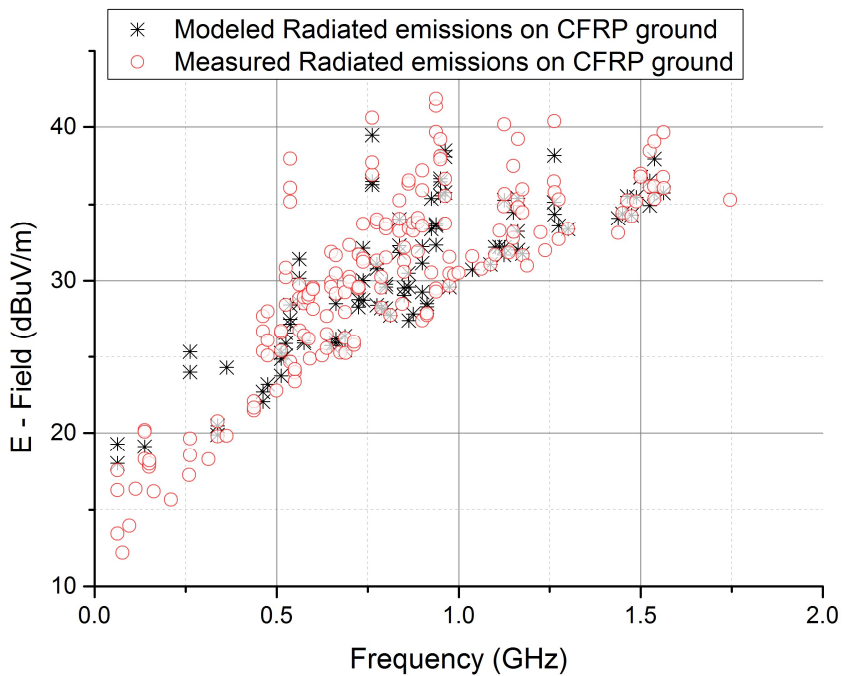
**Σχήμα 47 - Κατανομή ρεύματος θωράκισης (ταχύτητα επανάληψης παλμών 200 MHz)**

Στη συνέχεια με δεδομένα τις κατανομές ρεύματος και τις τιμές του  $\alpha$  μπορεί να γίνει πρόβλεψη για τις ακτινοβολούμενες εκπομπές όταν το επίπεδο γείωσης αντικατασταθεί από CFRP. Η πρόβλεψη για το πεδίο στην περίπτωση του ρυθμού επανάληψης 100 MHz φαίνεται στο Σχήμα 48. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η σύγκριση με το αποτέλεσμα της μέτρησης με επίπεδο γείωσης από CFRP. Αντίστοιχα, για τον ρυθμού επανάληψης 200 MHz τα αποτελέσματα της πρόβλεψης του μοντέλου καθώς και τα αποτελέσματα της πραγματικής μέτρησης φαίνονται στο Σχήμα 49. Από μια αρχική οπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων μοντελοποίησης και μέτρησης φαίνεται ότι υπάρχει καλή συμφωνία και για τις δύο ταχύτητες. Ωστόσο επειδή τα σύνολα δεδομένων καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και υπάρχει πλήθος δειγμάτων η συμφωνία των συνόλων δεδομένων (μέτρησης και μοντέλου) πρέπει να ελεγχθεί και με μια ποσοτική μεθοδολογία.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μεθοδολογία Feature Selective Validation (FSV) [41], [42], η οποία χρησιμοποιείται τόσο σε κλασσικά ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα όσο και προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.



**Σχήμα 48 - Σύγκριση ηλεκτρικού πεδίου μοντέλου και μέτρησης για επίπεδο γείωσης CFRP και συχνότητα παλμών 100 MHz**

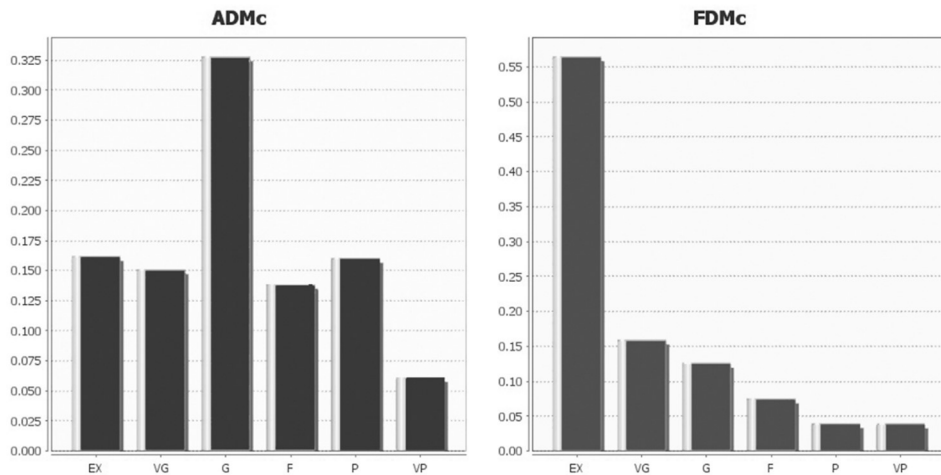


**Σχήμα 49 - Σύγκριση ηλεκτρικού πεδίου μοντέλου και μέτρησης για επίπεδο γείωσης CFRP και συχνότητα παλμών 200 MHz**

Η τεχνική FSV χρησιμοποιεί το Amplitude Difference Measure (ADM), το Feature Difference Measure (FDM) και το Global Difference Measure (GDM) ως τις μετρικές με βάση τις οποίες συγκρίνει διαφορετικά σύνολα δεδομένων. Η χρήση της είναι αρκετά διαδεδομένη μιας και εμπεριέχεται στο πρότυπο της IEEE 1597.1/2 [40], ωστόσο αντιμετωπίζει κάποια κριτική σχετικά με το εύρος εφαρμογής της [49], [50]. Οι ενστάσεις περιλαμβάνουν περιπτώσεις, που τα σύνολα δεδομένων περιέχουν κάποιες περιοχές πολύ υψηλής και κάποιες πολύ χαμηλής συμφωνίας, κενά, αρνητικές τιμές ή μεταβατικά φαινόμενα [50]. Από την επισκόπηση των σχημάτων αποτελεσμάτων (Σχήμα 48 και Σχήμα 49) είναι εμφανές ότι το επίπεδο συμφωνίας ανάμεσα στα δύο σύνολα δεδομένων (μοντελοποίηση, μέτρηση) και στις δύο περιπτώσεις παραμένει παρόμοιο για ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων, χωρίς κενά αρνητικά δεδομένα ή μεταβατικά φαινόμενα. Έτσι επιλέχθηκε η μεθοδολογία FSV [41] ως εφαρμόσιμη τεχνική εκτίμησης για την περίπτωση αυτή.

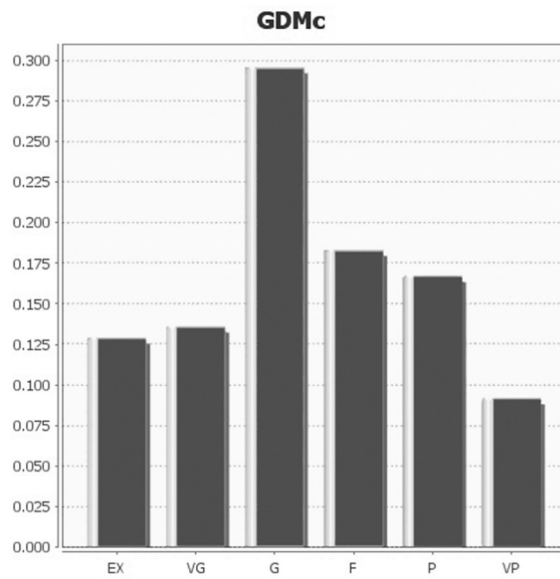
Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας FSV παρουσιάζονται στο Σχήμα 50. Εξαιτίας της μεγάλης αβεβαιότητας (ξεπερνά τα 5dB) που υπεισέρχεται στις μετρήσεις τα αποτελέσματα αυτά κρίνονται ικανοποιητικά. Επιπλέον η δυνατότητα του μοντέλου να παράξει μια καλή εκτίμηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων κρίνεται ικανοποιητική ειδικά αν ληφθούν υπόψη το γεγονός ότι προέρχεται από μέτρηση σε ένα σημείο, η χρήση ενός προτύπου, ευρέως διαθέσιμου, επιπέδου γείωσης και τέλος η πολυπλοκότητα της δομής του καλωδίου. Από τις μετρικές της FSV (Σχήμα 50) παρατηρείται ότι για άνω του 75% του συνόλου των αποτελεσμάτων του Global Difference Measure υπάρχει συμφωνία άνω του μετρίου. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αρκετά ικανοποιητικό για μια γρήγορη EMC μεθοδολογία προ-συμμόρφωσης (pre-compliance), ότι χρειάζεται δηλαδή για την αρχική φάση σχεδιασμού μιας αποστολής. Επιπλέον, οι μετρικές υποστηρίζουν τον ισχυρισμό για τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας σε κάθε τύπο θωρακισμένου καλωδίου.

Ένα επιπρόσθετο σχόλιο που πρέπει να γίνει σε αυτό το σημείο είναι, ότι παράλληλα με την επαλήθευση της μεθοδολογίας για τη ζεύξη SpW/LVDS, από τις μετρήσεις που λήφθηκαν φαίνεται και η δυνατότητα χρήσης του CFRP ως εναλλακτικό υλικό για το επίπεδο γείωσης. Στο Σχήμα 51 παρουσιάζονται οι διαφορές ανάμεσα στις δύο μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου για τα δύο υλικά γείωσης. Το επίπεδο γείωσης CFRP εμφανίζει γενικότερα υψηλότερες εκπομπές σε σύγκριση με το αλουμίνιο (όπως αναμενόταν), όμως η μεγάλη πλειονότητα των διαφορών είναι μικρότερη των 5 dB της αβεβαιότητας των μετρήσεων.



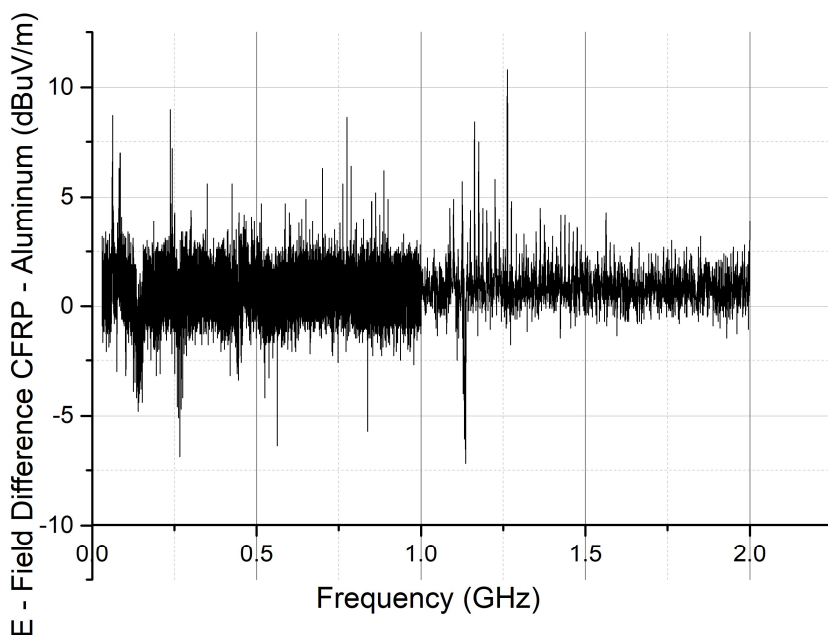
( α )

( β )



( c )

**Σχήμα 50 - Αποτελέσματα μετρικών τεχνικής FSV για επίπεδο CFRP (a. ADM, b. FDM, and c. GDM) (EX= Excellent, VG=Very Good, G=Good, F=Fair, P=Poor, VP=Very Poor)**



**Σχήμα 51 – Διαφορές εκπεμπόμενου ηλεκτρικού πεδίου καλωδίου SpaceWire διατεταγμένου πάνω από επίπεδο γείωσης από αλουμίνιο και CFRP**

## 4.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο η μεθοδολογία του Κεφαλαίου 3 εφαρμόζεται και εξετάζεται ως προς τη δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων για την περίπτωση καλωδίου SpaceWire πάνω από επίπεδο γείωσης κατασκευασμένο από CFRP. Η διάταξη αυτή συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον για διαστημικές εφαρμογές, αφού αποτελεί την επιλογή καλωδίωσης και γείωσης στην πλειονότητα των διαστημικών αποστολών. Το SpaceWire παρουσιάζει μια πολύ σύνθετη γεωμετρία και η αναλυτική εξαγωγή των ακτινοβολούμενων εκπομπών του παρουσιάζει δυσκολίες. Με τη χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και με μια πρότυπη μέτρηση πάνω από επίπεδο γείωσης από αλουμίνιο αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί. Έτσι, το καλώδιο χαρακτηρίζεται και μοντελοποιείται. Με το εξαχθέν μοντέλο μπορεί να γίνει εκτίμηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών του καλωδίου για κάθε άλλο υλικό του επιπέδου γείωσης καθώς και σε άλλα σημεία ενδιαφέροντος (πρόβλεψη). Οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για να επιβεβαιώσουν την ισχύ της μεθοδολογίας στην περίπτωση επιπέδου γείωσης από CFRP για δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας της ζεύξης. Η τυποποιημένη τεχνική επικύρωσης επιλεκτικών χαρακτηριστικών (Feature Selective Validation - FSV) της IEEE χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης σε σύγκριση με τις μετρήσεις. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται καταδεικνύουν τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας σε αρκετά σύνθετα συστήματα.





## Κεφάλαιο 5

---

# Τροποποιημένη Μοντελοποίηση της σηματοδοσίας LVDS επί του καλωδίου SpaceWire με χρήση του Αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης.

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε, εφαρμόστηκε και επαληθεύτηκε μια μεθοδολογία μοντελοποίησης των θωρακισμένων καλωδίων ως κεραία οδεύοντος κύματος. Η συνολική συμπεριφορά του καλωδίου αποσυντέθηκε στα διάφορα συνεισφέροντα φαινόμενα ώστε να εκτιμηθεί η επίδρασή τους στις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολούμενες εκπομπές. Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της μεθοδολογίας είναι η ταυτοποίηση της κατανομής ρεύματος στη θωράκιση του καλωδίου. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αρχικά εφαρμόστηκε στην περίπτωση ομοαξονικού καλώδιου, με μονοχρωματική διέγερση, για διαφορετικά υλικά επιπέδου γείωσης και σε διαφορετικά ύψη πάνω από αυτό. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε σε καλώδιο SpaceWire με παλμικό διαφορικό σήμα ως τμήμα προσομοιωμένου συστήματος SpaceWire/LVDS. Ο τρόπος αναπαράστασης της κατανομής ρεύματος επί της θωράκισης στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις είναι κοινός, «συχνότητα-προς-συχνότητα», δηλαδή ανεξαρτήτως του σήματος διέγερσης ο αλγόριθμος μοντελοποίησης προσπαθεί να αποδώσει τις κατάλληλες τιμές στα επιμέρους χαρακτηριστικά-μεταβλητές ώστε να υπάρχει η μεγαλύτερη δυνατή ταύτιση σε κάθε ξεχωριστή τιμή συχνότητας. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια τροποποιημένη αντιμετώπιση [51], λαμβάνοντας ως δεδομένο τη διαφορική παλμική σηματοδοσία του προσομοιωμένου συστήματος SpaceWire/LVDS, με τη βοήθεια του αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution – DE).

### 5.1 Εισαγωγή

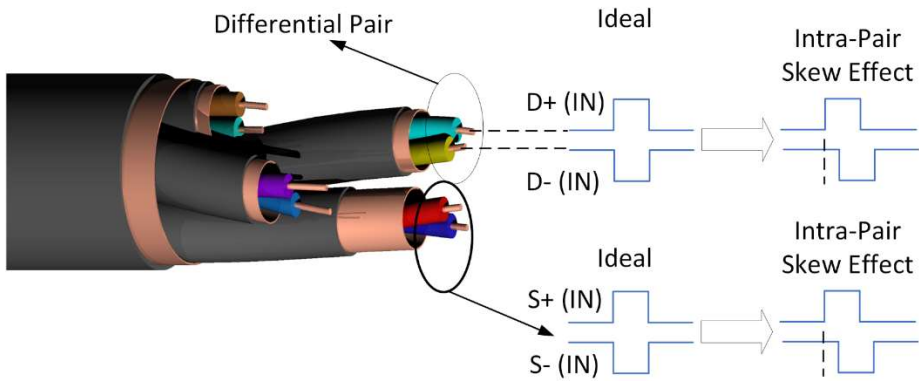
Το καλώδιο SpaceWire ανήκει στην κατηγορία των θωρακισμένων καλωδίων, έτσι μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έγινε στο Κεφάλαιο 3 [31], ενώ η εφαρμογή και τα αποτελέσματα της παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 [44]. Η βασική ιδέα της μεθοδολογίας είναι η αναπαράσταση του πλήρους καλωδίου από τη θωράκιση του, η οποία αντιμετωπίζεται στη συνέχεια ως κεραία οδεύοντος κύματος. Με αυτό τον τρόπο το ρεύμα που διαρρέει τη θωράκιση καθορίζει, μεταξύ άλλων παραγόντων, τις ακτινοβολούμενες εκπομπές. Όπως παρουσιάστηκε [31]

και [44], το ρεύμα της θωράκισης καθορίζεται με μία στοχαστική διαδικασία (γενετικοί αλγόριθμοι) χρησιμοποιώντας μιας προτυποποιημένη μέτρηση ακτινοβολούμενων εκπομπών [27] για EMI/EMC στο εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος.

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει μια τροποποιημένη αντιμετώπιση σχετικά με τη ρευματική κατανομή της θωράκισης. Στα προηγούμενα γινόταν μια μονοχρωματική αναπαράσταση του ρεύματος, «συχνότητα-προς-συχνότητα», ενώ εδώ προτείνεται μια ρευματική κατανομή συντεθειμένη από παλμούς, που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει καλύτερα το πραγματικό φαινόμενο, αφού η σηματοδοσία LVDS είναι μια αλληλουχία παλμών. Επιπλέον, στη μεθοδολογία μοντελοποίησης το φάσμα αντιμετωπίζεται ολόκληρο αντί για «συχνότητα-προς-συχνότητα» (bin by bin). Έτσι, για τη μοντελοποίηση πρέπει να επιλυθεί ένα μοναδικό αντίστροφο πρόβλημα, αντί για πολλαπλά – ανάλογα με το πλήθος των συχνοτήτων (bins), δηλαδή της ανάλυσης συχνότητας (frequency resolution) της μέτρησης. Αυτό το μοναδικό αντίστροφο πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση του αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης.

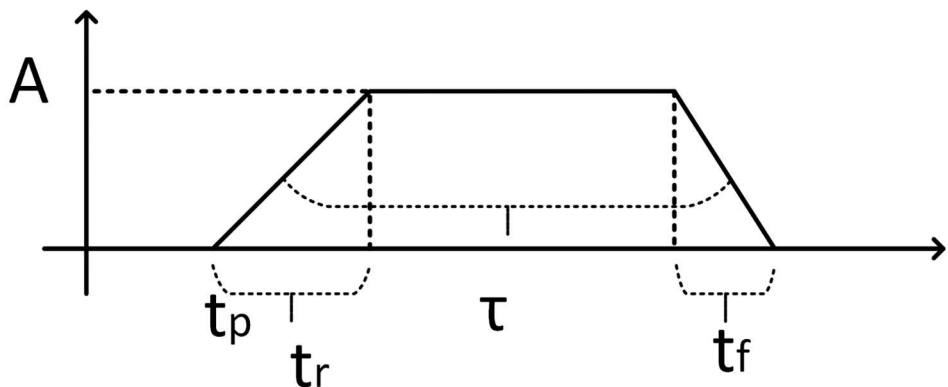
## 5.2 Λόξωση και Φασματική Κατανομή Ρεύματος

Στο σύστημα SpaceWire χρησιμοποιείται, όπως έχει παρουσιαστεί και στο Κεφάλαιο 1, σηματοδοσία LVDS [16] και κωδικοποίηση DS (Data -Strobe) [2]. Η συγκεκριμένη τεχνική κωδικοποιεί το ρολόι μαζί με τα δεδομένα σε δύο νέα σήματα, Data (D) και Strobe (S), έτσι ώστε το ρολόι να μπορεί να ανακτηθεί με μια πράξη XOR ανάμεσα στα δύο σήματα. Η ζεύξη αποτελείται από δύο ζεύγη διαφορικών σημάτων, με το ένα ζεύγος να μεταδίδει τα D και S σήματα προς το ένα άκρο της ζεύξης και το δεύτερο προς το άλλο άκρο. Έτσι υπάρχουν οκτώ σύρματα ( $D_{IN}^+, D_{IN}^-, S_{IN}^+, S_{IN}^-, D_{OUT}^+, D_{OUT}^-, S_{OUT}^+, S_{OUT}^-$ ) συνολικά σε μία πλήρως αμφίδρομη ζεύξη. Η χρήση πολλαπλών φυσικών οδεύσεων - συρμάτων για τη μεταφορά του σήματος δημιουργεί φαινόμενα όπως η λόξωση (skew), δηλαδή η διαφορά στον χρόνο διάδοσης δύο σημάτων, του διαφορικού ζεύγους, η οποία ονομάζεται intra-pair skew. Το intra-pair skew δημιουργεί έγχυση ρευμάτων κοινού τρόπου (common mode) στην εξωτερική θωράκιση, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν παλμικά λόγω της συνολικής μορφής των σημάτων του συστήματος (Σχήμα 52). Η πλήρως αμφίδρομη υλοποίηση της ζεύξης SpaceWire αποτελείται από τέσσερα ζεύγη ( $D_{IN}, D_{OUT}, S_{IN}, S_{OUT}$ ), έτσι αναμένεται να παρουσιάζονται 4 διαφορετικοί παλμοί επί της θωράκισης. Το άθροισμα αυτών των τεσσάρων παλμών δημιουργεί την κατανομή ρεύματος επί της θωράκισης που με τη σειρά της δημιουργεί την ακτινοβολία του καλωδίου.



**Σχήμα 52 - Το Intra pair skew ως μηχανισμός δημιουργίας εκπομπών του SpaceWire**

Ένας τραπεζοειδής παλμός περιγράφεται από το πλάτος του  $A$ , τη διάρκεια  $\tau$ , τον χρόνο ανόδου  $\tau_r$ , τον χρόνο καθόδου  $\tau_f$  και τον χρόνο εμφάνισης του παλμού  $t_p$ . Το Σχήμα 53 αποτυπώνει ένα τέτοιο παλμό στο πεδίο του χρόνου.



**Σχήμα 53 - Τραπεζοειδής παλμός στο πεδίο του χρόνου**

Το φάσμα του τραπεζοειδούς παλμού περιγράφεται από την εξίσωση (16):

$$S_{trap} = -j \frac{A}{2\pi n} e^{-\frac{jn\omega_0(\tau+\tau_r)}{2}} \left( \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_r\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_r} e^{\frac{jn\omega_0\tau}{2}} - \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_f\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_f} e^{-\frac{jn\omega_0\tau}{2}} \right) e^{-j2\pi f t_p} \quad (16)$$

όπου  $n = f \cdot T$  και  $\omega_0 = 2\pi/T$ , με  $T$  την περίοδο του παλμού σε sec και  $f$  τη συχνότητα σε Hz. Στην ειδική περίπτωση που ο χρόνος ανόδου ισούται με τον χρόνο καθόδου του παλμού,  $\tau_r = \tau_f$ , η (16) γίνεται:

$$I(\omega) = A \frac{\tau \sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau\right)}{T \frac{1}{2}n\omega_0\tau} \cdot \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_r\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_r} \cdot e^{-jn\omega_0(\tau+\tau_r)/2} \cdot e^{-j2\pi f t_p} \quad (17)$$

Στην περίπτωση κατά την οποία η κατανομή ρεύματος αποτελείται από πολλαπλούς τραπεζοειδείς παλμούς με διαφορετικά χαρακτηριστικά, το φάσμα της είναι το άθροισμα στο πεδίο συχνότητας και μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την εξίσωση :

$I(\omega)_{multipletrap} = \sum_{i=1}^N \left( -j \frac{A_i}{2\pi n} \cdot e^{-\frac{jn\omega_0(\tau_i+\tau_{r_i})}{2}} \cdot \left( \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_{r_i}\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_{r_i}} \cdot e^{\frac{jn\omega_0\tau_i}{2}} - \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_{f_i}\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_{f_i}} \cdot e^{-\frac{jn\omega_0\tau_i}{2}} \right) \cdot e^{-j2\pi f t_{p_i}} \right) \quad (18)$	
---	--

Εάν γίνει η υπόθεση ότι οι παλμοί εμφανίζονται ταυτόχρονα στη θωράκιση ο όρος  $e^{-j2\pi f t_{p_i}}$  μπορεί να παραληφθεί και καθένας από τους τέσσερις παλμούς περιγράφεται από τέσσερις μεταβλητές το πλάτος  $A$ , τη διάρκεια  $\tau$ , τον χρόνο ανόδου  $\tau_r$  και τον χρόνο καθόδου  $\tau_f$ . Το πρότυπο ANSI/TIA/EIA-644 [16] ορίζει ως ελάχιστη αποδεκτή τιμή για του χρόνους ανόδου και καθόδου για όλα τα υποστηριζόμενα bitrates τα 0.26 ns.

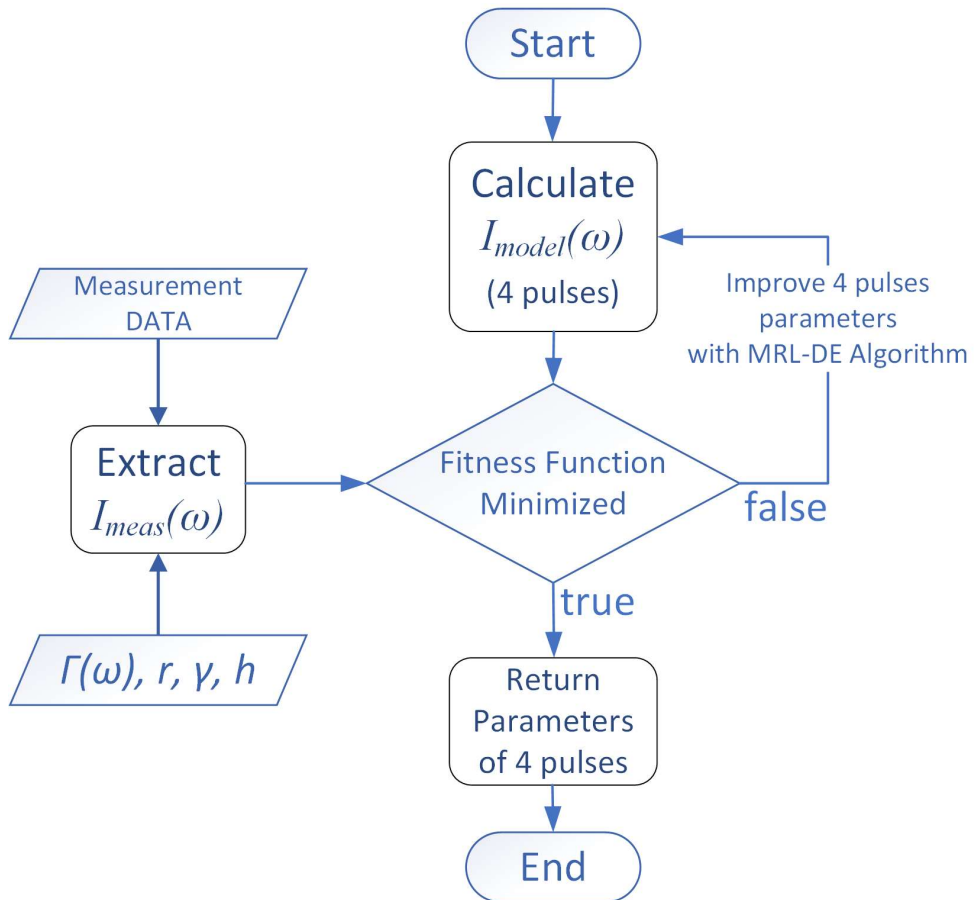
### 5.3 Αλγόριθμος Μοντελοποίησης

Η περιγραφή της κατανομής ρεύματος ως άθροισμα παλμών στο πεδίο της συχνότητας δεν μεταβάλλει τη γενικότερη θεώρηση του προβλήματος. Έτσι, ουσιαστικά με δεδομένη τη γεωμετρία της διάταξης το ζητούμενο είναι η εύρεση της ρευματικής κατανομής επί της θωράκισης όπως και προηγούμενα. Το βήμα αυτό βασίζεται στη διάταξη μέτρησης όπως αυτή παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Η ρευματική κατανομή  $I(\omega)$  υπολογίζεται από τα αποτελέσματα μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών της πρότυπης μέτρησης EMI/EMC μέσω της (13). Αφού αρχικά μετρηθούν οι ακτινοβολούμενες εκπομπές του καλωδίου σε δεδομένο ύψος πάνω από επίπεδο γείωσης αλουμινίου και εξαχθεί η ρευματική κατανομή  $I(\omega)$ , ο αλγόριθμος προσπαθεί να εξάγει το βέλτιστο μοντέλο ρεύματος, σύμφωνα με την παλμική αναπαράστασή του, το οποίο αποτελείται από τις παραμέτρους για τους παλμούς που αναπαράγουν τις ακτινοβολούμενες εκπομπές. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου μοντελοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 54.

Στο προτεινόμενο σχήμα, για ολόκληρο το φάσμα ενδιαφέροντος χρησιμοποιείται μια στοχαστική διαδικασία, η Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution - DE). Ο αλγόριθμος DE προσπαθεί να ταυτίσει, ιδανικά, την εξαγόμενη ρευματική κατανομή από τις μετρήσεις με αυτή του μοντέλου που αποτελείται από το άθροισμα των τεσσάρων παλμών

ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση (objective function) της εξίσωσης (19):

$$f_{fitness} = \sum_{f_i=1}^{f_n} (I_{model} - I_{measured})^2 \quad (19)$$



Σχήμα 54 - Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μοντελοποίησης με κατανομή ρεύματος αποτελούμενης από τέσσερις παλμούς

## 5.4 Διαφορική Εξέλιξη & Τροποποιημένος Τυχαίος Εντοπισμός

Ο αλγόριθμος DE [52]-[54] είναι ένα πολύ γνωστό και ισχυρό εργαλείο βελτιστοποίησης, που έχει βρει πεδίο εφαρμογής σε διάφορες επιστήμες και χρησιμοποιείται ευρέως έως σήμερα για προβλήματα μηχανικής και αεροδιαστημικής. Οι Storn and Price αρχικά πρότειναν τον αλγόριθμο διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution - DE) [52] το 1995, ως έναν στοχαστικό αλγόριθμο ολικής βελτιστοποίησης (global optimization),

βασισμένο σε πληθυσμό, κατάλληλο για συναρτήσεις πραγματικών τιμών συνεχών μεταβλητών. Ανήκει στην κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων (Evolutionary Algorithms - EA). Ο αλγόριθμος DE διαθέτει παρόμοιους τελεστές με άλλους εξελικτικούς αλγορίθμους που βασίζονται σε πληθυσμούς ατόμων, όπως οι: **μετάλλαξη** (mutation), **διασταύρωση** (crossover) και **επιλογή** (selection). Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο δρουν αυτοί οι τελεστές διαφοροποιούν τον DE από τους υπόλοιπους εξελικτικούς αλγορίθμους. Στον DE κάθε πιθανή λύση αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα στον χώρο λύσεων διάστασης  $D$ , όπου  $D$  το πλήθος των αναγκαίων μεταβλητών που πρέπει να καθοριστούν.

Η αρχικοποίηση του αρχικού πληθυσμού, ο οποίος αποτελείται από  $NP$  άτομα διάστασης  $D$ , εκτελείται τυχαία σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή εντός των επιτρεπτών ορίων για κάθε διάσταση. Η καταλληλόλητα κάθε ατόμου εκτιμάται κάνοντας χρήση μιας αντικειμενικής συνάρτησης  $f$  που εξαρτάται από το συγκεκριμένο πρόβλημα, στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η (19). Στο υπό μελέτη πρόβλημα η διάσταση του προβλήματος είναι  $D = 16$ , αφού υπάρχουν τέσσερις μεταβλητές ανά παλμό και τέσσερις παλμοί συνολικά και το μέγεθος του πληθυσμού επιλέγεται  $NP = 80$ . Στη συνέχεια, σε κάθε άτομο του πληθυσμού δρουν οι τρεις τελεστές σε σειρά ώστε ο πληθυσμός να προχωρήσει από τη μία γενεά (generation)  $G$  στην επόμενη

**Μετάλλαξη - Mutation:** για κάθε διάνυσμα  $X_i^G$  της γενεάς  $G$  (παρούσα γενεά) δημιουργείται ένα μεταλλαγμένο διάνυσμα  $V_i^{G+1}$ . Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στρατηγική μετάλλαξης είναι η DE/rand/1/bin, η οποία χρησιμοποιείται και στην παρούσα υλοποίηση. Το μεταλλαγμένο διάνυσμα υπολογίζεται ως:

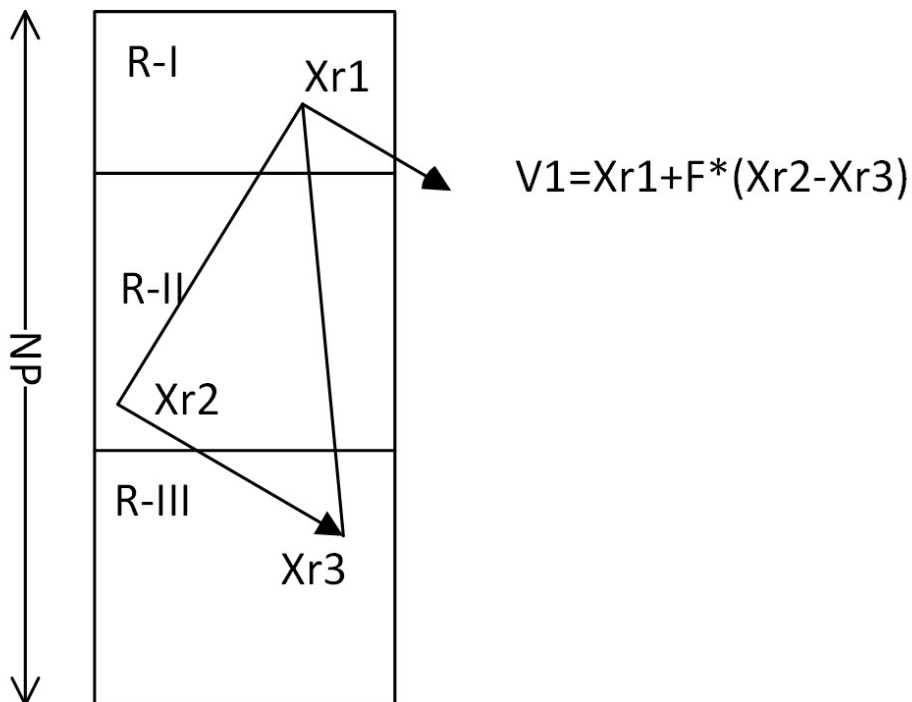
$$V_i^{G+1} = X_{r_1}^G + F \cdot (X_{r_2}^G - X_{r_3}^G) \quad (20)$$

όπου  $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$  είναι τυχαίοι ακέραιοι, αμοιβαία διαφορετικοί και διαφορετικοί από το δείκτη  $i$ . Ο συντελεστής κλιμάκωσης (scaling factor)  $F$ ,  $F \in [0, 1]$ , ελέγχει την ενίσχυση (amplification) της διαφοράς  $(X_{r_2}^G - X_{r_3}^G)$  των ατόμων που συμμετέχουν στη μετάλλαξη. Γενικά, επιλέγεται να έχει σταθερή τιμή, ωστόσο στην παρούσα υλοποίηση η τιμή του επιλέγεται τυχαία για κάθε διάνυσμα διαφοράς. Η τεχνική αυτή ονομάζεται dither [53], και έχει προταθεί για τη βελτίωση της σύγκλισης του αλγορίθμου.

Η παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιεί μια επιπλέον τεχνική για τη βελτίωση της απόδοσης του αλγορίθμου DE και την αποφυγή του προβλήματος στασιμότητας (stagnation), η οποία ονομάζεται Τροποποιημένος Τυχαίος Εντοπισμός (Modified Random Localization - MRL), και έχει προταθεί από τους Kumar και Pant [54]. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την επιλογή των τριών διανυσμάτων-ατόμων που θα συμμετάσχουν μετάλλαξη DE/rand/1/bin. Ο πληθυσμός των διανυσμάτων-

λύσεων διαιρείται σε τρία υποσύνολα ανάλογα την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που χαρακτηρίζει το κάθε διάνυσμα. Αυτά τα υποσύνολα αντιστοιχούν σε τρεις περιοχές (regions) στον χώρο λύσεων και κάθε διάνυσμα εκπροσωπεί μια συγκεκριμένη περιοχή του χώρου. Έτσι, ο κάθε πληθυσμός ταξινομείται με βάση την τιμή της αντικειμενικής. Στην παρούσα υλοποίηση μελετάται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης και ο πληθυσμός διαιρείται σε τρεις περιοχές:  $R - I$ ,  $R - II$  και  $R - III$ . Η πρώτη περιοχή  $R - I$  αποτελείται από τα καταλληλότερα άτομα, δηλαδή τα διανύσματα με τη μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η περιοχή  $R - II$  έχει τα αμέσως καλύτερα άτομα και η περιοχή  $R - III$  τα υπόλοιπα. Στη συνέχεια, για τη μετάλλαξη, τα τρία υποψήφια διανύσματα  $X_{r1}$ ,  $X_{r2}$  και  $X_{r3}$  επιλέγονται από τις περιοχές  $R - I$ ,  $R - II$  and  $R - III$ , αντίστοιχα (Σχήμα 55). Η στρατηγική MRL αποσκοπεί στο να καλυφθεί το μέγιστο του χώρου λύσεων κατά τη φάση ολικής διερεύνησης (exploration phase), προσπαθώντας να αποφεύγει να επιλέγονται διανύσματα που είναι πολύ κοντά ή πολύ μακριά.

Οι συγγραφείς της [54] προτείνουν ότι η περιοχή  $R - I$  πρέπει να αποτελείται από το 20% του πληθυσμού (μεγέθους  $NP$ ) και ο υπόλοιπος πληθυσμός να διαιρείται ισομερώς στις περιοχές  $R - II$  και  $R - III$ .



Σχήμα 55 - Η τεχνική μετάλλαξης MRL-DE - Υπολογισμός του διανύματος μετάλλαξης  $V_1$  [54]

**Διασταύρωση - Crossover:** μετά τη μετάλλαξη, εκτελείται η διασταύρωση ώστε να δημιουργηθεί ένα δοκιμαστικό (trial) διάνυσμα για

την επόμενη γενεά χρησιμοποιώντας το τρέχον και το μεταλλαγμένο διάνυσμα. Το μεταλλαγμένο διάνυσμα,  $V_i^{G+1} = (v_{1,i}^{G+1}, v_{2,i}^{G+1}, \dots, v_{D,i}^{G+1})$  και το τρέχον ( $i$  μέλος του πληθυσμού της γενεάς  $G$ )  $X_i^G = (x_{1,i}^G, x_{2,i}^G, \dots, x_{D,i}^G)$  υπόκεινται στον τελεστή διασταύρωσης στοιχείο προς στοιχείο (μεταβλητή προς μεταβλητή). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας πληθυσμός υποψήφιων διανυσμάτων-ατόμων  $U_i^{G+1} = (u_{1,i}^{G+1}, u_{2,i}^{G+1}, \dots, u_{D,i}^{G+1})$  σύμφωνα με:

$$u_{j,i}^{G+1} = \begin{cases} v_{j,i}^{G+1}, & \text{αν } rand_j \leq C_r \vee j = k \\ x_{1,i}^G, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (21)$$

όπου  $j, k \in \{1, \dots, D\}$ ,  $k$  είναι ο τυχαίος δείκτης παραμέτρου-μεταβλητής ο οποίος επιλέγεται μόνο μία φορά για κάθε  $i$ . Η παράμετρος  $C_r$ ,  $C_r \in [0,1]$ , ονομάζεται πιθανότητα διασταύρωσης και στην παρούσα υλοποίηση έχει επιλεχθεί να έχει την τιμή  $C_r = 0.9$ .

**Επιλογή - Selection:** Στο στάδιο της επιλογής, το κάθε μέλος του υποψήφιου πληθυσμού συγκρίνεται με τρέχον μέλος του πληθυσμού. Το διάνυσμα με τη χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (για προβλήματα ελαχιστοποίησης όπως το συγκεκριμένο) προκρίνεται στην επόμενη γενεά:

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} U_i^{G+1}, & \text{αν } f(U_i^{G+1}) \leq f(X_i^G) \\ X_i^G, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (22)$$

Ως αποτέλεσμα, κάθε γενεά αποτελείται από διανύσματα ισοδύναμα ή καλύτερα από αυτά που συνέθεταν την προηγούμενη.

Οι τελεστές που παρουσιάστηκαν εφαρμόζονται σε κάθε μέλος του πληθυσμού για ένα προκαθορισμένο αριθμό γενεών. Στην παρούσα υλοποίηση ο αριθμός των γενεών τέθηκε ίσος με 1200.

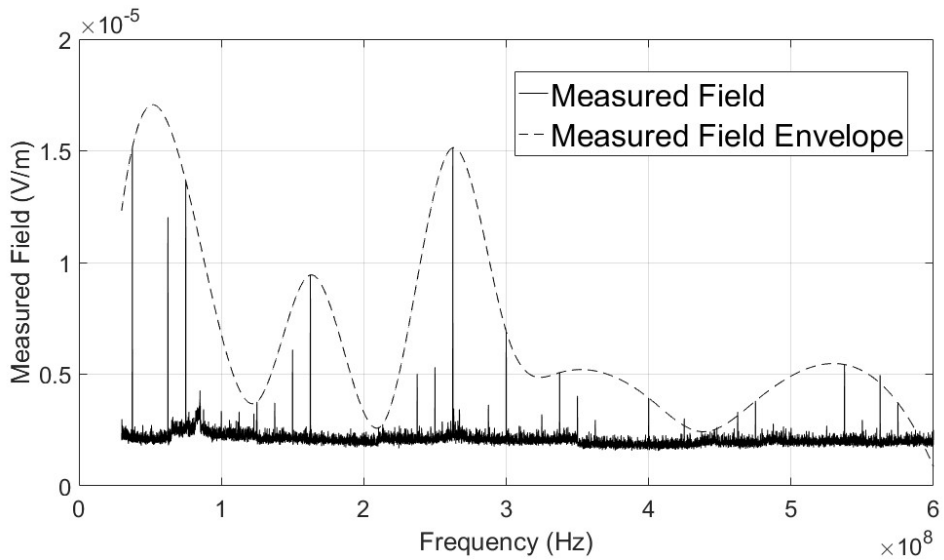
## 5.5 Μετρήσεις και Αποτελέσματα Μοντελοποίησης

Οι ακτινοβολούμενες εκπομπές της διάταξης πλήρως αμφίδρομης επικοινωνίας μετρήθηκαν στον ανηχοϊκό θάλαμο με τον εξοπλισμό που έχει αναφερθεί προηγούμενα. Η γεννήτρια παλμών είχε τεθεί σε λειτουργία με ταχύτητα 200 MHz, τροφοδοτώντας τον οδηγό LVDS με ψευδοτυχαία ακολουθία δεδομένων μήκους 16 bit. Η μέτρηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών έγινε στο εύρος συχνοτήτων 30 MHz -600 MHz.

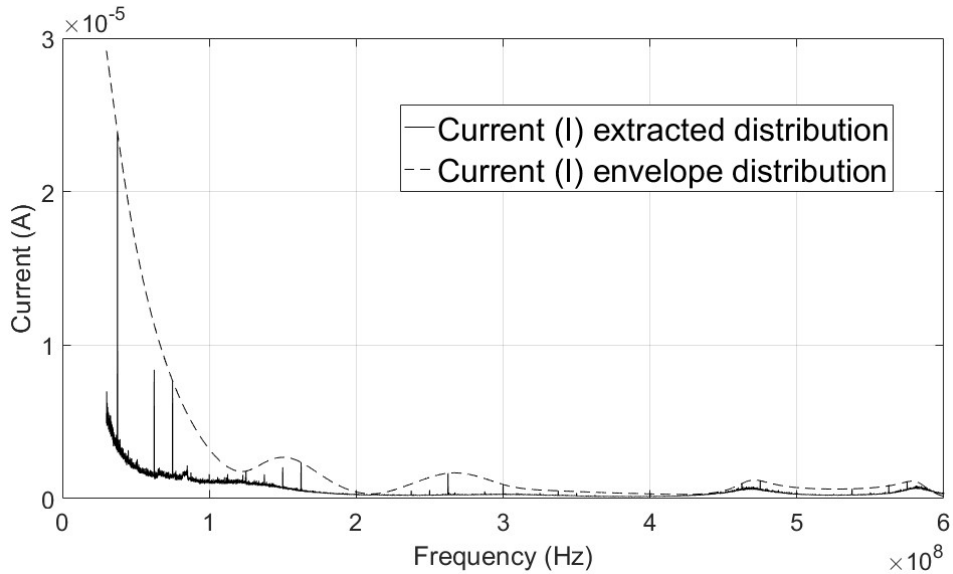
Το Σχήμα 56 απεικονίζει το μετρούμενο ηλεκτρικό πεδίο σε  $V/m$ . Για την επιτάχυνση της διαδικασίας και αποσκοπώντας στην περίπτωση εκτίμησης worst-case επιλέχθηκε, αντί του λεπτομερούς πλήρους συνόλου αποτελεσμάτων της μέτρησης, να χρησιμοποιηθεί η εξομαλυσμένη καμπύλη της περιβάλλουσάς του (Σχήμα 56). Με τη βοήθεια της εξίσωσης (13) του



Κεφαλαίου 3, οι ρευματικές κατανομές υπολογίζονται για τις δύο περιπτώσεις (μέτρηση, περιβάλλουσα) και απεικονίζονται στο Σχήμα 57.



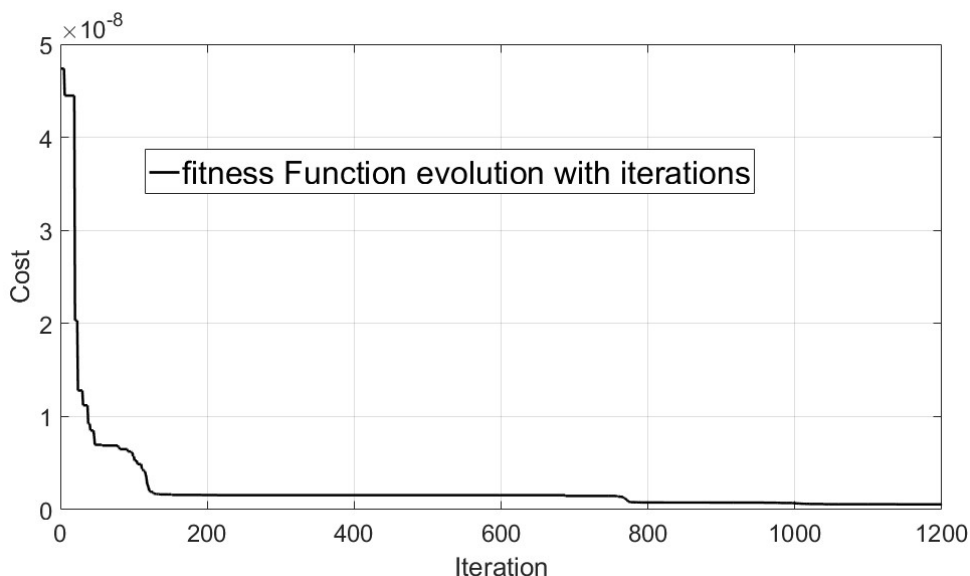
Σχήμα 56 - Μετρούμενες εκπομπές και η περιβάλλουσα



Σχήμα 57 - Κατανομές ρεύματος υπολογισμένες από τα αποτελέσματα της μέτρησης και την περιβάλλουσά τους

Στη συνέχεια, η ρευματική κατανομή της περιβάλλουσας εισάγεται ως είσοδος στον αλγόριθμο MRL-DE. Ο αλγόριθμος προσπαθεί να βρει τις κατάλληλες παραμέτρους για τους τέσσερις παλμούς ώστε το άθροισμά τους

(εξίσωση (18)) να ανασυστήνει την κατανομή ρεύματος - στόχο με καλή συμφωνία. Η συμφωνία αυτή εκφράζεται από την ελαχιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (εξίσωση (19)). Η βελτιστοποίηση εκτελείται για 1200 γενεές και το εξαγόμενο μοντέλο επιτυγχάνει τιμή για την αντικειμενική  $3.18 \times 10^{-10} (V/m)^2$ . Η εξέλιξη της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε γενεά (επανάληψη) φαίνεται στο Σχήμα 58. Οι παράμετροι των τεσσάρων παλμών του μοντέλου της ρευματικής κατανομής αποτυπώνονται στο επόμενο πίνακα (Πίνακας 13).



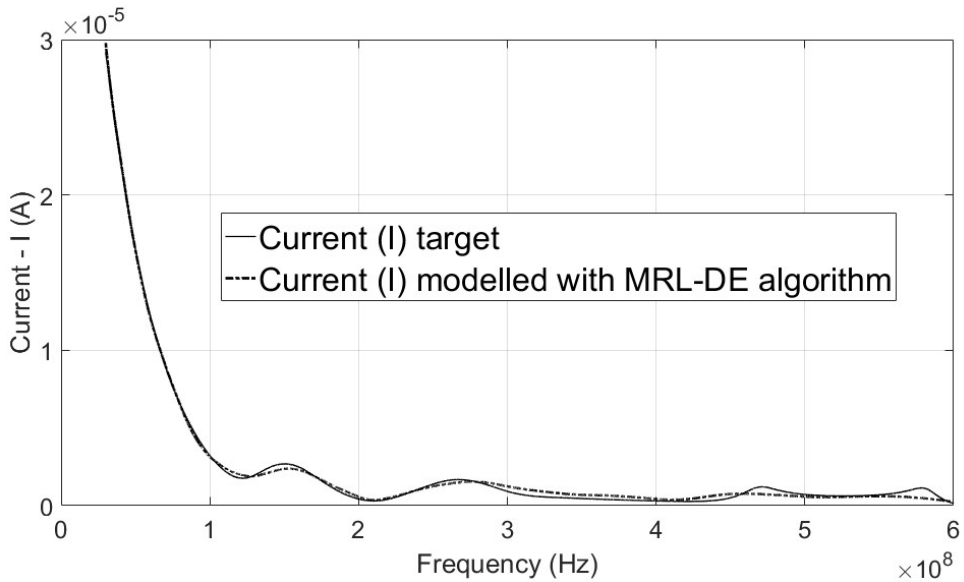
Σχήμα 58 - Εξέλιξη των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης στις γενεές

Πίνακας 13 - Μοντέλο ρεύματος 4 παλμών

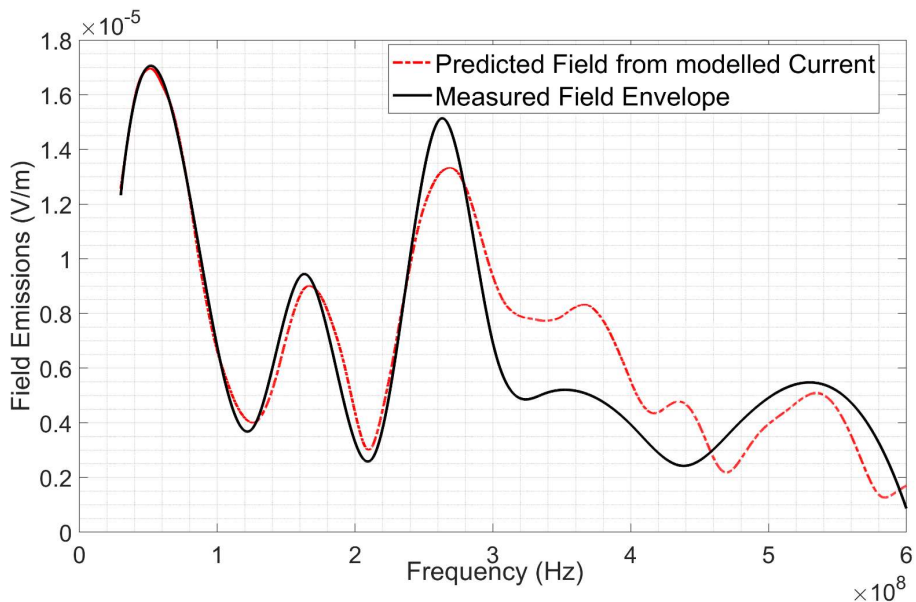
Pulse	Διάρκεια	Χρόνος Ανόδου	Χρόνος Καθόδου	Πλάτος
$i$	$\tau_i$	$\tau_{r_i}$	$\tau_{f_i}$	$A_i$
	(s)	(s)	(s)	(mA)
1	7.107e-10	2.60e-10	4.9321e-08	20.526
2	0	5.874e-09	2.60e-10	6.719
3	9.998e-06	4.999999e-06	1.2618e-08	99.051
4	3.722e-09	2.60e-10	2.4745e-08	13.341

Η ανασύσταση της κατανομής ρεύματος από τους τέσσερις παλμούς και την εξίσωση (18) απεικονίζεται στο Σχήμα 59. Η ανασυσταμένη ρευματική κατανομή είναι σε πολύ καλή συμφωνία με την περιβάλλουσα, που χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος του αλγορίθμου, παρουσιάζοντας

ελάχιστες διαφοροποιήσεις. Τελικά, η εκτίμηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών με βάση το μοντέλο των παλμών γίνεται με χρήση της εξίσωσης (13). Η καλή συμφωνία του πεδίου που παράγεται από το μοντέλο και της περιβάλλουσας των μετρήσεων αποτυπώνεται στο Σχήμα 60.



**Σχήμα 59 - Σύγκριση εξαγομένης κατανομής ρεύματος από τον αλγόριθμο MRL-DE με την κατανομή - στόχο από τις μετρήσεις**



**Σχήμα 60 - Σύγκριση ηλεκτρικού πεδίου υπολογισμένου με χρήση του μοντέλου ρεύματος και του ηλεκτρικού πεδίου της μέτρησης (περιβάλλουσα)**

## 5.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια τροποποιημένη περιγραφή της κατανομής ρεύματος επί τις θωράκισης του καλωδίου. Η περιγραφή αυτή βασισμένη στη διαφορική παλμική σηματοδότηση του συστήματος και στο φαινόμενο της λόξωσης, που εμφανίζεται στο σύστημα, χρησιμοποιείται στη μεθοδολογία των προηγούμενων κεφαλαίων για να μοντελοποιηθούν οι ακτινοβολούμενες εκπομπές μια πλήρως αμφίδρομης ζεύξης SpaceWire. Χρησιμοποιούνται τέσσερις παλμοί, ο καθένας για να εκφράσει το intra-pair skew καθενός από τα διαφορικά ζεύγη της ζεύξης. Η αναπαράσταση της ρευματικής κατανομής και η φασματική αντιμετώπιση διαφέρουν από τα προηγούμενα και αντί για «συχνότητα-προς-συχνότητα» εξάγεται ένα μοντέλο που περιγράφει ολόκληρη τη φασματική εξάρτηση. Έτσι με χρήση του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης (MRL-DE) επιλύεται ένα μοναδικό αντίστροφο πρόβλημα αντί για πολλαπλά μονοχρωματικά. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το μοντέλο περιγράφει με ακρίβεια το φαινόμενο και μπορεί να δώσει ασφαλείς εκτιμήσεις για τις ακτινοβολούμενες εκπομπές του καλωδίου.

## Κεφάλαιο 6

---

# Μετρήσεις Και Μοντελοποίηση Εκπεμπόμενης Ακτινοβολίας Πραγματικής Πλήρως Αμφίδρομης Ζεύξης SpaceWire

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων μιας πραγματικής ζεύξης SpaceWire. Ο όρος «πραγματική» τονίζεται μιας και η υλοποίηση της πλήρως αμφίδρομης ζεύξης βασίστηκε στον iSAFT SpaceWire Simulator, ο οποίος υλοποιεί όλα τα επίπεδα της ζεύξης – από το φυσικό έως το επίπεδο δικτύου- και προσφέρει την πλήρη λειτουργικότητα πομπού-δέκτη για συσκευές SpaceWire. Οι μετρήσεις λήφθηκαν για διαφορετικά μήκη ωφέλιμου φορτίου (payload) των πακέτων και διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων της ζεύξης SpaceWire. Στη συνέχεια, εξάγεται ένα μοντέλο ικανό να περιγράψει τη συμπεριφορά του συστήματος με ικανοποιητική ακρίβεια, βασισμένο στη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Οι διαφορετικές ρυθμίσεις λειτουργίες δεν ήταν δυνατόν να μετρηθούν με την υλοποίηση των καρτών τυπωμένου κυκλώματος που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια μιας και αυτές προσομοίωναν μόνο τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

### 6.1 iSAFT SpaceWire Simulator

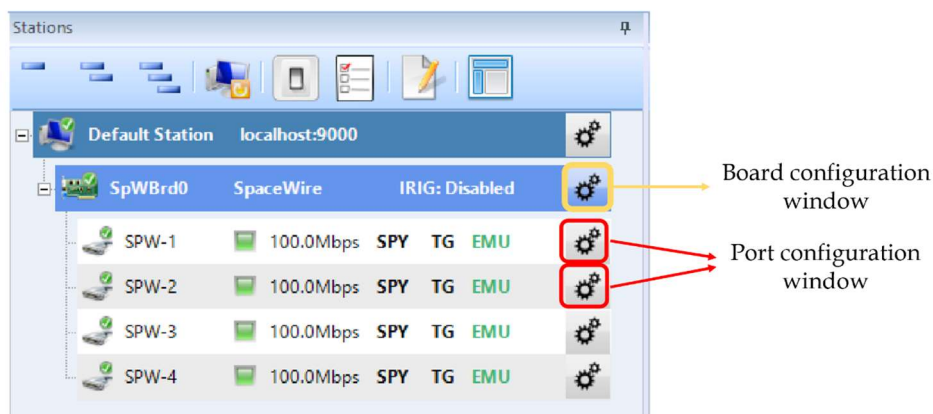
Ο iSAFT SpaceWire Simulator της TELETEL S.A. είναι μια συσκευή, η οποία έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης κόμβων SpaceWire για τη δημιουργία ζεύξεων πλήρως συμβατών με το πρότυπο SpaceWire [5]. Παρέχει τη λειτουργικότητα πομπού/δέκτη καθώς και δημιουργία δεδομένων σε καθεμία από τις 4 θύρες (ports) SpaceWire που διαθέτει. Υλοποιεί όλα τα επίπεδα της ζεύξης – από το φυσικό έως το επίπεδο δικτύου-επιτρέποντας έτσι τις δοκιμές πραγματικού εξοπλισμού και οργάνων κατά τις φάσεις σχεδίασης και δοκιμών πριν την εκτόξευση αποστολών ώστε να επιβεβαιωθεί η διαλειτουργικότητα των επιμέρους υποσυστημάτων εξοπλισμού [55]. Απουσία επιπλέον εξοπλισμού, μια πραγματική πλήρως αμφίδρομη ζεύξη SpaceWire μπορεί να υλοποιηθεί με τη σύνδεση ενός καλωδίου SpaceWire σε δύο θύρες του iSAFT, οι οποίες αποτελούνται από ειδικές κάρτες. Προσφέρει ρύθμιση των χαρακτηριστικών της ζεύξης καθώς των παραμέτρων της δημιουργουμένης κίνησης(traffic) των κόμβων (μήκος ωφέλιμου φορτίου -payload length, καθυστέρηση από πακέτο σε πακέτο - packet to packet delay time, ταχύτητα ζεύξης κ.α.). Επιπλέον, ο χρήστης έχει

τη δυνατότητα προεπισκόπησης ή καταγραφής στατιστικών της λειτουργίας κάθε κόμβου ανεξάρτητα (απεσταλμένα και ληφθέντα πακέτα, σφάλματα κ.α). Ως σύστημα, αποτελείται από την iSAFT Run-Time Engine (RTE) και διαφορά στοιχεία υλισμικού που συνθέτουν τη λειτουργικότητα του. Επιπλέον, διαθέτει μια γραφική διεπαφή χρήστη (Graphical User Interface – GUI) και έναν εξυπηρετητή απομακρυσμένου ελέγχου ώστε ο χρήστης να καθορίζει τις λειτουργικές παραμέτρους απομακρυσμένα χωρίς φυσική πρόσβαση, μέσω μιας ζεύξης TCP/IP (Ethernet).

Στη συνέχεια, παρατίθεται μια σύντομη παρουσίαση των δυνατοτήτων του iSAFT SpaceWire Simulator με έμφαση στις λειτουργίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη εργασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρέχει μεγάλο πλήθος λειτουργιών και δυνατοτήτων και ότι μόνο ένα πολύ μικρό υποσύνολο αυτών χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στην [55].

### 6.1.1 Επιλογές Διάρθρωσης Συστήματος

Αρχικά, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, μέσα από το GUI του iSAFT, να δει μια πλήρη εικόνα της κατάστασης των θυρών του συστήματος (Σχήμα 61) και να προχωρήσει σε περαιτέρω ρυθμίσεις (Board Configuration).



Σχήμα 61 – Επιλογές διάρθρωσης συστήματος [55]

Μέσω της επιλογής «Port Configuration» (Σχήμα 62) ο χρήστης μπορεί να καθορίσει χαρακτηριστικά, όπως την αυτόματη εκκίνηση (link auto start - Σχήμα 62 A) της ζεύξης, την ταχύτητα της ζεύξης (link rate - Σχήμα 62 B), το μέγιστο επιτρεπτό μήκος πακέτου λήψης (maximum receive packet length - Σχήμα 62 C), το μέγιστο επιτρεπτό μήκος πακέτου εκπομπής (maximum transmit packet length - Σχήμα 62 D), ρυθμίσεις για την πολικότητα και τη διάρκεια του παλμού σκανδαλισμού (trigger out polarity - Σχήμα 62 E, trigger signal pulse duration - Σχήμα 62 F) καθώς και τη λειτουργία καταβόθρας πακέτων στη λήψη (packet sinking - Σχήμα 62 G).

Εφόσον η επιλογή «Link auto start» έχει επιλεχθεί, η μετάδοση από τη συγκεκριμένη θύρα ξεκινά αυτόματα όταν υπάρξει φυσική διασύνδεση. Η λειτουργία «packet sinking» αφορά τη διαχείριση των λαμβανόμενων πακέτων από τη συγκεκριμένη θύρα και επιτρέπει λήψη σε πλήρη ταχύτητα. Συγκριμένα, επιτρέπει στο υλισμικό της θύρας αφού παραλάβει ένα πακέτο και το ελέγξει για τυχόν λάθη να το πετά και να μην περιμένει να το ανεβάσει σε υψηλότερο επίπεδα επεξεργασίας, καταγραφής ή αποθήκευσης. Έτσι, ο δέκτης μπορεί να υποστηρίξει ταχύτερους ρυθμούς μετάδοσης από το φυσικό κανάλι στη λήψη.

**SpaceWire Port Configuration - SPW-1**

**Port information**

Port name: SPW-1  
Type: SpaceWire

**SpW link settings**

Link rate (Mbps): 100.0  
 Link auto start

**Packet truncation**

Maximum receive packet length (KB): 128  
Maximum transmit packet length (KB): 128

**Trigger settings**

Trigger out polarity: Positive  
Trigger signal pulse duration (usec): 1000

**Reception mode**

Packet Sinking

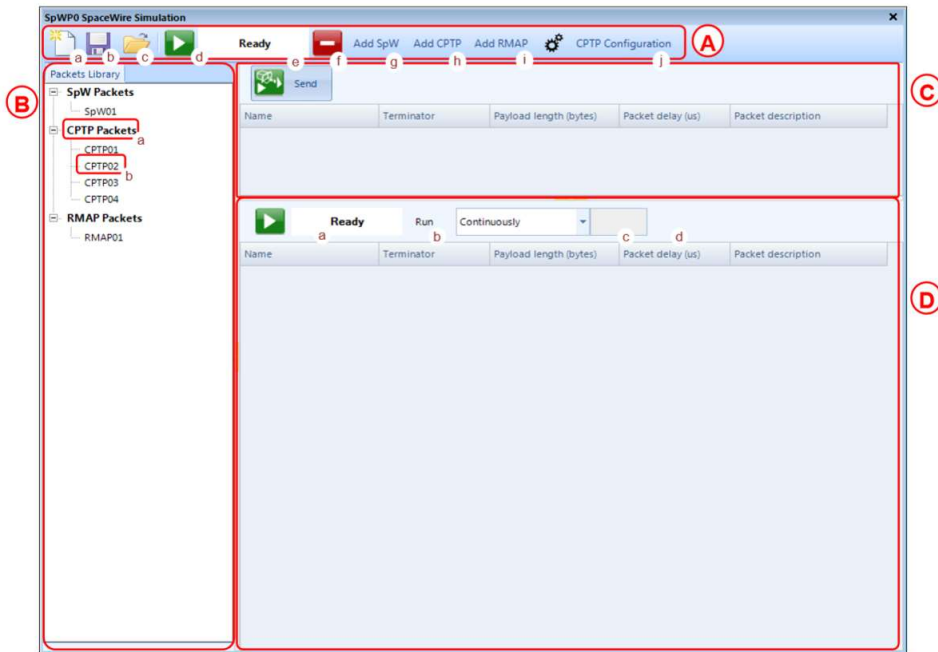
Buttons: 1 Disable port, 2 Apply, 3 Initialise, 4 Close

Σχήμα 62 - Επιλογές διάρθρωσης θύρας [55]

Κάθε θύρα μπορεί να ενεργοποιηθεί/απενεργοποιηθεί και να μεταβληθούν οι παράμετροι της ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες θύρες μέσω του GUI. Αφού γίνει αλλαγή των παραμέτρων μιας θύρας χρειάζεται να απενεργοποιηθεί και να ενεργοποιηθεί ξανά αποκλειστικά αυτή η θύρα, με εξαίρεση τον ρυθμό μετάδοσης (link rate) που χρειάζεται να απενεργοποιηθούν και να ενεργοποιηθούν όλες οι εμπλεκόμενες θύρες.

### 6.1.2 Λειτουργία Δημιουργίας Κίνησης Δεδομένων

Για τη δημιουργία κίνησης πακέτων δεδομένων (Simulator) στη ζεύξη SpaceWire αρχικά πρέπει να καθοριστεί το είδος των πακέτων που δημιουργεί ο κάθε κόμβος. Από την επιλογή του μενού «iSAFT» και στη συνέχεια «SpW Simulation» επιλέγεται η θύρα δημιουργίας δεδομένων. Κάθε θύρα έχει τη δικιά της ξεχωριστή βιβλιοθήκη πακέτων (Packet Library), στην οποία αποθηκεύονται τα πακέτα που δημιουργεί ο χρήστης (Σχήμα 63).



Σχήμα 63 - Δημιουργίας Κίνησης Δεδομένων iSAFT [55]

Υποστηρίζεται η δημιουργία όλων των τύπων πακέτου που είναι συμβατά με το πρωτόκολλο SpaceWire. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τρεις τέτοιοι τύποι πακέτων: «SpaceWire», «RMAP» και «CPTP». Ο διαχωρισμός γίνεται γιατί υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα οποία υποστηρίζονται από το πρότυπο SpaceWire (τα ECSS-E-ST-50-51C [56], ECSS-E-ST-50-52C [57] & ECSS-E-ST-50-53C [58]), και το καθένα προσφέρει διαφορετικές υπηρεσίες στις εφαρμογές των αποστολών. Ειδικότερα, το CCSDS Packet Transfer Protocol [58] (τύπου CPTP) προσφέρει τη δυνατότητα να μεταφέρονται πακέτα διαφορετικών τύπων ενθυλακώνοντάς τα σε πακέτα SpaceWire και απομονώνοντάς τα μόνο όταν φτάσουν στον προορισμό τους. Αυτή διαδικασία επιτρέπει τη μετάδοση πακέτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά από αυτά του SpaceWire να μεταδίδονται μέσω ενός δικτύου SpaceWire. Από την άλλη, το Remote Memory Access Protocol (RMAP) [57] υποστηρίζει ανάγνωση και εγγραφή στη μνήμη ενός κόμβου SpaceWire. Αυτή η δυνατότητα είναι χρήσιμη για



πολλά είδη κόμβων για τη συλλογή πληροφοριών και δεδομένων καθώς και τον έλεγχο των κόμβων. Επιπλέον, το RMAP υποστηρίζει καταφόρτωση and εκσφαλμάτωση (debugging) λογισμικού σε απομακρυσμένους επεξεργαστές καθώς και τον ορισμό παραμέτρων διάρθρωσης σε συστήματα χωρίς ενσωματωμένους (embedded) επεξεργαστές. Ο έλεγχος και η διάρθρωση των μεταγωγέων δρομολόγησης (routing switches) επιτυγχάνεται μέσω πακέτων RMAP.

Για την κατάλληλη επεξεργασία των πακέτων κατά τη λήψη, ένα αναγνωριστικό πρωτοκόλλου τοποθετείται στην αρχή κάθε τέτοιου πακέτου. Έτσι, όλα τα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα σε ένα δίκτυο SpaceWire χωρίς να διαδρούν με τα υπόλοιπα.

Με τις επιλογές «Add SpW», «Add CPTP», «Add RMAP» (Σχήμα 63 -g, h και i) εισάγονται νέα πακέτα του αντίστοιχου τύπου στη βιβλιοθήκη πακέτων. Ο κύριος τύπος για τη μετάδοση δεδομένων σε ένα δίκτυο SpaceWire – και αυτός που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία- είναι το πακέτο SpaceWire.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει τα χαρακτηριστικά του πακέτου κατά τη δημιουργία του (Σχήμα 64). Συγκριμένα, ο χρήστης μπορεί να ορίσει για το πακέτο ένα όνομα (name - Σχήμα 64 A), τον τύπο σημαντήρα τέλος πακέτου (EoP, EEP, Partial - Σχήμα 64 B), τον χρόνο καθυστέρησης από πακέτο σε πακέτο (packet to packet delay time - Σχήμα 64 B) και το μήκος ωφέλιμου φορτίου (payload length - Σχήμα 64 D). Το ωφέλιμο φορτίο του κάθε πακέτου μπορεί να οριστεί από τον χρήστη ή να είναι τελείως τυχαίο και προσφέρεται η δυνατότητα προεπισκόπησης των δεδομένων του ωφέλιμου φορτίου του πακέτου στο δεκαεξαδικό σύστημα. Επιπλέον, προσφέρεται και η δυνατότητα έγχυσης λαθών (error injection - Σχήμα 64 C) στα δημιουργούμενα πακέτα με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους.

Μετά τη δημιουργία των επιθυμητών πακέτων, πρέπει να σχηματιστεί η ουρά μετάδοσης (transmission queue), η οποία αποτελείται από πακέτα της βιβλιοθήκης. Η ουρά μπορεί να μεταδοθεί είτε μία φορά είτε πολλαπλές αναλόγως την ομάδα μετάδοσης στην οποία δημιουργείται. Η ομάδα ασύγχρονης μετάδοσης (Σχήμα 65) μεταδίδει κάθε πακέτο, που περιέχεται στην ουρά, μόνο μια φορά, σειριακά και μετά σταματά. Έτσι, κάθε φορά που επιλέγεται η λειτουργία «Send» (Σχήμα 65), εκτελείται μια μετάδοση ολόκληρης της ουράς.

**Add SpW Packet**

**Packet**

Packet name

**Options**

Terminator type

Packet to packet delay time (us)

**Error injection**

Error injection type

**Error parameters**

Error position

Repetitions of error

Signal code value (hex)

Parity injection

**Payload**

Payload length (bytes)

Σχήμα 64 - Δημιουργία πακέτου SpaceWire [55]

**SpWP0 SpaceWire Simulation**

Ready Add SpW Add CPTP Add RMAP CPTP Configuration

**Packets Library**

- SpW Packets
  - SpW01
  - SpW02
  - SpW03
- CPTP Packets
  - CPTP01
  - CPTP02
  - CPTP03
  - CPTP04
  - CPTP05
- RMAP Packets
  - RMAP01
  - RMAP02
  - RMAP03

**Send**

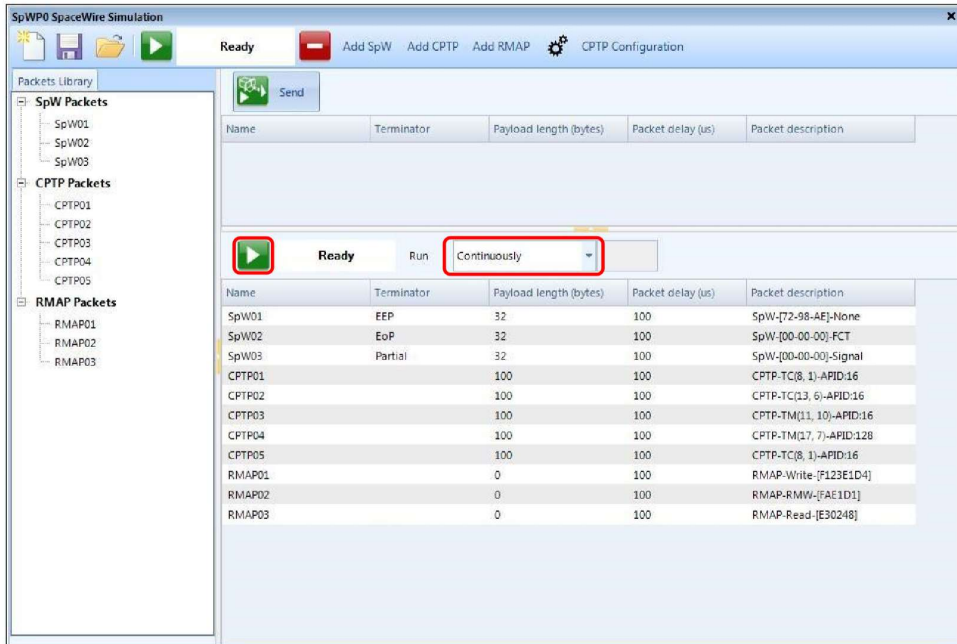
Name	Terminator	Payload length (bytes)	Packet delay (us)	Packet description
SpW01	EEP	32	100	SpW-[72-98-AE]-None
SpW02	EoP	32	100	SpW-[00-00-00]-FCT
SpW03	Partial	32	100	SpW-[00-00-00]-Signal
CPTP01		100	100	CPTP-Tc(8, 1)-APID:16
CPTP02		100	100	CPTP-Tc(13, 6)-APID:16
CPTP03		100	100	CPTP-TM(11, 10)-APID:16
CPTP04		100	100	CPTP-TM(17, 7)-APID:128
RMAP01		0	100	RMAP-Write-[F123E1D4]
RMAP02		0	100	RMAP-RMW-[FAE1D1]
RMAP03		0	100	RMAP-Read-[E30248]

Ready Run Continuously

Name	Terminator	Payload length (bytes)	Packet delay (us)	Packet description
------	------------	------------------------	-------------------	--------------------

Σχήμα 65 - Ομάδα ασύγχρονης μετάδοσης [55]

Αντίθετα, όταν η ουρά μετάδοσης ανήκει στην ομάδα δημιουργίας κίνησης (Traffic Generation) η ουρά μεταδίδεται επαναλαμβανόμενα. Προσφέρεται η επιλογή να ορίσει ο χρήστης τον αριθμό επαναλήψεων ολόκληρης της ουράς ή η συνεχομένη μετάδοση έως ότου τη σταματήσει ο χρήστης (Σχήμα 66). Με την επιλογή της λειτουργίας «Start/Stop» ξεκινά και σταματά η μετάδοση της ουράς.

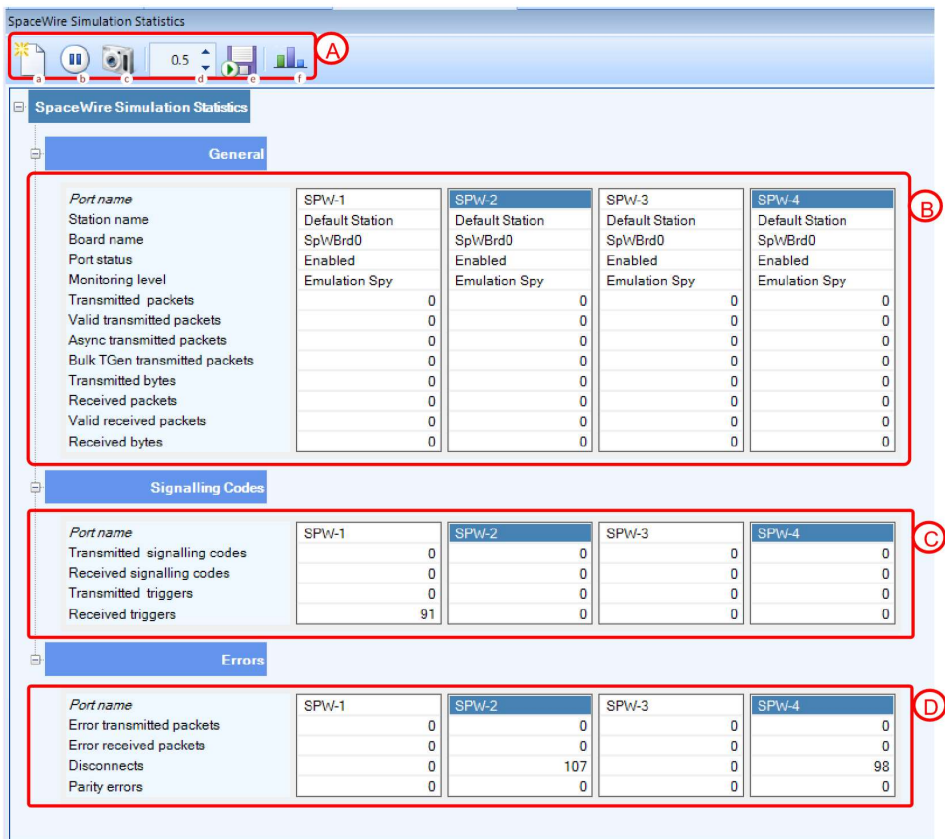


Σχήμα 66 – Ομάδα δημιουργίας κίνησης [55]

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι σε κάθε θύρα πρέπει να ενεργοποιηθεί η λήψη από την αντίστοιχη λειτουργία «Start/Stop» (Σχήμα 63 d) πριν η αντίστοιχη θύρα εκπομπής εκκινήσει τη μετάδοση, διαφορετικά η μετάδοση μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα.

### 6.1.3 Λειτουργία Επισκόπησης Στατιστικών

Μέσω της επιλογής λειτουργίας «SpW Simulation Statistics» ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί τα στατιστικά στοιχεία της ζεύξης (Σχήμα 67), όπως αυτά παρέχονται απευθείας από τις φυσικές θύρες του iSAFT. Τα δεδομένα, που αποτυπώνονται με τη συγκεκριμένη λειτουργία, είναι πλήθος μεταδοθέντων πακέτων, πλήθος μεταδοθέντων bytes, πλήθος πακέτων με σφάλματα, σφάλματα ισοτιμίας, αποσυνδέσεις κ.α.



Σχήμα 67 - Επισκόπηση στατιστικών ζεύξης

#### 6.1.4 Δημιουργία Κίνησης Δεδομένων για τις Μετρήσεις

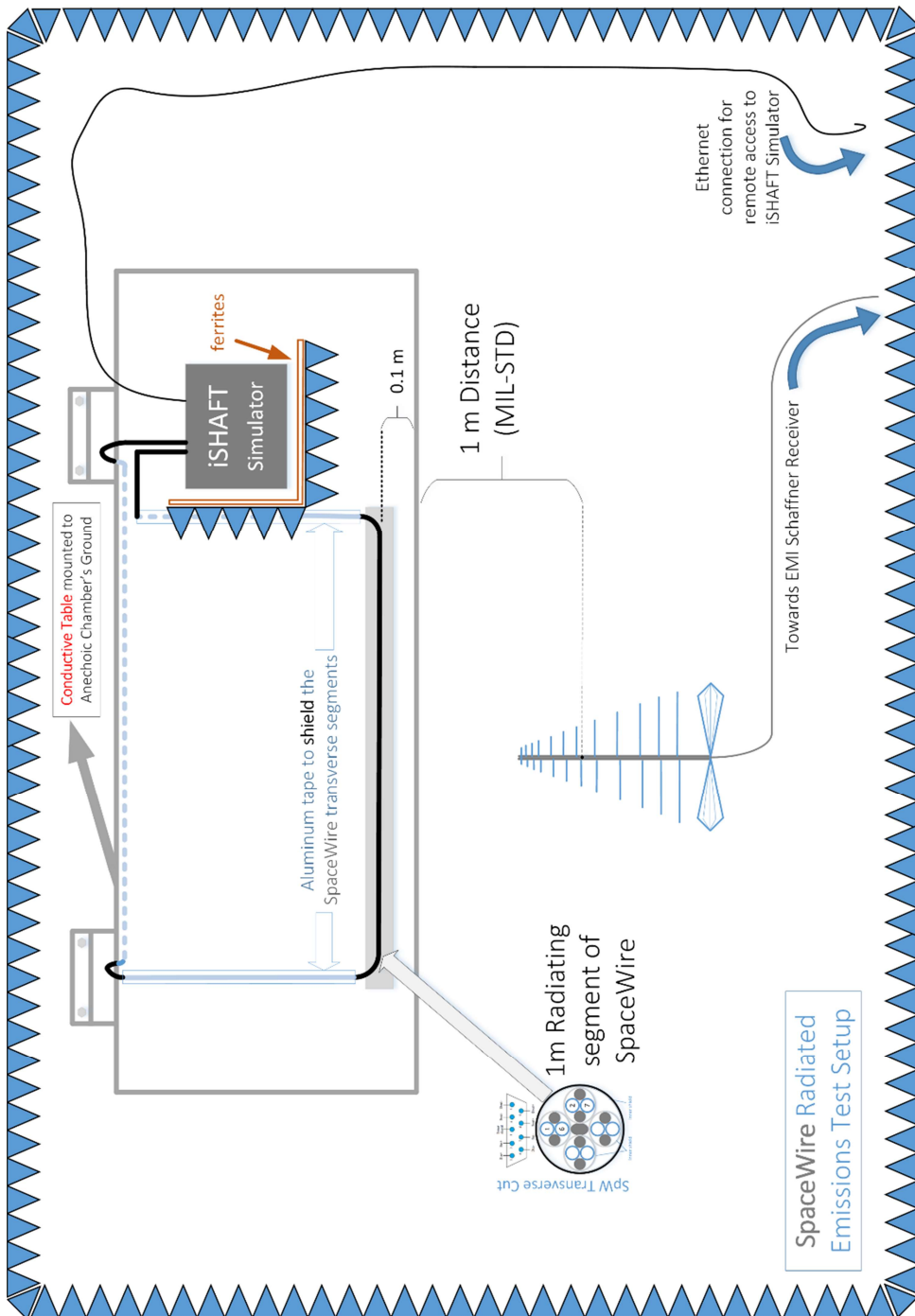
Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκε με χρήση 2 θυρών, προσομοιώνοντας δύο κόμβους, του iSAFT και του καλωδίου SpaceWire μια πλήρως αμφίδρομη ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων. Αξιοποιήθηκε η δυνατότητα πλήρως αμφίδρομης ζεύξης με τη δημιουργία κίνησης πακέτων, τα οποία μεταδίδονταν και λαμβάνονταν και στις δύο θύρες. Για κάθε θύρα, ένα δημιουργήθηκε ένα «SpW packet» και προστέθηκε στην ουρά μετάδοσης ώστε να μεταδίδεται συνεχόμενα. Σε ολόκληρη τη διάρκεια των δοκιμών, το ωφέλιμο μέγεθος φορτίου κάθε πακέτου και ο σημαντήρας τέλους πακέτου (EOP) είναι ίδια για τις δύο θύρες-κόμβους. Το περιεχόμενο επιλέχθηκε να είναι τυχαίο, έτσι είναι διαφορετικό για κάθε κόμβο της ζεύξης, και η ταχύτητα της ζεύξης καθώς και το μέγεθος φορτίου του πακέτου μεταβαλλόταν για κάθε δοκιμή. Γινόταν εκκίνηση της λειτουργίας λήψης, σύμφωνα με τις οδηγίες, και στη συνέχεια ενεργοποιούταν η μετάδοση. Μέσω της λειτουργίας επισκόπησης στατιστικών γινόταν επιβεβαίωση ότι η ζεύξη λειτουργούσε ορθά και μόνο τότε εκκινούσε η λήψη μετρήσεων.

## 6.2 Διάταξη Μετρήσεων

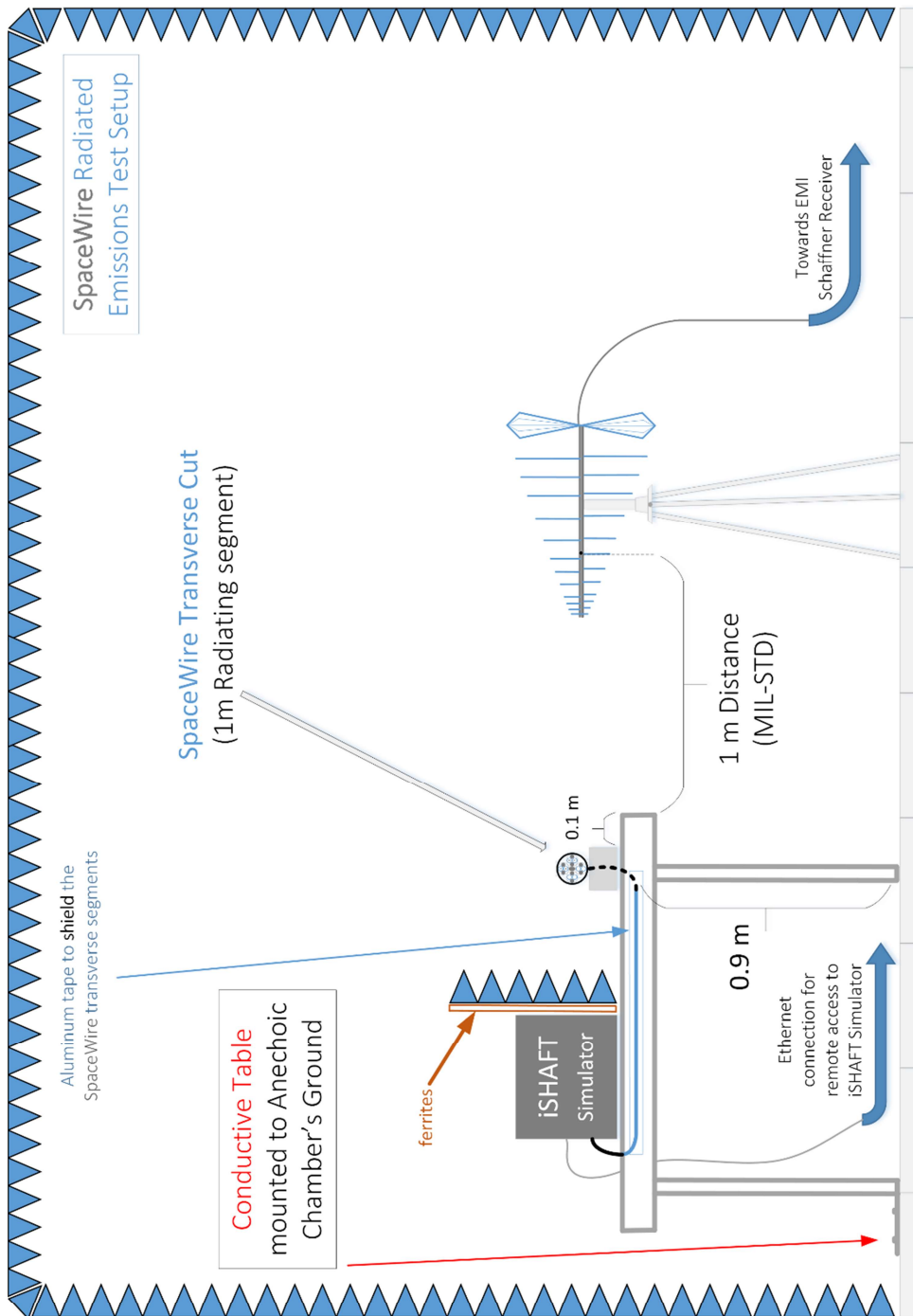
Η διάταξη, που υλοποιήθηκε [59] για τη διενέργεια των μετρήσεων, είναι παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι βασισμένη στο MIL-STD-461G [28], και παρατίθεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 68, Σχήμα 69). Η τοποθέτηση είναι ενδεικτική καλωδίωσης, όπως τοποθετείται εντός ενός διαστημικού σκάφους ή δορυφόρου, στην περίπτωση που υπάρχουν μεταλλικά πετάσματα. Οι καλωδιώσεις διατρέχουν το σκάφος αρκετά κοντά σε αγωγίμα πετάσματα και συνήθως σε ευθείες γραμμές σύμφωνα με τις βέλτιστες πρακτικές. Ο εξοπλισμός υπό δοκιμή αποτελείται είναι το 1 m καλωδίου τοποθετημένο στο τραπέζι αλουμινίου. Ο iSAFT της TELETEL S.A. διαχειρίζεται την εκπομπή και τη λήψη του σήματος. Όλα τα τμήματα του καλωδίου, εκτός από το 1 m που είναι επιθυμητό να μετρηθεί, είναι καλυμμένα με αγωγίμη ταινία γειωμένη στο τραπέζι. Λόγω του μήκους του διαθέσιμου καλωδίου SpaceWire, που δεν επέτρεπε να μεταφερθεί εκτός θαλάμου, ο iSAFT τοποθετήθηκε επί του τραπεζιού και λήφθηκαν όλα τα απαραίτητα μέτρα, όπως η κάλυψη του με φερρίτες και απορροφητικούς κώνους, ώστε να μην συνεισφέρει στις μετρούμενες εκπομπές. Ο iSAFT αρχικά συνδέθηκε με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή στον προθάλαμο του ανηχοϊκού για την απομακρυσμένη διαχείριση του μέσω διασύνδεσης Ethernet. Πιθανή αιτία γι' αυτό το φαινόμενο είναι ότι δεν υπάρχει υποδοχή ethernet στο πέτασμα διεπαφών του θαλάμου ώστε να γειώνεται, αντ' αυτού το καλώδιο εισέρχεται στον θάλαμο από μικρή οπή στο πέτασμα διεπαφών. Έτσι στη συνέχεια, αφού εισάγονταν οι ρυθμίσεις στον iSAFT και επιβεβαιώνονταν η ορθή λειτουργία της ζεύξης μέσω των στατιστικών, το καλώδιο αποσυνδεόταν για τη λήψη των μετρήσεων.

Τα όργανα, που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις, είναι ο δέκτης EMI και η κεραία του πίνακα εξοπλισμού (Πίνακας 6) με τις ρυθμίσεις του πίνακα ρυθμίσεων του δέκτη EMI (Πίνακας 7). Με βάση τους πίνακες D1-D6 του προτύπου EN 55016-4-2\_2011, A2: 2018 [43] η εκτεταμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty) των μετρήσεων του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου εκτιμάται στη μέγιστη τιμή των 6 dB.

Τα σενάρια μέτρησης των ακτινοβολούμενων εκπομπών είναι τα ακρότατα του ρυθμού δεδομένων που υποστηρίζει ο iSAFT, σύμφωνα με το πρότυπο, δηλαδή τα 10 και 400 Mbps. Τα μήκη ωφέλιμου φορτίου (payload sizes) που μετρήθηκαν για αυτούς τους δύο ρυθμούς είναι 32 και 2048 bytes και το περιεχόμενο δεδομένων είναι τυχαία bytes.



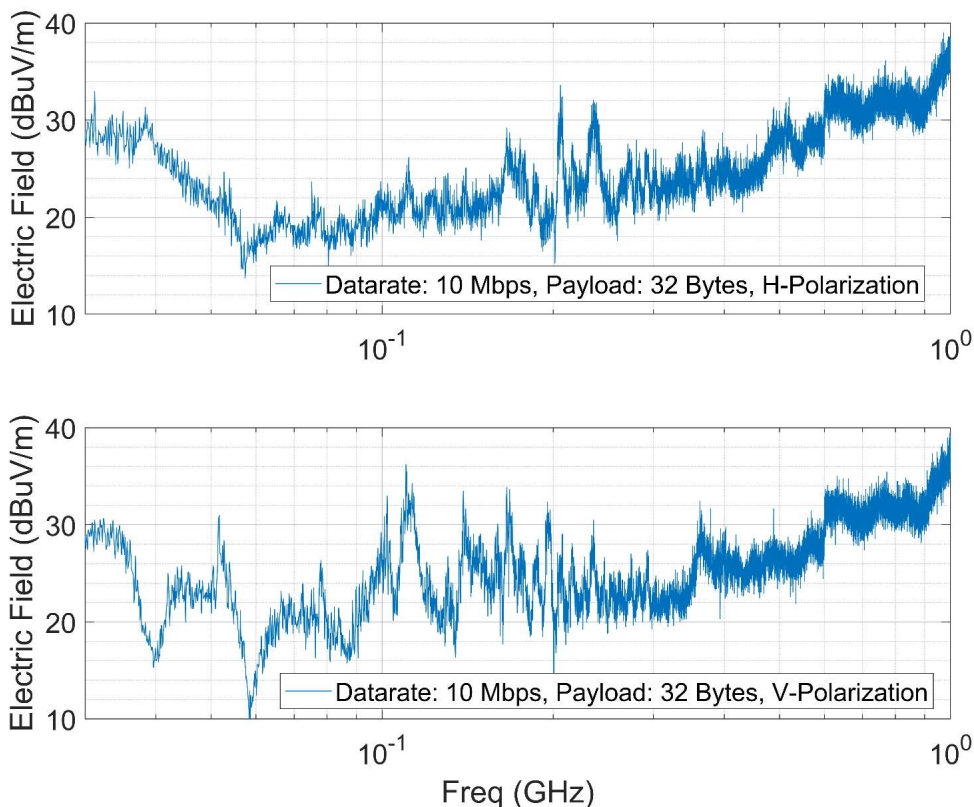
Σχήμα 68 - Κάτοψη διάταξης μετρήσεων



Σχήμα 69 - Πλαινή όψη διάταξης μετρήσεων

### 6.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων Ακτινοβολούμενων Εκπομπών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την πλήρως αμφίδρομη ζεύξη σε λειτουργία ρυθμού 10 Mbps με μέγεθος payload 32 bytes φαίνονται στο Σχήμα 70. Έχουν ληφθεί μετρήσεις στο εύρος συχνοτήτων 30 MHz έως 1 GHz για την οριζόντια και κάθετη πόλωση. Η κάθετη πόλωση παρουσιάζει λίγο υψηλότερα επίπεδα εκπομπών και περισσότερες φασματικές συνιστώσες, αλλά συνολικά το συγκεκριμένο σενάριο λειτουργίας παρουσιάζει ένα «ήσυχο» φάσμα

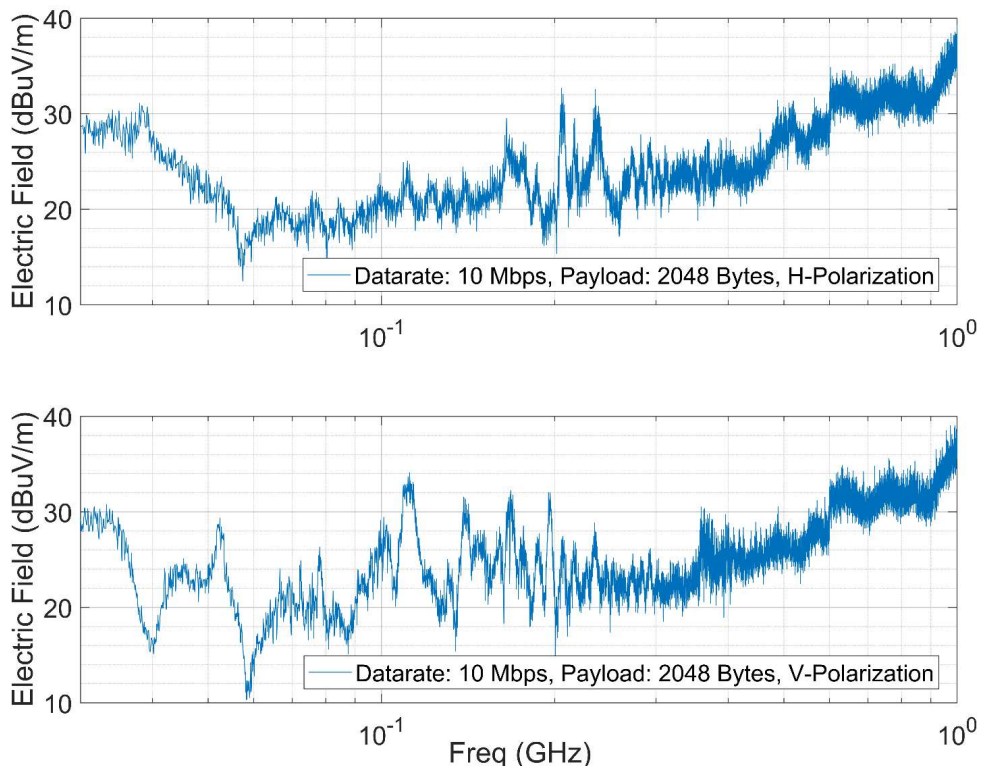


Σχήμα 70 - Αποτελέσματα μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών για ρυθμό δεδομένων 10 Mbps, μέγεθος payload 32 bytes, οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση

Στη συνέχεια, το μέγεθος του payload αυξήθηκε στα 2048 bytes, με τον ρυθμό δεδομένων να παραμένει στα 10 Mbps. Τα αποτελέσματα μετρήσεων των ακτινοβολούμενων εκπομπών του συγκεκριμένου τρόπου λειτουργίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 71 και για τις δύο πολώσεις. Συγκριτικά με το μέγεθος payload των 32 bytes, οι μετρούμενες εκπομπές είναι λίγο

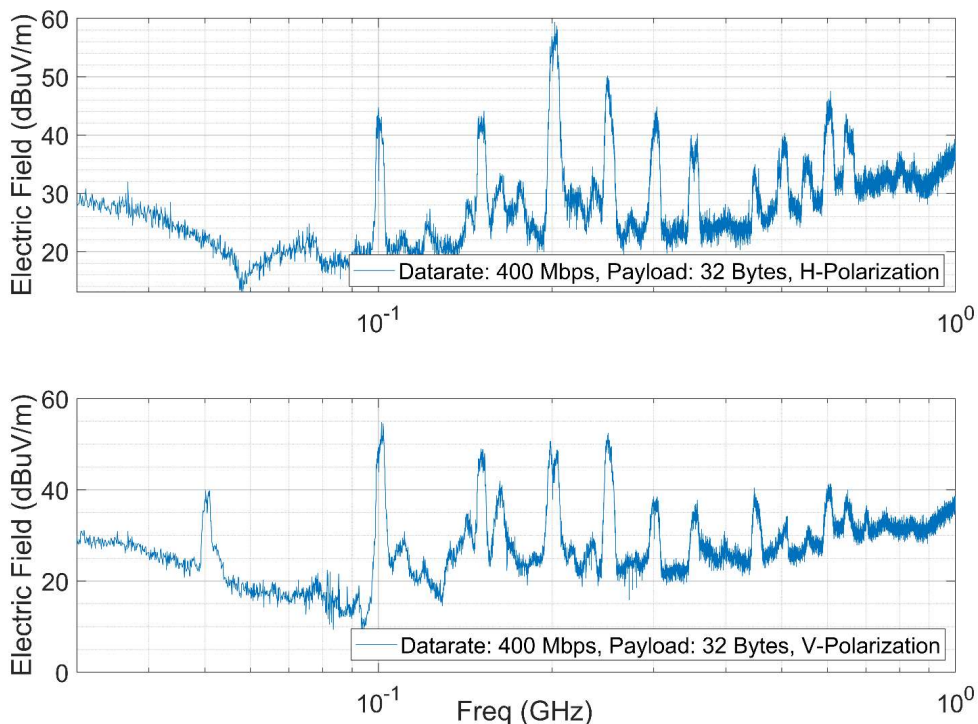


χαμηλότερες αλλά εν γένει τα δύο σενάρια λειτουργίας παρουσιάζουν παρόμοια φασματική συμπεριφορά.



**Σχήμα 71 - Αποτελέσματα μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών για ρυθμό δεδομένων 10 Mbps, μέγεθος payload 2048 bytes, οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση**

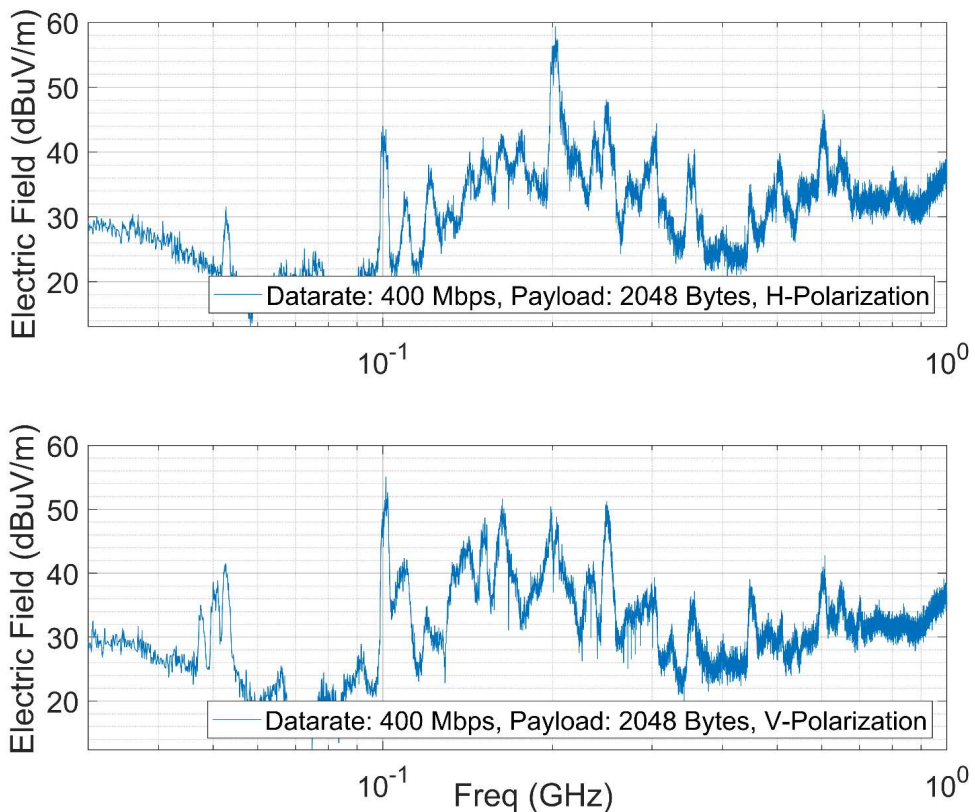
Έπειτα, ο ρυθμός δεδομένων αυξήθηκε στη μέγιστη υποστηριζόμενη από το πρωτόκολλο, 400 Mbps. Η αλλαγή πραγματοποιήθηκε και για τις δύο θύρες-κόμβους του iSAFT. Οι μετρούμενες ακτινοβολούμενες εκπομπές για την πλήρως αμφίδρομη ζεύξη SpaceWire με μέγεθος payload 32 Bytes φαίνονται στο Σχήμα 72. Παρουσιάζει τα αποτελέσματα και για τις δύο πολώσεις στο εύρος συχνοτήτων 30 MHz έως 1 GHz. Παρατηρείται ότι τα μέγιστα επίπεδα ακτινοβολίας αυξήθηκαν αρκετά, και κατά περιπτώσεις σχεδόν διπλασιάστηκαν με την αύξηση της ταχύτητας της ζεύξης και για τις δύο πολώσεις. Οι φασματικές συνιστώσες είναι πλέον ξεκάθαρες στο Σχήμα 72 και παρατηρείται ότι η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από τη συγκεκριμένη λειτουργία φτάνει σχεδόν ως το άνω άκρο του μετρούμενου φάσματος.



**Σχήμα 72 - Αποτελέσματα μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών για ρυθμό δεδομένων 400 Mbps, μέγεθος payload 32 bytes, οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση**

Τέλος, το μέγεθος του payload όπως και προηγουμένως αυξήθηκε στα 2048 bytes για ρυθμό δεδομένων 400 Mbps. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις δύο πολώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 73. Παρατηρείται ότι οι εκπομπές σε αυτή τη λειτουργία είναι πιο «απλωμένες» στο φάσμα και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων γύρω τις κορυφές αλλά παρουσιάζουν λίγο χαμηλότερα μέγιστα επίπεδα σε σχέση με αυτές που αντιστοιχούν στο μικρότερο μέγεθος payload.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι η μέτρηση επαναλήφθηκε τρεις φορές και τα δεδομένα που λήφθηκαν ήταν σχεδόν πανομοιότυπα με μέγιστη απόκλιση 3 dBuV/m. Τα σχήματα της παρούσας παραγράφου (Σχήμα 70 - Σχήμα 73) αποτελούν τη «δυσμενέστερη» περίπτωση (worst-case scenario) υπό την έννοια των μέγιστων εκπομπών για κάθε λειτουργία.



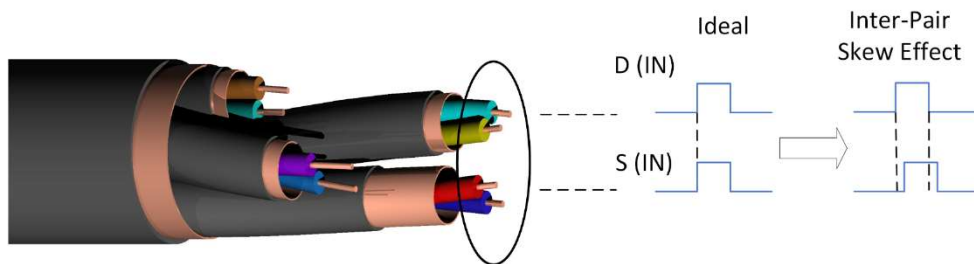
**Σχήμα 73 - Αποτελέσματα μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών για ρυθμό δεδομένων 400 Mbps, μέγεθος payload 2048 bytes, οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση**

## 6.4 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης και Σύνθεση Μοντέλου

Το καλώδιο SpaceWire είναι ένα θωρακισμένο καλώδιο και ως τέτοιο δύναται να αναπαρασταθεί, σύμφωνα με τη θεώρηση του Κεφαλαίου 3 [31], από τη θωράκισή του και να μοντελοποιηθεί ως κεραία οδεύοντος κύματος. Η πηγή των ακτινοβολούμενων εκπομπών του καλωδίου είναι το ρεύμα που διαρρέει τη θωράκιση, έτσι για την πρόβλεψη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του πρέπει να καθοριστεί η κατανομή ρεύματος. Σύμφωνα με όσα έχουν παρουσιαστεί στην παρούσα διατριβή, αυτό είναι εφικτό με την επίλυση του αντίστροφου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος, μέσω μιας ευρεστικής διαδικασίας. Η εκτίμηση της κατανομής του ρεύματος στη θωράκιση επιτυγχάνεται από την προτυποποιημένη μέτρηση [27], [28], τα αποτελέσματα της οποίας για διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η εφαρμογή γίνεται για τη λειτουργία με ρυθμό δεδομένων 400 Mbps και μέγεθος payload 2048 bytes (Σχήμα 73) και πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα για τη μέτρηση της

κάθετης πόλωσης. Τα αποτελέσματα της μέτρησης εισάγονται ως δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο της τροποποιημένης μοντελοποίησης του Κεφαλαίου 5 [51], [59]. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι η τροποποιημένη μεθοδολογία μοντελοποίησης του Κεφαλαίου 5 διαφοροποιείται από την αντιμετώπιση των προηγούμενων κεφαλαίων [44] στην περιγραφή της ρευματικής κατανομής υιοθετώντας αντί της προηγούμενης συχνοτικά-ανεξάρτητης προσέγγισης δηλαδή συχνότητα προς συχνότητα (μονοχρωματικά)[44], μια παλμική αναπαράσταση [51], [59]. Έτσι, για τη μοντελοποίηση πρέπει να επιλυθεί ένα μοναδικό αντίστροφο πρόβλημα αντί για πολλαπλά - αναλόγως το πλήθος των συχνοτήτων (bins) δηλαδή της ανάλυσης συχνότητας (frequency resolution) της μέτρησης. Αυτό το μοναδικό αντίστροφο πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση του αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution - DE) [52]-[54].

Η ρευματική κατανομή δημιουργείται από έγχυση ρευμάτων κοινού τρόπου (common mode) στην εξωτερική θωράκιση, τα οποία οφείλονται στο intra-pair skew. Τα ρεύματα αυτά μπορούν να θεωρηθούν παλμικά λόγω της συνολικής μορφής των σημάτων του συστήματος (Σχήμα 52). Η πλήρως αμφίδρομη υλοποίηση της ζεύξης SpaceWire αποτελείται από τέσσερα ζεύγη ( $D_{IN}, D_{OUT}, S_{IN}, S_{OUT},$ ), έτσι αναμένεται να παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικοί παλμοί επί της θωράκισης λόγω του intra-pair skew. Επιπλέον, το SpaceWire χρησιμοποιεί κωδικοποίηση Data-Strobe (DS). Αυτό το σχήμα κωδικοποίησης χρησιμοποιεί το σήμα δεδομένων Data και το σήμα Strobe ώστε να ανακτήσει το ρολόι μετάδοσης στον δέκτη εκτελώντας την πράξη XOR ανάμεσα στα δύο σήματα[2]. Η διαφορά στον χρόνο διάδοσης των δύο σημάτων, D και S, δηλαδή η λόξωση ανάμεσα στα δύο σήματα ονομάζεται inter-pair skew (Σχήμα 74). Το inter-pair skew προκαλεί επίσης έγχυση ρευμάτων κοινού τρόπου (common mode) στην εξωτερική θωράκιση, έτσι αναμένεται να συνεισφέρει με δύο επιπλέον παλμούς στο συνολικό ρεύμα στη ρευματική κατανομή - έναν για κάθε άκρο της ζεύξης.



**Σχήμα 74 - Το Inter pair skew ως μηχανισμός δημιουργίας εκπομπών του SpaceWire**

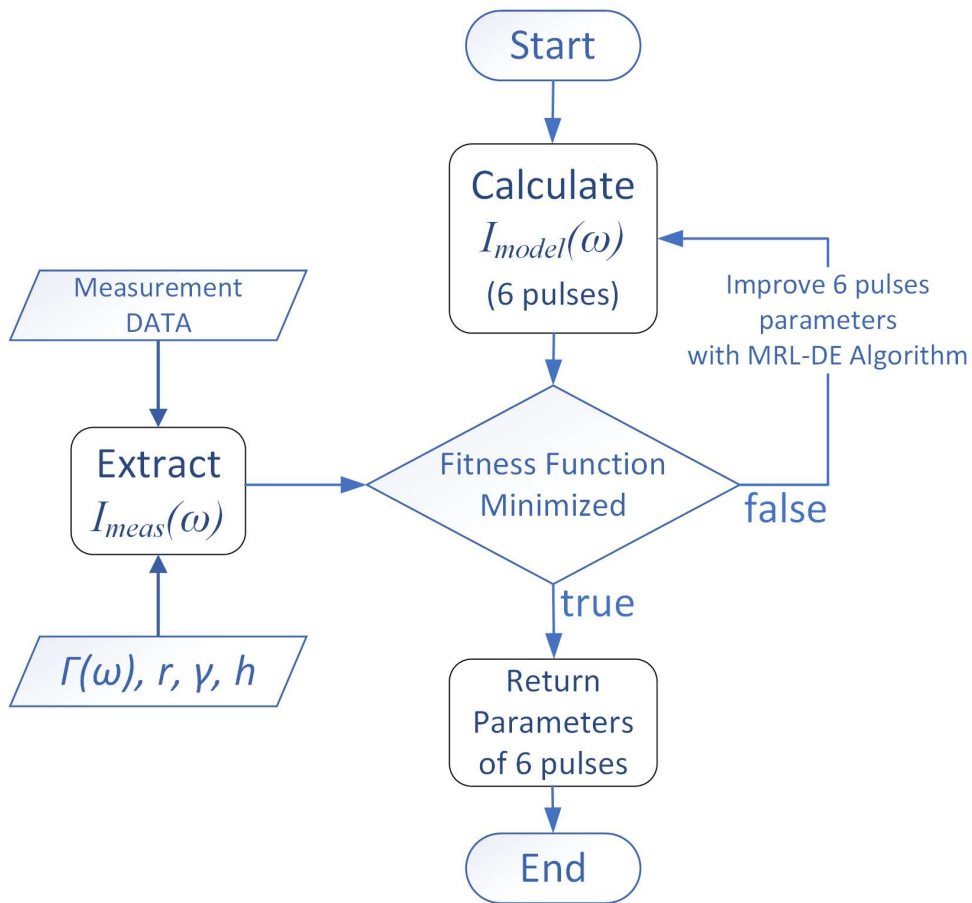
Η συνεισφορά του inter-pair skew δεν λήφθηκε υπόψη στην ανάλυση και μοντελοποίηση του Κεφαλαίου 5 [51], στο οποίο παρουσιάστηκε μόνο το

intra-pair skew. Εκεί, σε αντιδιαστολή με τις μετρήσεις του παρόντος κεφαλαίου, οι μετρήσεις αφορούσαν την προσομοιωμένη ζεύξη SpaceWire με τα PCB στα οποία το στάδιο αποκωδικοποίησης απουσίαζε, οπότε δεν υπήρχε η συνεισφορά του inter-pair skew. Συνολικά λοιπόν η κατανομή ρεύματος επί της θωράκισης θεωρείται ότι συντίθεται από το άθροισμα αυτών των έξι παλμών και στη συνέχεια αποτελεί την πηγή ακτινοβολίας του καλωδίου.

Για τη μοντελοποίηση λοιπόν της λειτουργίας ρυθμού δεδομένων 400 Mbps με μέγεθος payload 2048 bytes, εξάγεται, σύμφωνα με το [44], το φάσμα της κατανομής ρεύματος από την περιβάλλουσα των αποτελεσμάτων της μέτρησης των ακτινοβολούμενων εκπομπών (Σχήμα 73) που θεωρείται ως η πηγή των ακτινοβολούμενων εκπομπών. Το ρεύμα  $I_{meas}(\omega)$ , που αντιστοιχεί στην περιβάλλουσα των μετρήσεων αποτυπώνεται στο Σχήμα 76 και θεωρείται ως το άθροισμα έξι παλμών (4 intra / 2 inter-pair skew). Οι παράμετροι των έξι παλμών καθορίζονται ευρεστικά με τη βοήθεια του αλγορίθμου (Σχήμα 75) μοντελοποίησης που βασίζεται στη διαφορική εξέλιξη [51]. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, δηλαδή οι πέντε παράμετροι (πλάτος -  $A_i$ , χρόνος εμφάνισης -  $t_{p_i}$ , χρόνος ανόδου -  $\tau_{r_i}$ , χρόνος καθόδου -  $\tau_{f_i}$ , διάρκεια  $\tau_i$ ) των έξι παλμών, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 14), συνθέτουν το μοντέλο του ρευματικής κατανομής που αντιπροσωπεύει τη συγκεκριμένη λειτουργία (400 Mbps, 2048 bytes payload). Τα βήματα που ακολουθούνται για την εξαγωγή των παραμέτρων των παλμών αποτυπώνονται στο Σχήμα 75. Σημειώνεται εδώ, ότι σε αντιδιαστολή με το [51] ο χρόνος εμφάνισης των παλμών δεν θεωρείται ίδιος αλλά ως μεταβλητή μιας και αντιπροσωπεύουν διαφορετικά φαινόμενα skew.

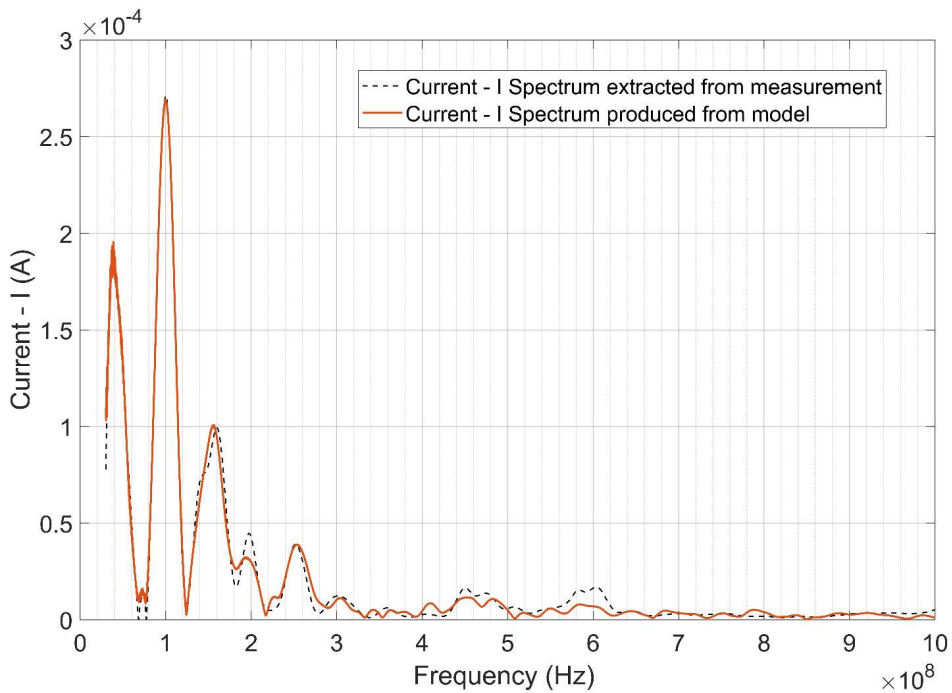
**Πίνακας 14 - Μοντέλο ρεύματος 6 παλμών**

Pulse	Διάρκεια	Χρόνος Ανόδου	Χρόνος Καθόδου	Πλάτος	Χρόνος Εμφάνισης
$i$	$\tau_i$ (s)	$\tau_{r_i}$ (s)	$\tau_{f_i}$ (s)	$A_i$ (A)	$t_{p_i}$ (s)
1	2.73e-8	7.53e-9	5.32e-9	0.2	5e-6
2	0	1.22e-7	1.63e-7	0.21	4.9e-6
3	9.97e-22	2.5e-6	7.3e-8	0.57	5e-6
4	4.35e-11	4.17e-9	9.44e-9	0.47	4.9e-06
5	6.2e-8	2.56e-9	2.03e-8	0.097	5e-6
6	1.06e-9	5.41e-9	9.02e-9	0.59	4.97e-6



**Σχήμα 75 - Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου Μοντελοποίησης με κατανομή ρεύματος αποτελούμενης από έξι παλμούς**

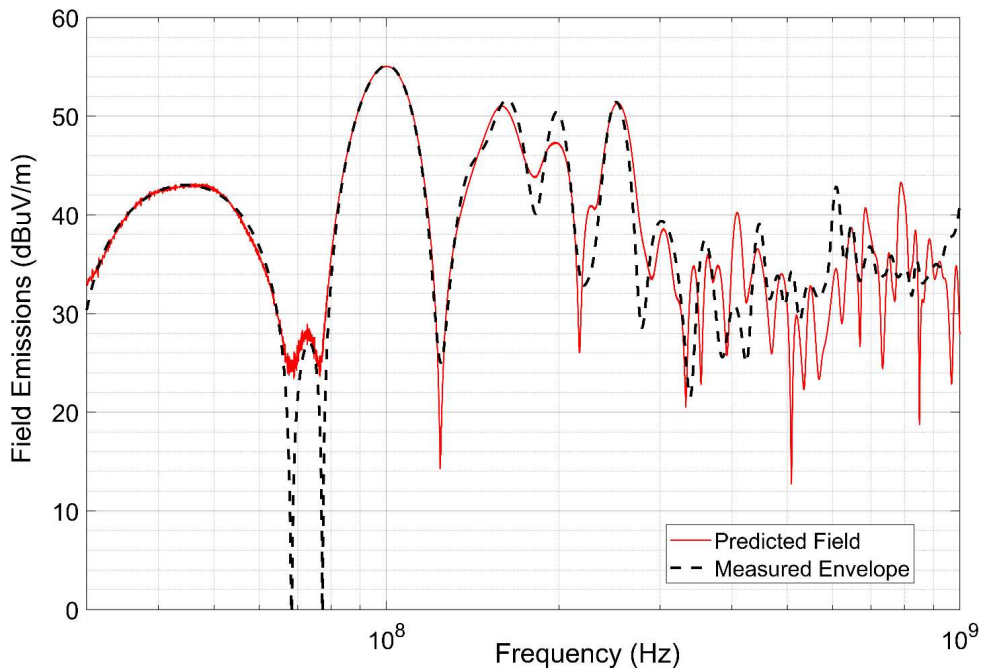
Η κατανομή του ρεύματος που ανασυντίθεται από το συγκεκριμένο μοντέλο φαίνεται επίσης στο Σχήμα 76. Παρατηρείται ότι το ρεύμα  $I_{model}(\omega)$  είναι σε πολύ καλή συμφωνία με το ρεύμα που προέκυψε από την περιβάλλουσα των μετρήσεων. Τελικά, χρησιμοποιώντας την κατανομή ρεύματος του μοντέλου των έξι παλμών μπορεί να γίνει ο υπολογισμός των ακτινοβολούμενων εκπομπών της ζεύξης με τη βοήθεια της εξίσωσης (13) για την κεραία οδεύοντος κύματος και τα συνεισφέροντα φαινόμενα (π.χ. επίδραση επιπέδου γείωσης) [44].



**Σχήμα 76 – Σύγκριση κατανομής ρεύματος από την περιβάλλουσα της μέτρησης και κατανομής ρεύματος από το μοντέλο**

Το Σχήμα 77 αποτυπώνει συγκριτικά τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης για τις ακτινοβολούμενες εκπομπές και την περιβάλλουσα των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος. Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι σε αρκετά καλή συμφωνία με τη μέτρηση. Συγκεκριμένα, στις χαμηλές συχνότητες ( $f \leq 300 \text{ MHz}$ ) υπάρχει απόλυτη συμφωνία. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι τα μέγιστα επίπεδα ακτινοβολούμενων εκπομπών προβλέπονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια, κάτι που είναι πολύ σημαντικό, και συχνά αρκετό, για τις συνήθεις μεθοδολογίες EMC με προσέγγιση δυσμενέστερης περίπτωσης (worst-case approach). Για το υπόλοιπο εύρος συχνοτήτων παρουσιάζονται αποκλίσεις έως  $10 \text{ dB}$ . Συνολικά, σε ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων μέτρησης  $77.68\%$  των τιμών πεδίου βρίσκονται εντός του περιθωρίου των  $6 \text{ dB}$  της διευρυμένης αβεβαιότητας. Οι υπόλοιπες τιμές μπορούν ενδεχομένως να αποδοθούν σε άλλα φαινόμενα ακτινοβολίας, τα οποία δεν έχουν ληφθεί υπόψη στην παρούσα μοντελοποίηση. Οι παράγοντες αυτοί, που δημιουργούν τις υψηλόσυχνες εκπομπές, χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση ώστε να συμπεριληφθούν στο μοντέλο. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν τη δυσμενέστερη περίπτωση λειτουργίας που υποστηρίζεται από τη ζεύξη, τα  $400 \text{ Mbps}$ . Η ακρίβεια της μεθοδολογίας στην παρούσα της μορφή, αν και όχι τέλεια, αναμένεται να αυξηθεί για τους χαμηλότερους, και πιο κοινούς στις

πραγματικές ζεύξεις, ρυθμούς δεδομένων για τους οποίους το φασματικό περιεχόμενο θα περιορίζεται στις χαμηλότερες περιοχές του φάσματος.



Σχήμα 77 - Πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων εκπομπών από το μοντέλο σε σύγκριση με την περιβάλλουσα των αποτελεσμάτων της μέτρησης

## 6.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάστηκε η υλοποίηση της μετρητικής διάταξης για τις μετρήσεις ακτινοβολούμενων εκπομπών μιας πραγματικής πλήρως αμφίδρομης ζεύξης SpaceWire. Η πραγματική διάταξη υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον iSAFT SpaceWire Simulator, ο οποίος και παρουσιάστηκε περιληπτικά, επιτρέποντας την πλήρη υλοποίηση της ζεύξης σε αντίθεση με το σύστημα προσομοίωσης των προηγούμενων κεφαλαίων. Τα σενάρια μέτρησης των ακτινοβολούμενων εκπομπών είναι τα ακρότατα του ρυθμού δεδομένων που υποστηρίζει ο iSAFT, σύμφωνα με το πρότυπο, δηλαδή τα 10 και τα 400 Mbps. Τα μήκη ωφέλιμου φορτίου(payload sizes) που μετρήθηκαν για αυτούς τους δύο ρυθμούς είναι 32 και 2048 bytes και το περιεχόμενο δεδομένων είναι τυχαία bytes. Παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας τη ζεύξης και καθώς και βασικά συμπεράσματα για την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του συστήματος. Επιπλέον, εφαρμόστηκε η τροποποιημένη μεθοδολογία μοντελοποίησης του Κεφαλαίου 5 για την εξαγωγή του μοντέλου της ζεύξης σε λειτουργίας ρυθμού δεδομένων 400 Mbps με μέγεθος payload 2048 bytes. Αφού αναγνωρίστηκε ένας επιπλέον μηχανισμός δημιουργίας ρεύματος επί της θωράκισης σε σχέση με το Κεφάλαιο 5,



χρησιμοποιήθηκαν συνολικά έξι παλμοί για τη σύνθεση του ρεύματος που δημιουργεί τις ακτινοβολούμενες εκπομπές του καλωδίου. Οι τέσσερις παλμοί δημιουργούνται λόγω των φαινομένων intra-pair skew στα τέσσερα διαφορετικά ζεύγη, ενώ οι υπόλοιποι δύο παλμοί οφείλουν την ύπαρξή τους στα φαινόμενα inter-pair skew. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης αποδεικνύουν ότι το μοντέλο περιγράφει με ακρίβεια την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του καλωδίου και παρέχουν μια ασφαλή εκτίμηση τις ακτινοβολούμενες εκπομπές του καλωδίου για σκοπούς ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, καθαρότητας και δοκιμές προ-συμμόρφωσης. Η έλλειψη επαρκούς ακρίβειας του μοντέλου στις υψηλές συχνότητες καταδεικνύει ότι υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί, που συνεισφέρουν στις ακτινοβολούμενες εκπομπές, που δεν έχουν ληφθεί υπόψη στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση και που θα αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης με σκοπό την περαιτέρω βελτίωση της περιγραφής της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς του συστήματος.



# Κεφάλαιο 7

---

## Επίλογος

### 7.1 Ανακεφαλαίωση - Σημεία στα οποία προάγεται η Επιστήμη

Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάστηκε το πρότυπο ECSS-E-ST-50-12C της ευρωπαϊκής συνεργασίας για την τυποποίηση του διαστήματος (ECSS). Συζητήθηκε η σημασία του λόγω της ευρείας χρήσης συσκευών και συστημάτων που το υιοθετούν σε πολλές διαστημικές αποστολές. Δόθηκε μια σύντομη περιγραφή όλων των επίπεδων του και δόθηκε ιδιαίτερη βάση στην παρουσίαση των επίπεδων και των χαρακτηριστικών εκείνων που έχουν άμεση συνάφεια με την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των ζεύξεων SpaceWire υπό το πρίσμα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ατρωσίας, ώστε να αποτελέσει το αναγκαίο τεχνικό-θεωρητικό υπόβαθρο για τη συνέχεια της εργασίας. Επίσης συζητήθηκαν πρακτικές γείωσης και δέσμησης, που ακολουθούνται κατά την κατασκευή διαστημικών σκαφών, καθώς και εναλλακτικά υλικά για το επίπεδο γείωσης.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε ένα σύνολο μετρήσεων μιας προσομοιωμένης, μέσω πρωτοτύπων pcb, ημιαμφίδρομης ζεύξης SpW/LVDS και τα αποτελέσματα αποσαφηνίζουν την επίδραση του μήκους κωδικής λέξης και της ταχύτητας της ζεύξης στα επίπεδα ακτινοβολούμενων εκπομπών και στο φασματικό περιεχόμενο του σήματος επί του καλωδίου. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ξεκάθαρα ότι με την αύξηση του μήκους κωδικής λέξης το πλάτος και η απόσταση των φασματικών συνιστωσών μειώνονται. Επιπλέον, με την αύξηση της ταχύτητας της ζεύξης (συχνότητα παλμών) το πλάτος των ακτινοβολούμενων εκπομπών αυξάνεται. Αυτά τα συμπεράσματα μπορούν να ωφελήσουν τον σχεδιασμό συστημάτων και ειδικά των πολύ ευαίσθητων διαστημικών, καθώς προσφέρουν τρόπους για τη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) σε φασματικές περιοχές ενδιαφέροντος βελτιώνοντας της ευρωστία (robustness) του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία μοντελοποίησης θωρακισμένου καλωδίου. Οι προσομοιώσεις και οι προκαταρκτικές μετρήσεις υποδεικνύουν ότι το μοντέλο που παρουσιάστηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει με σημαντική ακρίβεια τις ακτινοβολούμενες εκπομπές του ηλεκτρικού πεδίου ενός θωρακισμένου καλωδίου, ανεξάρτητα από τον τύπο του, όταν βρίσκεται πάνω από δεδομένο επίπεδο γείωσης. Η περιγραφή αυτή βασίζεται στην αποσύνθεση των συνεισφερόντων φαινομένων. Για την προσαρμογή των ιδιοτήτων του μοντέλου σε συγκεκριμένο ζεύγος καλωδίου - υλικού επιπέδου γείωσης είναι

αναγκαία μια μοναδική τυποποιημένη μέτρηση EMI/EMC, καθιστώντας δυνατή την πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων εκπομπών σε κάθε σχετική θέση πάνω από οποιοδήποτε επίπεδο γείωσης (γνωστών διηλεκτρικών χαρακτηριστικών) χωρίς εκ των προτέρων γνώση των χαρακτηριστικών του καλωδίου. Το μοντέλο αυτό προσφέρει μία ασφαλή εκτίμηση για τα μέγιστα επίπεδα ακτινοβολούμενων εκπομπών σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η παρούσα εργασία μπορεί δυναμικά να συνεισφέρει στην εκτίμηση των εκπομπών του συστήματος υπό κάθε σχήμα σηματοδοσίας, απλοποιώντας με αυτό τον τρόπο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του συστήματος, τόσο σε όρους χωροθέτησης/διάταξης όσο και υλικών γείωσης.

Στο *Κεφάλαιο 4*, η μεθοδολογία του *Κεφαλαίου 3*, εφαρμόζεται και εξετάζεται ως προς τη δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων για την περίπτωση καλωδίου SpaceWire πάνω από επίπεδο γείωσης κατασκευασμένο από CFRP. Η διάταξη αυτή συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον για διαστημικές εφαρμογές, αφού αποτελεί την επιλογή καλωδίωσης και γείωσης στην πλειονότητα των διαστημικών αποστολών. Το SpaceWire παρουσιάζει μια πολύ σύνθετη γεωμετρία και η εξαγωγή των ακτινοβολούμενων εκπομπών του αναλυτικά παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Με τη χρήση της μεθοδολογίας του *Κεφαλαίου 3* και με μια πρότυπη μέτρηση πάνω από επίπεδο γείωσης από αλουμίνιο αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί. Έτσι το καλώδιο χαρακτηρίζεται και μοντελοποιείται. Με το εξαχθέν μοντέλο μπορεί να γίνει εκτίμηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών του καλωδίου για κάθε άλλο υλικό του επιπέδου γείωσης καθώς και σε άλλα σημεία ενδιαφέροντος (μέτρησης). Οι μετρήσεις που παρουσιάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν για να επιβεβαιώσουν την ισχύ της μεθοδολογίας στην περίπτωση επιπέδου γείωσης από CFRP για δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας της ζεύξης. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης είναι σε αρκετά καλή συμφωνία με τις μετρήσεις και καταδεικνύουν τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας σε αρκετά σύνθετα συστήματα.

Στο *Κεφάλαιο 5* παρουσιάστηκε μια τροποποιημένη περιγραφή της κατανομής ρεύματος επί τις θωράκισης του καλωδίου. Η περιγραφή αυτή, βασισμένη στη διαφορική παλμική σηματοδοσία του συστήματος και στο φαινόμενο της λόξωσης που παρουσιάζεται στο σύστημα, χρησιμοποιείται στη μεθοδολογία των προηγούμενων κεφαλαίων για να μοντελοποιηθούν οι ακτινοβολούμενες εκπομπές μια πλήρως αμφίδρομης ζεύξης SpaceWire. Χρησιμοποιούνται τέσσερις παλμοί, ο καθένας για να εκφράσει το in-pair skew καθενός από τα διαφορικά ζεύγη της ζεύξης. Η αναπαράσταση της ρευματικής κατανομής και η φασματική αντιμετώπιση διαφέρουν από τα προηγούμενα, αντί για «συχνότητα-προς-συχνότητα» εξάγεται ένα μοντέλο που περιγράφει ολόκληρη τη φασματική εξάρτηση. Έτσι με χρήση του αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης (MRL-DE) επιλύεται ένα μοναδικό αντίστροφο πρόβλημα αντί για πολλαπλά μονοχρωματικά. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το μοντέλο περιγράφει με ακρίβεια το

φαινόμενο και μπορεί να δώσει ασφαλείς εκτιμήσεις για τις ακτινοβολούμενες εκπομπές του καλωδίου.

Τέλος, στο *Κεφάλαιο 6* παρουσιάστηκε η υλοποίηση της μετρητικής διάταξης για τις μετρήσεις ακτινοβολούμενων εκπομπών μιας πραγματικής πλήρως αμφίδρομης ζεύξης SpaceWire. Η πραγματική διάταξη υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον iSAFT SpaceWire Simulator, επιτρέποντας την πλήρη υλοποίηση της ζεύξης σε αντίθεση με το σύστημα προσομοίωσης των προηγούμενων κεφαλαίων. Τα σενάρια μέτρησης των ακτινοβολούμενων εκπομπών είναι τα ακρότατα του ρυθμού δεδομένων που υποστηρίζει ο iSAFT, σύμφωνα με το πρότυπο, δηλαδή τα 10 και τα 400 Mbps. Τα μήκη ωφέλιμου φορτίου (payload sizes) που μετρήθηκαν για αυτούς τους δύο ρυθμούς είναι 32 και 2048 bytes και το περιεχόμενο δεδομένων είναι τυχαία bytes. Παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας τη ζεύξης και καθώς και βασικά συμπεράσματα για την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του συστήματος. Επιπλέον, εφαρμόστηκε η τροποποιημένη μεθοδολογία μοντελοποίησης του *Κεφαλαίου 5* για την εξαγωγή του μοντέλου της ζεύξης σε λειτουργία ρυθμού δεδομένων 400 Mbps με μέγεθος payload 2048 bytes. Αφού αναγνωρίστηκε ένας επιπλέον μηχανισμός δημιουργίας ρεύματος επί της θωράκισης σε σχέση με το *Κεφάλαιο 5*, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά έξι παλμοί για τη σύνθεση του ρεύματος που δημιουργεί τις ακτινοβολούμενες εκπομπές του καλωδίου. Οι τέσσερις παλμοί δημιουργούνται λόγω των φαινομένων intra-pair skew στα τέσσερα διαφορεικά ζεύγη ενώ οι υπόλοιποι δύο παλμοί οφείλουν την ύπαρξη τους στα φαινόμενα inter-pair skew. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης αποδεικνύουν ότι το μοντέλο περιγράφει με ακρίβεια την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του καλωδίου και παρέχουν μια ασφαλή εκτίμηση των ακτινοβολούμενων εκπομπών του καλωδίου για σκοπούς ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, καθαρότητας και δοκιμές προσυμμόρφωσης. Η έλλειψη ακρίβειας του μοντέλου στις υψηλές συχνότητες καταδεικνύει ότι υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί που συμμετέχουν στις ακτινοβολούμενες εκπομπές και οι οποίοι θα αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης με σκοπό τη βέλτιστη περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς του συστήματος.

## 7.2 Μελλοντική Εργασία

Αναφορικά με τη μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας, αρκετό ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση των παραγόντων που συνεισφέρουν σε υψηλότερες συχνότητες και η κατάλληλη διαμόρφωση της μεθοδολογίας μοντελοποίησης με σκοπό την αυξημένη ακρίβεια της.

Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντίστοιχη εργασία για το φασματικό εύρος από DC έως πολύ χαμηλές συχνότητες για το μαγνητικό πεδίο. Σε αυτό το εύρος δραστηριοποιούνται αρκετές επιστημονικές αποστολές, αλλά δεν υπάρχει καμμία σχετική πληροφορία προς το παρόν για τη συμπεριφορά της ζεύξης.

Σημαντικό βήμα για την πρόβλεψη των εκπομπών θα αποτελέσει η σχεδίαση σε τριδιάστατο πρόγραμμα σχεδίασης της διάταξης με αναλυτική δομή του SpaceWire με σκοπό την αναλυτική full-wave προσομοίωση του.

Πληθώρα πληροφοριών θα προσφέρει και η μέτρηση των αγόμενων (conducted) εκπομπών του συστήματος iSAFT και η συσχέτισή τους με τις μετρούμενες ακτινοβολούμενες εκπομπές (radiated).

Τέλος, μια λεπτομερής προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου των σημάτων SpaceWire και μια πλήρης προσομοίωση μέσω λογισμικού του συστήματος μέτρησης (EMI receiver) ώστε να ταυτοποιηθεί η συμπεριφορά της ρευματικής κατανομής επί της θωράκισης, αλλά ενδεχομένως και του μοντέλου ακτινοβολίας, θα προσέφερε επιπλέον δυνατότητες εκτίμησης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς του συστήματος και θα συντελούσε στον καλύτερο σχεδιασμό των αποστολών.

# Κεφάλαιο 8

---

## Βιβλιογραφία

### 8.1 Αναφορές

- [1] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS- E-50-12A, Space Engineering – SpaceWire- Links, nodes, routers and networks", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, January 2003.
- [2] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS- E-ST-50-12C, Space Engineering – SpaceWire- Links, nodes, routers and networks", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, July 2008.
- [3] ECSS-E50-12A vs ECSS-E-ST-50-12C, what's the difference? | STAR-Dundee. (2017). Star-dundee.com. Retrieved 15 June 2017, from <https://www.star-dundee.com/knowledge-base/ecss-e50-12a-vs-ecss-e-st-50-12c-whats-difference>
- [4] F. Torelli, J. Ilstad and G. Magistrati, "JUICE time distribution protocol: SpaceWire networks and protocols, short paper," 2016 International SpaceWire Conference (SpaceWire), Yokohama, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/SpaceWire.2016.7771626.
- [5] V. Kollias, N. Pogkas, A. Tavoularis and M. Tsagkaropoulos, "Flight equipment validation with iSAFT: The EUCLID Fine Guidance Sensor case," 2014 International SpaceWire Conference (SpaceWire), Athens, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/SpaceWire.2014.6936278.
- [6] M. Hutchinson, L. Griffiths, A. Smith and S. Doody, "The Sentinel-1 radar electronics subsystem development," EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Nuremberg, Germany, 2012, pp. 170-173.
- [7] Directory.eoportal.org. (2020). GAIA - Satellite Missions - eoPortal Directory. [online] Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaia> [Accessed 4 Mar. 2020].
- [8] B. Dean, R. Warren, R., and B. Boyes, "RMAP Over SpaceWire On The ExoMars Rover For Direct Memory Access By Instruments To Mass Memory, short paper," 2008 International SpaceWire Conference (SpaceWire), Nara, 2008, pp. 249-253
- [9] L. Szerdahelyi, S. Fugger, P. Espeillac, G. Monroig, T. Pareaud, & M. Casasco, "The BepiColombo Attitude and Orbit Control System," In 9th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems (GNC 2014), Porto, Portugal.
- [10] A. Roberts, S. G. Dykes, R. Klar and C. C. Mangels, "A Link-Layer Broadcast Service for SpaceWire Networks," 2007 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2007, pp. 1-10, doi: 10.1109/AERO.2007.352902.
- [11] M. Ozaki, T. Takahashi, M. Kokubun, T. Takashima, H. Odaka, M. Nomachi, ... & K. Masukawa, "SpaceWire driven architecture for the ASTRO-H satellite," 2010 International SpaceWire Conference (SpaceWire), 2010 (Vol. 445).

- [12] Spacewire.esa.int. (2016). SpaceWire - Missions. [online] Available at: <http://spacewire.esa.int/content/Missions/Missions.php>
- [13] S. Parkes, C. McClements, D. McLaren, B. Youssef, M. S. Ali, A. F. Florit, & A.G. Villafranca, "SpaceWire and SpaceFibre on the Microsemi RTG4 FPGA," 2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/AERO.2016.7500644.
- [14] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS- E-ST-50-12C Rev.1, Space Engineering – SpaceWire- Links, nodes, routers and networks", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, May 2019
- [15] S. Parkes, "SpaceWire User's Guide". STAR-Dundee Limited, 2012
- [16] Telecommunications Industry Association, "ANSI/TIA/EIA-644:2001 (R2012), Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling (LVDS) Interface Circuits", Arlington, USA, Standards and Technology Department, 2012
- [17] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ESCC Detail Specification No. 3902/003, CABLE, "SPACEWIRE", ROUND, QUAD USING SYMMETRIC CABLES, FLEXIBLE, -200 TO +180 °C", ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, 2014
- [18] Lay Length. Digital image. *Integrated Publishing, Inc.* 10 February 2020, <http://navyaviation.tpub.com/14018/css/Cable-Lay-Length-142.htm>
- [19] A. T Baklezos and N. Capsalis, "SpaceWire: The Standard and EMC/EMI Aspects", In C. Nikolopoulos (Ed.), *Electromagnetic Compatibility for Space Systems Design* (pp. 38-70). Hershey, PA: IGI Global, 2018. doi:10.4018/978-1-5225-5415-8.ch002
- [20] M. Nicoletto, D. Boschetti and P. Savi, "High Speed Digital Lines routed on non-metallic Spacecraft structures," 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Gothenburg, 2014, pp. 785-789, doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6931011.
- [21] M. Leininger, F. Thurecht, E. Pfeiffer and A. Ruddle, "Advanced grounding methods in the presence of carbon fibre reinforced plastic structures," 2012 ESA Workshop on Aerospace EMC, Venice, 2012, pp. 1-6.
- [22] D. Nozadze et al., "Prediction of Worst-Case Radiation Immunity in Cable Harnesses," 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI), Long Beach, CA, 2018, pp. 604-609.
- [23] D. Nozadze, A. Koul, K. Nalla, M. Sapozhnikov and V. Khilkevich, "Effect of time delay skew on differential insertion loss in weak and strong coupled PCB traces," 2017 IEEE 26th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS), San Jose, CA, 2017, pp. 1-3.
- [24] S. Caniggia and P. Santi, "Common-mode radiated emissions from UTP/STP cables with differential high-speed drivers/receivers," 2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.03CH37446), Boston, MA, USA, 2003, pp. 564-569 vol.2.
- [25] B. Cook, & P. Walker, "Reducing Electromagnetic Emissions From SpaceWire," In *DATA Systems in Aerospace (DASIA)*. Naples, 2007
- [26] A. T. Baklezos, C. D. Nikolopoulos, C. N. Capsalis and S. Tsatalas, "Effect of LVDS link speed and pattern length on spectrum measurements of a Spacewire harness," 2017 International Workshop on Antenna Technology: Small



- Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT), Athens, 2017, pp. 38-41, doi: 10.1109/IWAT.2017.7915291.
- [27] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS-E-ST-20-07, C Rev. 1, Space engineering, Electromagnetic compatibility", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, February 2012.
- [28] U.S. Department of Defense, "MIL-STD-461G, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems And Equipment,", 2015.
- [29] K. Enouf and S. Hermant, "Compact, impedance-matched SpaceWire connector development — "MicroMach SpaceWire": SpaceWire components, long paper," 2016 International SpaceWire Conference (SpaceWire), Yokohama, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/SpaceWire.2016.7771640.
- [30] Keysight Technologies, "Reference Guide - Agilent 81130A 400/660 Mhz Pulse/Data Generator. 1st ed.," [ebook] Germany: Agilent Technologies, 2020. Available at: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/81130-91021.pdf>>
- [31] A. T. Baklezos, C. D. Nikolopoulos, A. G. Katsouris, G. I. Koutantos and C. N. Capsalis, "Electromagnetic Emission Modeling in Case of Shielded Cabling With Respect to the Ground Dielectric Properties," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 58, no. 6, pp. 1694-1700, Dec. 2016, doi: 10.1109/TEMC.2016.2588583.
- [32] H. Rebholz and S. Tenbohlen, "A fast radiated emission model for arbitrary cable harness configurations based on measurements and simulations," 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Detroit, MI, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISEMC.2008.4652041.
- [33] G. H. Li, W. Qian, A. Radchenko, G. Hess, R. Hoeckele, P. Jalbert, ... & D. Beetner, "Estimating the radiated emissions from cables attached to a switching power supply in a MIL-STD 461 test," 2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Denver, CO, 2013, pp. 626-631, doi: 10.1109/ISEMC.2013.6670487.
- [34] J. Jia, D. Rinas and S. Frei, "Prediction of radiated fields from cable bundles based on current distribution measurements," International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Rome, 2012, pp. 1-7, doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396759.
- [35] F. Han, "Radiated emission from shielded cables by pigtail effect," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 34, no. 3, pp. 345-348, Aug. 1992, doi: 10.1109/15.155852.
- [36] G. Li, G. Hess, R. Hoeckele, P. Jalbert, V. Khilkevich, T. Van Doren, ... & D. Beetner, "Prediction of radiated emissions from cables with multiple connections to a metal plane," 2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, 2015, pp. 565-568, doi: 10.1109/APEMC.2015.7175314.
- [37] C. R. Paul, "Introduction to electromagnetic compatibility" John Wiley & Sons, 2006.
- [38] J. A. Kong, "Theory of Electromagnetic Waves", Wiley-Interscience, 1975
- [39] A. Balanis, "Antenna theory: analysis and design", John Wiley & Sons, 2012
- [40] IEEE Standard P1597, "Standard for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulation – Part 1, 2.", 2008
- [41] A. P. Duffy, A. J. M. Martin, A. Orlandi, G. Antonini, T. M. Benson and M. S. Woolfson, "Feature selective validation (FSV) for validation of computational

- electromagnetics (CEM). part I-the FSV method," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 48, no. 3, pp. 449-459, Aug. 2006, doi: 10.1109/TEMC.2006.879358.
- [42] A. Orlandi, A. P. Duffy, B. Archambeault, G. Antonini, D. E. Coleby and S. Connor, "Feature selective validation (FSV) for validation of computational electromagnetics (CEM). part II- assessment of FSV performance," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 48, no. 3, pp. 460-467, Aug. 2006, doi: 10.1109/TEMC.2006.879360.
- [43] CENELEC EN 55016-4-2, "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-2: "Uncertainties, statistics and limit modelling – Measurement instrumentation ", 2011
- [44] C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos, Stylianos Tsatalas and C. N. Capsalis, "Verification of Radiated Emissions Model of SpW/LVDS Links Routed with CFRP Ground", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 56, no. 1, pp. 393-402, Feb. 2020. DOI: 10.1109/TAES.2019.2914540I. Karlsson, "Common mode effects in high speed serial links," 2015 IEEE 19th Workshop on Signal and Power Integrity (SPI), Berlin, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/SaPIW.2015.7237394.
- [45] V. Roberge, M. Tarbouchi and G. Labonté, "Fast Genetic Algorithm Path Planner for Fixed-Wing Military UAV Using GPU," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 54, no. 5, pp. 2105-2117, Oct. 2018, doi: 10.1109/TAES.2018.2807558.
- [46] G. Lellouch, A. K. Mishra and M. Inggs, "Design of OFDM radar pulses using genetic algorithm based techniques," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 52, no. 4, pp. 1953-1966, August 2016, doi: 10.1109/TAES.2016.140671.
- [47] M. J. Akhtar, L. Feher, and M. Thumm, "A multi-layered waveguide technique for determining permittivity and conductivity of composite materials," in Proc. German Microw. Conf., Ulm, Germany, Apr. 2005, pp. 37-40.
- [48] M. J. Akhtar, L. Feher, and M. Thumm, "A waveguide-based two-step approach for measuring complex permittivity tensor of uniaxial composite materials," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 5, pp. 2011-2022, May 2006.
- [49] A. P. Duffy, A. Orlandi, and G. Zhang, "Review of the Feature Selective Validation Method (FSV). Part I—Theory," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 4, pp. 814-821, Aug. 2018.
- [50] A. Orlandi, A. P. Duffy, and G. Zhang, "Review of the Feature Selective Validation Method (FSV). Part II—Performance Analysis and Research Fronts," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 4, pp. 1029-1035, Aug. 2018.
- [51] C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos and C. N. Capsalis, "A Novel Approach to Radiated Emissions Modeling of Low Voltage Differential Signal on SpaceWire Cable Employing Differential Evolution," 2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), Rome, Italy, 2019, pp. 1929-1936, doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017308.
- [52] R. Storn and K. Price, "Differential evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces," Berkley, TR-95-012, 1995.

- [53] D. Dawar and S. A. Ludwig, "Differential evolution with dither and annealed scale factor," 2014 IEEE Symposium on Differential Evolution (SDE), Orlando, FL, 2014, pp. 1-8, doi: 10.1109/SDE.2014.7031528.
- [54] P. Kumar and M. Pant, "Enhanced mutation strategy for differential evolution," 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Brisbane, QLD, 2012, pp. 1-6.
- [55] TELETEL S.A., "iSAFT SpaceWire Simulator Operation Manual Version 1.7", Athens, Greece;, March 2018.
- [56] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS- E-50-51C, SpaceWire protocol identification", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, January 2003.
- [57] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS- E-50-52C, SpaceWire – Remote memory access protocol", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, February 2010.
- [58] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS- E-50-53C, SpaceWire – CCSDS packet transfer protocol", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, February 2010.
- [59] A. T. Baklezos, C. D. Nikolopoulos, I.R. Sigalas and C. N. Capsalis, "Measurement and Modeling of SpaceWire Radiation for Electromagnetic Compatibility Assessment," 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Dubrovnik, Croatia, 2020, accepted.

## 8.2 Δημοσιεύσεις του συγγραφέα βασισμένες στη διατριβή

### 8.2.1 Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

- [J1] C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos**, Stylianos Tsatalas and C. N. Capsalis, "Verification of Radiated Emissions Model of SpW/LVDS Links Routed with CFRP Ground", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 56, no. 1, pp. 393-402, Feb. 2020. DOI: 10.1109/TAES.2019.2914540.
- [J2] **A. T. Baklezos**; C. D. Nikolopoulos; A. G. Katsouris; G. I. Koutantos and C. N. Capsalis, "Electromagnetic Emission Modeling in Case of Shielded Cabling with Respect to the Ground Dielectric Properties," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.58, issue: 6, pp.1-7, 2016

### 8.2.2 Συμμετοχή σε κεφάλαια βιβλίων

- [BC1] **A. T Baklezos** & C. N. Capsalis (2018). SpaceWire: The Standard and EMC/EMI Aspects. In C. Nikolopoulos (Ed.), Electromagnetic Compatibility for Space Systems Design (pp. 38-70). Hershey, PA: IGI Global. doi:10.4018/978-1-5225-5415-8.ch002

### 8.2.3 Ανακοινώσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια

- [C1] **A. T. Baklezos**, C. D. Nikolopoulos, I.R. Sigalas and C. N. Capsalis, "Measurement and Modeling of SpaceWire Radiation for Electromagnetic Compatibility Assessment," 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Dubrovnik, Croatia, 2020, accepted.
- [C2] C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos** and C. N. Capsalis, "A Novel Approach to Radiated Emissions Modeling of Low Voltage Differential Signal on SpaceWire Cable Employing Differential Evolution," 2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), Rome, Italy, 2019, pp. 1929-1936, doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017308.
- [C3] **A. T. Baklezos**, C. D. Nikolopoulos, C. N. Capsalis and S. Tsatalas, "Effect of LVDS Link Speed and Pattern Length on Spectrum Measurements of a SpaceWire Harness," IEEE Int. Workshop on Antennas Technology (iWAT), pp. 38-41, Athens, 2017

### 8.2.4 Ανακοινώσεις σε εθνικά επιστημονικά συνέδρια

- [HC1] **A. T. Baklezos**, C. D. Nikolopoulos, C. N. Capsalis and S. Tsatalas, "Η Επίδραση Του Μήκους Κωδικής Λέξης Και Του Ρυθμού Μετάδοσης Πληροφορίας σε Μετρήσεις Εκπεμπόμενης Ακτινοβολίας Καλωδίωσης Τύπου Spacewire", 7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Athens, 11-12 May 2018

## 8.3 Άλλες δημοσιεύσεις του συγγραφέα

### 8.3.1 Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

- [J3] C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos** and C. N. Capsalis, "On Achieving Spacecraft Level Magnetic Cleanliness with Proper Equipment Ordinance of DC and ELF Magnetic Sources", in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020 doi: 10.1109/TEM.C.2020.2992682.
- [J4] G. I. Koutantos, C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos** and C. N. Capsalis, "Proper Equipment Ordinance for Achieving EM Cleanliness in Space Missions: The Case of ELF Electric Sources", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, DOI: 10.1109/TEM.C.2019.2937379.
- [J5] C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos**, N. – A. Livanos and C. N. Capsalis, "UWB Patch Antenna with Composite Dielectric Substrate for Subcutaneous Biomedical Sensing", *International Journal on Communications Antennas and Propagation* Vol.9, No 2, 2018.
- [J6] N. –A. Livanos, S. Hammal, C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos**, C. N. Capsalis, G. Koulouras, I. Vardiambasis, A. Nasiopoulos, S. Kostopoulos, P. Asvestas, D. Cavouras and E. Siores, "Hand-held Device for InDesign and Interdisciplinary Simulations of a Hand-held Device for Internal-Body Temperature Sensing Using Microwave Radiometry", *IEEE Sensors*, vol. 18, no. 6, pp. 2421-2433, 15 March 15, 2018. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2791443
- [J7] **A. T. Baklezos**, C. D. Nikolopoulos, C. N. Capsalis, "An Equivalent Dipole Method with Novel Measurement Positioning for Modeling Electric Emissions in Space Missions," *Electromagnetics*, vol. 37, Issue 7, pp 439-453, 2017. DOI: 10.1080/02726343.2017.1376902
- [J8] **A. T. Baklezos**, C. D. Nikolopoulos, C. N. Capsalis, "A Planar On-Body Antenna System for Cancerous Tumor Detection through Microwave Transmission Sensing," *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 17, issue 1, pp. 231-236, 2017
- [J9] G. I. Koutantos; C. D. Nikolopoulos; **A. T. Baklezos**; C. N. Capsalis, "On the Modeling of ELF Electric Fields for Space Mission Equipment," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol.59, issue: 5, 2017
- [J10] A. G. Katsouris, C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos**, C. N. Capsalis, "A Novel Reconfigurable Antenna array with Controllable tuning and Beam steering," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 58, issue 8, pp. 1782-1786, 2016
- [J11] **A. T. Baklezos**, C. D. Nikolopoulos, A. Katsouris, C. N. Capsalis, "Analysis of Ultra-Wideband Elliptical Monopole with Modified Ground for Applications in Radiometric Measurements," *International Journal on Communications Antennas and Propagation*, IRECAP, vol.5, No 1, 2015
- [J12] C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos** and C. N. Capsalis, "Auto Reconfigurable Patch Antenna for Biomedical Single Channel Multi-Frequency Microwave Radiometry Applications", *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 49, 19-29, 2014

### 8.3.2 Συμμετοχή σε κεφάλαια βιβλίων

- [BC2] C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos**, and C. N. Capsalis, (2016). Reconfigurable Antennas: Theory and Techniques – A Survey. In M. Matin (Ed.), *Wideband*,

Multiband, and Smart Reconfigurable Antennas for Modern Wireless Communications (pp. 203-236). Hershey, PA: Information Science Reference. doi:10.4018/978-1-4666-8645-8.ch007

### 8.3.3 Ανακοινώσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια

- [C4] A. Bechrakis, A. Mavropoulou, C. D. Nikolopoulos, **A.T. Baklezos**, C. N. Capsalis, "EMC Assessment on SpaceWire Link ELF Magnetic Behavior for Modeling Purposes," IEEE International Conference on Applied Mathematics & Computer Science, 2020, (*Accepted- IEEExplore*)
- [C5] E. G. Chatzineofytou, S. T. Spantideas, C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos**, D. Boschetti, I. Marziali, M. Nicoletto, C. N. Capsalis, "Decoupling of Ground Plane on Low Frequency Magnetic and Electric Field Measurements," 2019 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Budapest, 2019.
- [C6] C. N. Capsalis, C. D. Nikolopoulos, S. T. Spantideas, **A. T. Baklezos**, E. G. Chatzineofytou, G. I. Koutantos, D. Boschetti, I. Marziali, M. Nicoletto, S. Tsatalas, Klaus Mehlem, A. Junge, "EMC Assessment for Pre-Verification of THOR Mission Electromagnetic Cleanliness Approach," 2019 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Budapest, 2019.
- [C7] **A. T. Baklezos**, C. D. Nikolopoulos, S. T. Spantideas, E. G. Chatzineofytou, D. Boschetti, I. Marziali, M. Nicoletto, C. N. Capsalis, "Steady State Emissions Modeling of Low Frequency Magnetic and Electric Fields Generated by GOCE CDMU," 2019 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Budapest, 2019.
- [C8] C. D. Nikolopoulos, **A. T. Baklezos**, C. N. Capsalis, "Measuring Transient and Steady State Electromagnetic Emissions of Space Equipment for EMC And Cleanliness Purposes," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018), 2018.