



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

## **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.**

Ελπίδα Γ. Χατζηνεοφύτου

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» (MIS - 5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,  
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Αθήνα, 2019





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ  
ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ  
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΜΕ  
ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.**

Ελπίδα Γ. Χατζηνεοφύτου

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συμβουλευτική Επιτροπή: Χρήστος Καψάλης

Παναγιώτης Κωττής

Γεώργιος Φικιώρης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 3/12/2019

.....

Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Φικιώρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Αθανάσιος Παναγόπουλος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννης Τίγκελης  
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

.....

Δήμητρα Κακλαμάνη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Ματσόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2019

.....  
Ελπίδα Γ. Χατζηνεοφύτου

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

Copyright © Χατζηνεοφύτου Γ. Ελπίδα, 2019

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.



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

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ  
ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ  
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΜΕ  
ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.**

Ελπίδα Γ. Χατζηνεοφύτου

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αθήνα, 2019



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών που έχουν ως στόχο να μελετήσουν και να χαρακτηρίσουν μαγνητικές πηγές με στόχο την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονται αλγόριθμοι για την μελέτη και μοντελοποίηση μαγνητικών πηγών που βρίσκονται εντός του διαστημοπλοίου χρησιμοποιώντας μετρήσεις κοντινού μαγνητικού πεδίου. Οι προτεινόμενες μέθοδοι επαληθεύονται με πραγματικές μετρήσεις από συσκευές που αποτελούν εξοπλισμό διαστημικών σκαφών. Τελικά, τα παραγόμενα ισοδύναμα μαγνητικά μοντέλα είναι ικανά να αναπαράγουν το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν οι μαγνητικές εκπομπές της εξεταζόμενης συσκευής στα σημεία ενδιαφέροντος του διαστημοπλοίου όπου απαιτείται μαγνητική καθαρότητα.

Αρχικά, στο κεφάλαιο 1, αναλύονται οι έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της μαγνητικής καθαρότητας και στη συνέχεια παρουσιάζονται ήδη υπάρχουσες τεχνικές για τη μελέτη και μοντελοποίηση των μαγνητικών πηγών. Έπειτα, στο κεφάλαιο 2, παρατίθεται όλο το μαθηματικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται η παρούσα μελέτη και περιλαμβάνει τους απαραίτητους φυσικούς νόμους και προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται.

Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται το φαινόμενο της μαγνητικής δύναμης που αναπτύσσεται στα πλαίσια διαστημικών αποστολών. Αφού περιγραφεί θεωρητικά πλήρως το φαινόμενο αυτό, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με εικονικές μαγνητικές πηγές θεωρώντας κατάλληλες μαγνητικές ροπές που αντιστοιχούν σε βασικά σενάρια.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 4, εξετάζεται η μαγνητική υπογραφή των συσκευών σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία επεξεργασίας του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου και μοντελοποίησης του με βάση μετρήσεις μαγνητικών εκπομπών κοντινού πεδίου της συσκευής, επεκτείνοντας ήδη υπάρχουσες και επικυρωμένες τεχνικές. Στο τέλος, η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε μαγνητικές μετρήσεις πραγματικού διαστημικού εξοπλισμού.

Στο κεφάλαιο 5, μελετάται η μαγνητική συμπεριφορά συσκευών κατά τη μεταβατική τους λειτουργία. Αρχικά, παρουσιάζεται μια προτεινόμενη προσέγγιση που έχει ως στόχο την παραγωγή ενός ισοδύναμου μοντέλου για τον προσδιορισμό των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των μεταβατικών φαινομένων. Για την περιγραφή ενός μεταβατικού φαινομένου χρησιμοποιούνται δύο τρόποι μοντελοποίησης. Ο ένας τρόπος βασίζεται στην πρόβλεψη ενός μοντέλου τραπεζοειδών παλμών ικανών να αναπαραστήσει τις

μαγνητικές εκπομπές της συσκευής. Ο δεύτερος τρόπος στοχεύει στην εκτίμηση ενός μοντέλου φασματικών ορίων τα οποία περικλείουν το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο, αποτελώντας έτσι μια εκτίμηση των μέγιστων μαγνητικών εκπομπών της εκάστοτε εξεταζόμενης συσκευής. Η αποτελεσματικότητα των δύο αυτών τρόπων μοντελοποίησης επιβεβαιώνεται με τη βοήθεια πραγματικών μετρήσεων συσκευών που χρησιμοποιούνται σε διαστημικές αποστολές.

Ακολουθώς, στο κεφάλαιο 6, εξετάζεται η επαγόμενη μαγνήτιση μαγνητικών πηγών όπως αυτή προκύπτει με την εφαρμογή γνωστού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 εφαρμόζεται και στην περίπτωση της επαγόμενης μαγνήτισης ώστε να προσδιοριστεί ένα μοντέλο κατάλληλο για να περιγράψει τη συμπεριφορά αυτή με τη χρήση μαγνητικών δίπολων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7, παρουσιάζεται η μέθοδος μοντελοποίησης μαγνητικών πηγών η οποία λαμβάνει υπόψιν τη συνεισφορά του επιπέδου γείωσης που δύναται να είναι παρόν κατά τη διάρκεια των μαγνητικών μετρήσεων μιας συσκευής στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων. Γι' αυτόν τον σκοπό, ο αλγόριθμος μοντελοποίησης χρησιμοποιεί τη θεωρία των ειδώλων, ώστε το παραγόμενο μοντέλο δίπολων να είναι αποσυσχετισμένο από τη μετρητική διάταξη. Τελικά, η προτεινόμενη προσέγγιση εφαρμόζεται με επιτυχία σε μαγνητικές μετρήσεις πηγών με γνωστά χαρακτηριστικά.

**Λέξεις κλειδιά:** Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, Μαγνητική Καθαρότητα, Μαγνητική Δύναμη, Μαγνητικό Δίπολο, Χαμηλόσυχνα Μαγνητικά Πεδία, Μεταβατικά Μαγνητικά Πεδία



# Abstract

The present PhD thesis aims at the development of methods and techniques for the study and characterization of magnetic sources in order to achieve magnetic cleanliness in space missions. Specifically, special algorithms are developed for processing and modeling of the magnetic sources that are located inside the spacecraft employing near field magnetic measurements. The suggested techniques are evaluated via real measurements of spacecraft equipment. Finally, the predicted equivalent models are capable of reproducing the measured magnetic field and can be used in order to calculate the magnetic emission of each unit under test at specific points of interest of the spacecraft where magnetic cleanliness is required.

Initially, in chapter 1, the terms of electromagnetic compatibility and magnetic cleanliness are analyzed and existing techniques for the study and modeling procedure of the magnetic sources are then presented. Subsequently, in chapter 2, the mathematical background that this analysis is based on is presented and the necessary physical laws and approximations are also included.

In chapter 3, the generated magnetic force in space missions is analyzed. Firstly, this effect is theoretically thoroughly described and then several simulations are realized with virtual magnetic sources considering appropriate magnetic moments that correspond to basic scenarios.

Moreover, in chapter 4, the magnetic signature of units at steady state operation mode is studied. Specifically, a methodology of processing and modeling of the generated magnetic field from near field magnetic measurements is presented, extending already existing and verified techniques. Finally, the suggested methodology is validated with real magnetic measurements of spacecraft equipment.

In chapter 5, the magnetic signature of devices during its transient mode operation is examined. Initially, a suggested approach that aims at the estimation of an equivalent model is presented by determining the special characteristics of the transient phenomenon. In order to describe the transient effect two modeling procedures are proposed. The first approach is based on the estimation of a small number of pulses that can be used to represent the unit's magnetic emissions. The second modeling procedure aims at the determination of a spectral bounds model that confines the measured magnetic field, thus providing an estimation of maximum possible magnetic emissions of the unit under examination. The effectiveness of both ways of modeling is confirmed via real magnetic measurements of spacecraft devices.

Subsequently, chapter 6 discusses the induced magnetization of magnetic sources that occurs when an external magnetic field with predefined properties is applied. The methodology that presented in chapter 4 can be also implemented in the case of the induced magnetization in order to determine a dipole model suitable to describe the source's magnetic behavior.

Finally, in chapter 7, a method that takes into account the contribution of the ground plane that may be present during a unit's magnetic field measurements at the low frequency spectrum is presented. For this purpose, the image theory is taken into consideration in the modeling procedure in order the determined dipole model to be dissociated from the measuring facility.

**Key words:** Electromagnetic Compatibility, Magnetic Cleanliness, Magnetic Force, Magnetic Dipole, Low-Frequency Magnetic Fields, Transient Magnetic Fields

## Ευχαριστίες

Η διεξαγωγή και η ολοκλήρωση μιας διδακτορικής διατριβής αποτελεί μια σκληρή αλλά και εποικοδομητική εμπειρία. Η παρούσα εργασία αποτελεί καρπό προσωπικού αγώνα αλλά συγχρόνως και συνδρομής και υποστήριξης αρκετών αξιόλογων ανθρώπων, στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διατριβής μου, κ. Χρήστο Καψάλη, Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ. Η ευρεία επιστημονική του γνώση, η ηθική υποστήριξη και η καθοδήγηση που μου προσέφερε υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αλλά και την επιστημονική μου εξέλιξη.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Παναγιώτη Κωττή και τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Φικιώρη για τις σημαντικές συμβουλές και την άμεση ανταπόκριση κάθε φορά που χρειαζόμουν τη βοήθειά τους.

Αισθάνομαι επίσης την ανάγκη να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ προς τους συναδέλφους μου στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του ΕΜΠ για την άψογη συνεργασία μας, τη στήριξη και τη συνεισφορά τους στη βελτίωση των επιστημονικών μου εγχειρημάτων.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους αγαπημένους μου φίλους καθώς χωρίς την αγάπη και την συμπαράσταση τους δεν θα ήταν δυνατή η εκπόνηση και ολοκλήρωση της διατριβής μου.



# Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	25
1.1 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα .....	25
1.2 Μαγνητική καθαρότητα σε διαστημικές αποστολές.....	28
1.3 Επίγειες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου .....	31
1.3.1 Μετρήσεις σε επίπεδο μονάδας .....	31
1.3.2 Μετρήσεις σε επίπεδο συστήματος & διαστημοπλοίου.....	32
1.3.3 Μαγνήτιση και απομαγνήτιση .....	34
1.4 Μοντελοποίηση με μαγνητικά δίπολα.....	36
1.5 Μαγνητικές μετρήσεις στα πλαίσια της παρούσας εργασίας .....	37
1.5.1 Μετρητική διάταξη.....	37
1.5.2 Fluxgate μαγνητόμετρα.....	39
1.5.3 Search coil μαγνητόμετρα.....	40
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ .....	43
2.1 Εισαγωγή.....	43
2.2 Μαγνητική δύναμη.....	43
2.3 Εκτίμηση φασματικής πυκνότητας.....	47
2.4 Τραπεζοειδής παλμός.....	49
2.5 Μαγνητικό δίπολο.....	55
2.6 Αγώγιμο επίπεδο .....	56
3. ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΟΛΩΝ .....	59
3.1 Εισαγωγή.....	59
3.2 Προσομοιωμένες μετρήσεις μαγνητικής δύναμης .....	61
3.2.1 Σύζευξη μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από ημιτονοειδείς μαγνητικές ροπές .....	62
3.2.2 Σύζευξη μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από τις μαγνητικές ροπές που ακολουθούν την Gauss κατανομή.....	64
3.2.3 Σύζευξη μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από ημιτονοειδή μαγνητική ροπή και μαγνητική ροπή που ακολουθεί την Gauss κατανομή.....	65

3.3	Συμπεράσματα .....	66
4.	ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	69
4.1	Εισαγωγή.....	69
4.2	Περιγραφή της μεθόδου .....	70
4.3	Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης .....	72
4.3.1	Μονάδα διατήρησης και διανομής ισχύος (PCDU) .....	73
4.3.2	Μονάδα διαχείρισης εντολών και δεδομένων (CDMU) .....	80
4.4	Συμπεράσματα .....	89
5.	ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	91
5.1	Εισαγωγή.....	91
5.2	Περιγραφή της μεθόδου .....	92
5.3	Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης .....	95
5.3.1	Μοντελοποίηση με χρήση τραπεζοειδών παλμών.....	96
5.3.2	Μοντελοποίηση φασματικών ορίων .....	105
5.3.3	Μοντελοποίηση με μαγνητικά δίπολα .....	112
5.3.4	Συνδυασμός τεχνικών.....	114
5.4	Συμπεράσματα .....	115
6.	ΕΞΕΤΑΣΗ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΟΛΩΝ .....	117
6.1	Εισαγωγή.....	117
6.2	Μετρητική διάταξη & περιγραφή της μεθόδου .....	118
6.3	Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης .....	120
6.3.1	DC επαγόμενα μαγνητικά πεδία .....	120
6.3.2	AC επαγόμενα μαγνητικά πεδία .....	125
6.4	Συμπεράσματα .....	130
7.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΓΩΓΙΜΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ & ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ .....	131
7.1	Εισαγωγή.....	131
7.2	Περιγραφή της μεθόδου .....	132
7.3	Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης .....	132

7.3.1	Μετρητική διάταξη & συσκευή υπό εξέταση .....	133
7.3.2	Αποτελέσματα μοντελοποίησης.....	134
7.4	Συμπεράσματα .....	143
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....	145
8.1	Συμπεράσματα .....	145
8.2	Μελλοντική Εργασία.....	147
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	149





## Ευρετήριο Εικόνων

<i>Εικόνα 1: Οι 4 υποκατηγορίες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [1].</i>	26
<i>Εικόνα 2: Το διαστημόπλοιο GOES-R με εμφανή τον βραχίονα του.</i>	29
<i>Εικόνα 3: Η εγκατάσταση MCF που χρησιμοποιήθηκε για την αποστολή Ulysses (πηγή: European Space Agency).</i>	32
<i>Εικόνα 4: Μαγνητική εγκατάσταση MFSA που χρησιμοποιήθηκε για την αποστολή Rosetta Lander.</i>	33
<i>Εικόνα 5: Εξωτερικό εφαρμοζόμενο πεδίο για τη μαγνήτιση της συσκευής.</i>	35
<i>Εικόνα 6: Εξωτερικό εφαρμοζόμενο πεδίο για την απομαγνήτιση της συσκευής.</i>	36
<i>Εικόνα 7: Διάταξη για την πραγματοποίηση μετρήσεων μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής σε 12 διπλά σημεία.</i>	38
<i>Εικόνα 8: Χαρακτηριστικά του FGM που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στην παρούσα εργασία.</i>	39
<i>Εικόνα 9: Χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς FGM μαγνητόμετρου.</i>	40
<i>Εικόνα 10: Μαγνητόμετρο SCM συνδεδεμένο με το ηλεκτρονικό κουτί.</i>	41
<i>Εικόνα 11: Συνάρτηση μεταφοράς που ανήκει σε SCM.</i>	42
<i>Εικόνα 12: Τραπεζοειδής παλμός στο πεδίο του χρόνου.</i>	49
<i>Εικόνα 13: Περιβάλλουσα του φάσματος ενός τραπεζοειδούς παλμού.</i>	51
<i>Εικόνα 14: Άνω φασματικά όρια τραπεζοειδή παλμού.</i>	52
<i>Εικόνα 15: Φαινόμενο μείωσης της συχνότητας μιας παλμοσειράς με σταθερό κύκλο λειτουργίας.</i>	53
<i>Εικόνα 16: Φαινόμενο μείωσης του κύκλου λειτουργίας με σταθερή τη συχνότητα της παλμοσειράς.</i>	53
<i>Εικόνα 17: Φαινόμενο κωδωνισμού.</i>	54
<i>Εικόνα 18: Μαγνητικά δίπολα πάνω από αγώγιμη επιφάνεια και τα είδωλά τους.</i>	57
<i>Εικόνα 19: Τριγωνικός σχηματισμός των τριών διαστημοπλοίων της αποστολής LISA. Κάθε δορυφόρος φιλοξενεί δυο μάζες δοκιμής.</i>	60
<i>Εικόνα 20: Διάταξη για τη μελέτη της μαγνητικής δύναμης.</i>	62
<i>Εικόνα 21: Συνιστώσα <math> \delta(\mathbf{B1} + \mathbf{B2}) ^2</math> της μαγνητικής δύναμης συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης των μαγνητικών ροπών.</i>	63
<i>Εικόνα 22: ASD της συνιστώσας <math> \delta(\mathbf{B1} + \mathbf{B2}) ^2</math> της μαγνητικής δύναμης συναρτήσει της συχνότητας των μαγνητικών ροπών.</i>	65
<i>Εικόνα 23: Συνιστώσα <math> \delta(\mathbf{B1} + \mathbf{B2}) ^2</math> της μαγνητικής δύναμης συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης της μαγνητικής ροπής.</i>	66
<i>Εικόνα 24: Διάταξη για την πραγματοποίηση μετρήσεων AC μαγνητικού πεδίου του PCDU με Fluxgate Magnetometers (εργαστήριο Thales Alenia).</i>	74
<i>Εικόνα 25: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο του PCDU σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας με Fluxgate Magnetometer-κοντινό (αριστερά) και μακρινό μαγνητόμετρο (δεξιά).</i>	74

<i>Εικόνα 26: Μαγνητικό πεδίο PCDU σε σταθερή λειτουργία έπειτα από τις τεχνικές αποθορυβοποίησης. ....</i>	<i>75</i>
<i>Εικόνα 27: Μαγνητικό πεδίο του PCDU σε σταθερή λειτουργία σε σύγκριση με το προφίλ θορύβου του περιβάλλοντος.....</i>	<i>76</i>
<i>Εικόνα 28: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο (μέτρο) για τη συχνότητα 1260 Hz-PCDU. ....</i>	<i>79</i>
<i>Εικόνα 29: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο (μέτρο) για τη συχνότητα 3200 Hz-PCDU.....</i>	<i>79</i>
<i>Εικόνα 30: SCM μαγνητόμετρα τοποθετημένα σύμφωνα με την τεχνική των δύο μαγνητομέτρων ώστε να καταγράφουν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το CDMU (εργαστήριο Thales Alenia). ....</i>	<i>80</i>
<i>Εικόνα 31: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο του CDMU σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας με Search Coil μαγνητόμετρα-κοντινό (αριστερά) και μακρινό μαγνητόμετρο (δεξιά). ....</i>	<i>81</i>
<i>Εικόνα 32: x- συνιστώσα του ASD του μετρούμενου σήματος -κοντινό μαγνητόμετρο. ....</i>	<i>82</i>
<i>Εικόνα 33: Χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς και φάσης ενός αισθητήρα SCM μέχρι τα 250 KHz μετά από επέκταση του εύρους ζώνης. ...</i>	<i>83</i>
<i>Εικόνα 34: x- συνιστώσα του ASD του μαγνητικού πεδίου μετά την εφαρμογή της συνάρτησης μεταφοράς -κοντινό μαγνητόμετρο. ....</i>	<i>83</i>
<i>Εικόνα 35: Μαγνητικές εκπομπές του CDMU σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου-κοντινό μαγνητόμετρο.....</i>	<i>85</i>
<i>Εικόνα 36: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στα 65 KHz για το CDMU.....</i>	<i>88</i>
<i>Εικόνα 37: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στα 130 KHz για το CDMU.....</i>	<i>88</i>
<i>Εικόνα 38: Διάταξη για την πραγματοποίηση μετρήσεων AC μαγνητικού πεδίου της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας με Fluxgate Magnetometers (εργαστήριο Thales Alenia).....</i>	<i>97</i>
<i>Εικόνα 39: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας σε μεταβατική κατάσταση με Fluxgate Magnetometer-κοντινό (δεξιά) και μακρινό μαγνητόμετρο (αριστερά). ....</i>	<i>97</i>
<i>Εικόνα 40: Μεταβατικό μαγνητικό πεδίο της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας έπειτα από τις τεχνικές επεξεργασίας και αποθορυβοποίησης. ....</i>	<i>98</i>
<i>Εικόνα 41: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας που προκύπτει από τη μοντελοποίηση με τραπεζοειδή παλμό για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.....</i>	<i>100</i>
<i>Εικόνα 42: Μετρούμενο και ανακατασκευασμένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο του χρόνου που προκύπτει από τη μοντελοποίηση με τραπεζοειδή παλμό για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.....</i>	<i>100</i>
<i>Εικόνα 43: Διάταξη για την πραγματοποίηση μετρήσεων AC μαγνητικού πεδίου του Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων με Fluxgate Magnetometers (εργαστήριο Thales Alenia).....</i>	<i>102</i>

<i>Εικόνα 44: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο του Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας με Fluxgate Magnetometer -κοντινό (αριστερά) και μακρινό μαγνητόμετρο (δεξιά).</i>	102
<i>Εικόνα 45: Μεταβατικό μαγνητικό πεδίο του Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων έπειτα από τις τεχνικές αποθορυβοποίησης.</i>	103
<i>Εικόνα 46: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας που προκύπτει από τη μοντελοποίηση με δύο τραπεζοειδείς παλμούς για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.</i>	104
<i>Εικόνα 47: Μετρούμενο και ανακατασκευασμένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο του χρόνου που προκύπτει από τη μοντελοποίηση με δύο τραπεζοειδείς παλμούς για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.</i>	105
<i>Εικόνα 48: Φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και τα εκτιμώμενα φασματικά όρια για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.</i>	107
<i>Εικόνα 49: Φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και τα εκτιμώμενα φασματικά όρια για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.</i>	108
<i>Εικόνα 50: Μετρούμενο σήμα του PCDU σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας με SCM -κοντινό (αριστερά) και μακρινό μαγνητόμετρο (δεξιά).</i>	110
<i>Εικόνα 51: Μετρούμενο σήμα του PCDU σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας με SCM έπειτα από τις τεχνικές αποθορυβοποίησης.</i>	110
<i>Εικόνα 52: Φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και τα εκτιμώμενα φασματικά όρια για το PCDU-<i>x</i> συνιστώσα.</i>	112
<i>Εικόνα 53: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο (μέτρο) της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας σύμφωνα με την MDM τεχνική.</i>	114
<i>Εικόνα 54: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο (μέτρο) που έχει προκύψει από το μοντέλο φασματικών ορίων και το μοντέλο μαγνητικού δίπολου.</i>	115
<i>Εικόνα 55: Στάδια μέτρησης DC επαγόμενης μαγνητικής ροπής.</i>	119
<i>Εικόνα 56: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο καθώς το RF Switch περιστρέφεται.</i>	121
<i>Εικόνα 57: Το μαγνητικό πεδίο όπως προκύπτει έπειτα από αφαίρεση της DC συνιστώσας για τα δύο μαγνητόμετρα.</i>	121
<i>Εικόνα 58: Μαγνητικό πεδίο έπειτα από επεξεργασία και αποθορυβοποίηση.</i>	122
<i>Εικόνα 59: Μοντελοποιημένο και μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο-<i>xy</i> επίπεδο-10 <math>\mu</math>T εξωτερικό πεδίο.</i>	123
<i>Εικόνα 60: Μοντελοποιημένο και μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο-<i>xz</i> επίπεδο-10 <math>\mu</math>T εξωτερικό πεδίο.</i>	124
<i>Εικόνα 61: Μοντελοποιημένο και μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο-<i>yz</i> επίπεδο-10 <math>\mu</math>T εξωτερικό πεδίο.</i>	124
<i>Εικόνα 62: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο υπό την επίδραση εξωτερικού AC μαγνητικού πεδίου.</i>	125

<i>Εικόνα 63: AC επαγόμενο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας έπειτα από επεξεργασία.....</i>	<i>126</i>
<i>Εικόνα 64: AC επαγόμενο μαγνητικό πεδίο σε σύγκριση με το μαγνητικό πεδίο περιβάλλοντος - x- συνιστώσα. ....</i>	<i>127</i>
<i>Εικόνα 65: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό στα 6 διπλά σημεία μέτρησης για το xy επίπεδο και για εξωτερικό πεδίο συχνότητας 100 Hz . .</i>	<i>128</i>
<i>Εικόνα 66: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό στα 6 διπλά σημεία μέτρησης για το xz επίπεδο και για εξωτερικό πεδίο συχνότητας 100 Hz ....</i>	<i>129</i>
<i>Εικόνα 67: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό στα 6 διπλά σημεία μέτρησης για το yz επίπεδο και για εξωτερικό πεδίο συχνότητας 100 Hz ....</i>	<i>129</i>
<i>Εικόνα 68: Μαγνητική πηγή σε εγκατάσταση MCF κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (εργαστήριο Thales Alenia).....</i>	<i>133</i>
<i>Εικόνα 69: Τριγωνική παλμοσειρά σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου.....</i>	<i>135</i>
<i>Εικόνα 70: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο για τα 800 Hz λαμβάνοντας υπόψιν τη θεωρία των ειδώλων. ....</i>	<i>137</i>
<i>Εικόνα 71: Τα μαγνητικά δίπολα που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους μοντελοποίησης του βρόχου ρεύματος.....</i>	<i>138</i>
<i>Εικόνα 72: Διαμορφωμένο ημίτονο σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου.....</i>	<i>139</i>
<i>Εικόνα 73: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο για τα 800 Hz. ....</i>	<i>140</i>
<i>Εικόνα 74: Διαμορφωμένη παλμοσειρά σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου. ....</i>	<i>141</i>
<i>Εικόνα 75: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο για τα 800 Hz. ....</i>	<i>143</i>

## Ευρετήριο Πινάκων

<i>Πίνακας 1: Ευαισθησία του δέκτη SCM σε συνάρτηση με τη συχνότητα. ....</i>	<i>42</i>
<i>Πίνακας 2: Παράμετρος SBW για τα διαφορετικά εύρη ζώνης. ....</i>	<i>75</i>
<i>Πίνακας 3: Εντοπισμένες συχνότητες λειτουργίας του PCDU για 8 dB κατώφλι θορύβου. ....</i>	<i>77</i>
<i>Πίνακας 4: Παράμετροι μοντέλων μαγνητικών δίπολων για κάθε συχνότητα λειτουργίας του PCDU. ....</i>	<i>78</i>
<i>Πίνακας 5: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενων μοντέλων για κάθε συχνότητα λειτουργίας του PCDU. ....</i>	<i>78</i>
<i>Πίνακας 6: Παράμετρος BW για τα διαφορετικά εύρη ζώνης. ....</i>	<i>84</i>
<i>Πίνακας 7: Εντοπισμένες συχνότητες λειτουργίας του CDMU για 8 dB κατώφλι θορύβου. ....</i>	<i>86</i>
<i>Πίνακας 8: Παράμετροι μοντέλων μαγνητικών δίπολων για κάθε συχνότητα λειτουργίας του CDMU. ....</i>	<i>87</i>
<i>Πίνακας 9: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενων μοντέλων για κάθε συχνότητα λειτουργίας του CDMU. ....</i>	<i>87</i>
<i>Πίνακας 10: Παράμετροι μοντέλου με παλμούς για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία. ....</i>	<i>99</i>
<i>Πίνακας 11: Κριτήρια αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου με παλμούς για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία. ....</i>	<i>99</i>
<i>Πίνακας 12: Παράμετροι μοντέλου με παλμούς για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων. ....</i>	<i>103</i>
<i>Πίνακας 13: Κριτήρια αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου με παλμούς για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων. ....</i>	<i>104</i>
<i>Πίνακας 14: Παράμετροι μοντέλου φασματικών ορίων για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία. ....</i>	<i>106</i>
<i>Πίνακας 15: Κριτήριο αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου φασματικών ορίων για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία. ....</i>	<i>106</i>
<i>Πίνακας 16: Παράμετροι μοντέλου φασματικών ορίων για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων. ....</i>	<i>108</i>
<i>Πίνακας 17: Κριτήριο αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου φασματικών ορίων για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων. ....</i>	<i>108</i>
<i>Πίνακας 18: Παράμετροι μοντέλου φασματικών ορίων για το PCDU. ....</i>	<i>111</i>
<i>Πίνακας 19: Κριτήριο αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου φασματικών ορίων για το PCDU. ....</i>	<i>111</i>
<i>Πίνακας 20: Παράμετροι μοντέλου για τη μεταβατική λειτουργία της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας. ....</i>	<i>113</i>
<i>Πίνακας 21: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενου μοντέλου για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία. ....</i>	<i>113</i>
<i>Πίνακας 22: Παράμετροι μοντέλων μαγνητικών δίπολων για την DC επαγόμενη μαγνήτιση του RF Switch για κάθε επίπεδο. ....</i>	<i>123</i>

<i>Πίνακας 23: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενων μοντέλων για την DC επαγόμενη μαγνήτιση του RF Switch για κάθε επίπεδο.....</i>	<i>123</i>
<i>Πίνακας 24: Παράμετροι μοντέλων μαγνητικών δίπολων για την AC επαγόμενη μαγνήτιση του RF Switch. ....</i>	<i>127</i>
<i>Πίνακας 25: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενων μοντέλων για κάθε επίπεδο. ....</i>	<i>128</i>
<i>Πίνακας 26: Μοντέλα ανά συχνότητα για τους δύο τρόπους μοντελοποίησης - τριγωνική παλμοσειρά.....</i>	<i>136</i>
<i>Πίνακας 27: Κριτήρια αξιολόγησης για τα μοντέλα ανά συχνότητα λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία των ειδώλων - τριγωνική παλμοσειρά. ....</i>	<i>136</i>
<i>Πίνακας 28: Μοντέλα ανά συχνότητα - διαμορφωμένο ημίτονο.....</i>	<i>139</i>
<i>Πίνακας 29: Κριτήρια αξιολόγησης για τα μοντέλα ανά συχνότητα- διαμορφωμένο ημίτονο.....</i>	<i>140</i>
<i>Πίνακας 30: Μοντέλα ανά συχνότητα-τετραγωνική παλμοσειρά. ....</i>	<i>142</i>
<i>Πίνακας 31: Κριτήρια αξιολόγησης για τα μοντέλα ανά συχνότητα- τετραγωνική παλμοσειρά. ....</i>	<i>142</i>

## Συντομογραφίες

<b>AC</b>	Alternating Current
<b>ASD</b>	Amplitude Spectral Density
<b>CDMU</b>	Command and Data Management Unit
<b>DC</b>	Direct Current
<b>DE</b>	Differential Evolution
<b>EMC</b>	ElectroMagnetic Compatibility
<b>EMI</b>	ElectroMagnetic Interference
<b>EUT</b>	Equipment Under Test
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FGM</b>	Fluxgate Magnetometers
<b>MCF</b>	Mobile Coil Facility
<b>MDM</b>	Magnetic Dipole Modeling
<b>PCDU</b>	Power Conditioning and Distribution Unit
<b>PSO</b>	Particle Swarm Optimization
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>SCM</b>	Search Coil Magnetometers
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TF</b>	Transfer Function





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

Στόχος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, EMC (ElectroMagnetic Compatibility), είναι να διασφαλιστεί πως ο εξοπλισμός, ο οποίος ανήκει σε ένα σύστημα, μπορεί να λειτουργήσει σωστά μέσα σε αυτό [1]. Μια συσκευή είναι ηλεκτρομαγνητικά συμβατή όταν:

- Δεν προκαλεί παρεμβολή σε άλλη συσκευή.
- Δεν είναι ευαίσθητη σε εκπομπές άλλων συστημάτων.
- Δεν προκαλεί παρεμβολή στον εαυτό της.

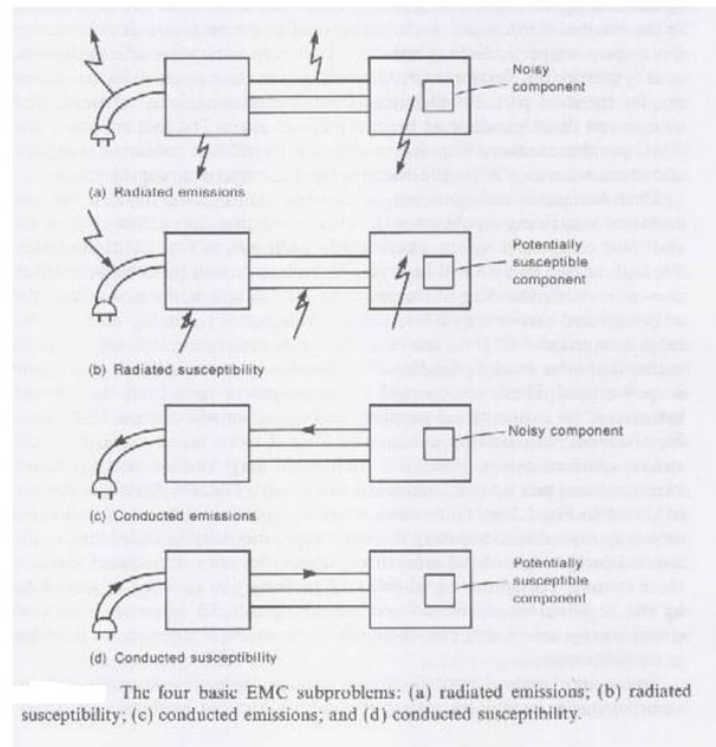
Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ασχολείται με την παραγωγή, τη μετάδοση και τη λήψη της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, μία πηγή (πομπός) παράγει ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και μια ζεύξη μεταφέρει την ενέργεια σε έναν δέκτη όπου υφίσταται επεξεργασία, καταλήγοντας σε επιθυμητή ή ανεπιθύμητη συμπεριφορά. Η παρεμβολή συμβαίνει όταν η λαμβανόμενη ενέργεια προκαλεί στον δέκτη ανεπιθύμητη συμπεριφορά. Η ακούσια μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προκαλεί παρεμβολή μόνο όταν η λαμβανόμενη ενέργεια έχει επαρκές πλάτος και/ή φασματικό περιεχόμενο στην είσοδο του δέκτη που γίνεται αιτία να συμπεριφερθεί με ανεπιθύμητο τρόπο. Η ανεπιθύμητη μετάδοση και λήψη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας δεν είναι απαραίτητα επιβλαβής, καθώς η ανεπιθύμητη συμπεριφορά του δέκτη είναι αυτό που συνιστά την παρεμβολή. Συνεπώς, η επεξεργασία του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη είναι ένα σημαντικό κομμάτι που καθορίζει αν η παρεμβολή θα λάβει χώρα. Για λόγους επίτευξης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι απαραίτητο να μελετηθούν δύο σημαντικοί όροι: η εκπομπή και η ατρωσία.

Ο όρος εκπομπή αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από μία συσκευή, η οποία είναι ικανή να προκαλέσει παρεμβολή στη λειτουργία άλλων συστημάτων. Ο όρος ατρωσία σχετίζεται με την τάση που έχει η λειτουργία μιας συσκευής να επηρεάζεται από ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Υπάρχουν τρεις τρόποι για να αποτραπεί η παρεμβολή και να διαφυλαχθεί η ορθή λειτουργία ενός συστήματος:

- Καταστολή των εκπομπών της πηγής.
- Να γίνει μη αποδοτική η διαδρομή μετάδοσης.

- Να γίνει ο δέκτης λιγότερο ευαίσθητος σε ανεπιθύμητες εκπομπές.

Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που μεταδίδεται μπορεί να χωριστεί σε 4 υποκατηγορίες σχετικά με την πρόληψη της παρεμβολής: ακτινοβολούμενες εκπομπές (radiated emissions), ατρωσία στην ακτινοβολία (radiated susceptibility), επαγόμενες εκπομπές (conducted emissions) και ατρωσία σε επαγόμενες εκπομπές (conducted susceptibility).



Εικόνα 1: Οι 4 υποκατηγορίες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [1].

Ένα τυπικό ηλεκτρονικό σύστημα συνήθως αποτελείται από ένα ή περισσότερα υποσυστήματα που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω καλωδίων. Τα καλώδια αυτά έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν ή/και να συλλέγουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Γενικά, όσο μακρύτερο είναι το καλώδιο τόσο πιο αποδοτικό είναι στην εκπομπή ή συλλογή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα σήματα παρεμβολής μπορούν λοιπόν να περάσουν απευθείας στα υποσυστήματα μέσω των καλωδίων. Αν τα υποσυστήματα βρίσκονται μέσα σε ένα μεταλλικό περίβλημα, τότε μπορούν να επαχθούν ρεύματα πάνω σε αυτό το περίβλημα από “εσωτερικά” ή “εξωτερικά” σήματα. Τα επαγόμενα ρεύματα μπορούν με τη σειρά τους να ακτινοβολήσουν στο εξωτερικό περιβάλλον ή και στο εσωτερικό του περιβλήματος. Έτσι, η χρήση μη μεταλλικών περιβλημάτων γίνεται όλο και πιο συχνή, ειδικά σε συστήματα χαμηλού κόστους.

Οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές μπορούν να προκύψουν από καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος, από μεταλλικό περίβλημα που καλύπτει ένα υποσύστημα, από καλώδιο που συνδέει τα υποσυστήματα καθώς και από στοιχεία υποσυστήματος που βρίσκονται σε μη μεταλλικό περίβλημα, όπως αυτά φαίνονται και στην Εικόνα 1(a). Επιπλέον, τα σήματα που φέρει το καλώδιο του εναλλασσόμενου ρεύματος δεν περιλαμβάνουν μόνο αυτά με συχνότητα 50 Hz, αλλά και αυτά υψηλότερης συχνότητας. Αυτά τα σήματα αλληλοεπιδρούν με τα αντίστοιχα σήματα του εναλλασσόμενου ρεύματος των υποσυστημάτων μέσω συγκεκριμένων ζεύξεων. Από τη στιγμή που τα υψηλότερα ρεύματα εμφανιστούν πάνω στο καλώδιο, θα ακτινοβολούν. Επίσης, το καλώδιο πλέον λειτουργεί ως κεραία και είναι ικανό να συλλέγει ακτινοβολούμενες εκπομπές από άλλα κοντινά ηλεκτρονικά συστήματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1(b). Όταν αυτά τα εξωτερικά σήματα επαχθούν πάνω στα καλώδια, μπορούν να μεταφερθούν σε εσωτερικά στοιχεία των υποσυστημάτων όπου μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές. Συνοψίζοντας, ανεπιθύμητα σήματα μπορούν να ακτινοβοληθούν ή να συλλεχθούν από το καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος, από υπόλοιπα καλώδια διασυνδέσεων, από μεταλλικά περιβλήματα ή από εσωτερικά κυκλώματα των υποσυστημάτων, ακόμα και αν αυτές οι δομές ή τα καλώδια δεν προορίζονται να μεταφέρουν τα σήματα αυτά.

Οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και η ατρωσία σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια δύναται να οφείλονται όχι μόνο σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται μέσω του αέρα αλλά και σε απευθείας επαγωγή σε μεταλλικούς αγωγούς, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1(c) και στην Εικόνα 1(d). Συνήθως, αυτό το μέσο διάδοσης είναι πιο αποδοτικό από τον αέρα. Οι σχεδιαστές ηλεκτρονικών συστημάτων σκόπιμα τοποθετούν φίλτρα στη ζεύξη ώστε να εμποδίσουν την ανεπιθύμητη μετάδοση της ενέργειας.

Όπως έχει περιγραφεί, μία συσκευή είναι απαραίτητο να μην αποτελεί πηγή θορύβου, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει τις υπόλοιπες συσκευές ενός συστήματος. Επίσης, είναι σημαντικό και η ίδια να μη διαταράσσει τη λειτουργία της σε περιπτώσεις εξωτερικών ηλεκτρομαγνητικών πηγών. Με τον όρο θόρυβο ορίζεται κάθε ανεπιθύμητο σήμα που είναι ικανό να επηρεάσει την ορθή λειτουργία του εξοπλισμού. Η παρουσία του θορύβου είναι πολλές φορές υπεύθυνη για την πρόκληση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Ο θόρυβος μπορεί να είναι φυσικός ή τεχνητός. Φυσικός είναι ο θόρυβος που οφείλεται σε φυσικά φαινόμενα, όπως είναι η ηλιακή δραστηριότητα και η κίνηση των φορέων του ηλεκτρικού φορτίου μέσα στο κύκλωμα. Τεχνητός είναι ο θόρυβος που παράγεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως είναι τα διάφορα μηχανήματα. Γίνεται σαφές λοιπόν πως ο θόρυβος δεν μπορεί να απαλειφθεί. Εντούτοις, είναι δυνατό με διάφορες τεχνικές να μειωθεί σε επιτρεπτά επίπεδα ώστε να μη προκαλεί παρεμβολές και να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Το βασικό μέσο, που χρησιμοποιείται για την κατανόηση της επίδρασης της παρεμβολής, είναι ένα μαθηματικό μοντέλο. Ένα τέτοιο μοντέλο ποσοτικοποιεί την κατανόηση του φαινομένου και είναι δυνατό να αναδείξει σημαντικές ιδιότητες αυτού που δεν είναι εξαρχής ιδιαίτερα εμφανείς. Ένα επιπλέον όφελος του μαθηματικού μοντέλου είναι η ικανότητά του να βοηθάει στη διαδικασία σχεδιασμού. Το κριτήριο που καθορίζει αν ένα μοντέλο μπορεί επαρκώς να αναπαραστήσει το φαινόμενο έγκειται στο αν είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει πειραματικά αποτελέσματα [1].

## **1.2 Μαγνητική καθαρότητα σε διαστημικές αποστολές**

Το ενδιαφέρον για την εξερεύνηση του Διαστήματος συνεχώς αυξάνεται κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Πολλές είναι οι αποστολές που έχουν ως στόχο τη μελέτη πλανητών, αστεροειδών αλλά και πλάσματος [2] [4]. Συγκεκριμένα, αρκετές αποστολές έχουν ως σκοπό τη μέτρηση και μελέτη των μαγνητικών πεδίων πλανητών και άστρων, αποτελώντας έτσι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο ώστε να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για τα ουράνια σώματα, που αφορούν τη σύστασή τους, την επιφάνειά τους και την ενδεχόμενη ατμόσφαιρά τους. Οι τιμές αυτών των μαγνητικών πεδίων είναι αρκετά μικρές, της τάξεως των nT, και η μέτρησή τους γίνεται με τα μαγνητόμετρα, που είναι ειδικές ευαίσθητες συσκευές. Είναι λοιπόν φανερό πως η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα είναι απαραίτητη και στην αεροδιαστημική ώστε μια αποστολή να είναι επιτυχής. Η μαγνητική καθαρότητα είναι ουσιαστικά υποκατηγορία της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και έχει ως προϋπόθεση ο μαγνητικός θόρυβος να μην υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή ώστε να μην προκαλούνται παρεμβολές στον εξοπλισμό του αεροσκάφους. Γι' αυτόν τον λόγο, κατά τα πρώτα στάδια σχεδιασμού μιας αποστολής διεξάγονται μελέτες που έχουν ως σκοπό τον υπολογισμό της μαγνητικής παρεμβολής που δημιουργείται από τον εξοπλισμό του αεροσκάφους αλλά και την εύρεση τρόπων για την ελαχιστοποίησή της.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του διαστήματος καθώς και η ακτινοβολία που προέρχεται από τη λειτουργία του εξοπλισμού του διαστημοπλοίου καθιστούν τη μαγνητική καθαρότητα μια πρόκληση για τους επιστήμονες. Η αποτυχία διασφάλισης μαγνητικής καθαρότητας είναι δυνατό να έχει επίπτωση στα συστήματα καταγραφής καθώς και να δημιουργήσει προβλήματα ορθής λειτουργίας σε άλλα σημαντικά συστήματα του διαστημικού σκάφους. Συνεπώς, το μαγνητικό περιβάλλον των διαστημοπλοίων κρίνεται απαραίτητο να είναι καθαρό. Συγκεκριμένα, θα πρέπει το μαγνητικό πεδίο να μην υπερβαίνει τα 0,1 nT στα σημεία ενδιαφέροντος, δηλαδή στα σημεία όπου τοποθετείται ο μετρητικός

εξοπλισμός της αποστολής [5]. Συνήθως, ο μετρητικός εξοπλισμός μιας αποστολής είναι τοποθετημένος εξωτερικά του αεροσκάφους, στην άκρη ενός συμπαγή βραχίονα 6-12 μέτρων. Η θέση αυτή είναι επιλεγμένη ώστε τα μαγνητόμετρα να βρίσκονται επαρκώς μακριά από τις πηγές παρεμβολής, θεωρώντας πως το μαγνητικό πεδίο εξασθενεί σύμφωνα με τον κύβο της απόστασης, όπως το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνητικού δίπολου. Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται ο δορυφόρος GOES-R με εμφανή τον βραχίονα όπου φέρει τα μαγνητόμετρα.



*Εικόνα 2: Το διαστημόπλοιο GOES-R με εμφανή τον βραχίονα του.*

Η μαγνητική καθαρότητα βασίζεται σε δύο πυλώνες. Ο ένας είναι ο έλεγχος των πηγών που παράγουν μαγνητικό πεδίο και ο δεύτερος είναι ο έλεγχος των υλικών τα οποία μπορεί να έχουν μια επαγόμενη μαγνήτιση υπό την παρουσία ενός εφαρμοζόμενου εξωτερικού πεδίου [6]. Οι πιθανές πηγές μαγνητικού πεδίου είναι:

- Η παραμένουσα μαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών υλικών
- Τα ηλεκτρικά ρεύματα

Τα υλικά μπορούν να αλληλεπιδράσουν με το μαγνητικό πεδίο βασικά με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Παραμόρφωση του πεδίου ως προς την κατεύθυνση ή/και το πλάτος
- Δημιουργία δυνάμεων και ροπών

Οι ροπές και οι δυνάμεις δημιουργούνται εάν μαγνητικά υλικά ή καλώδια, που φέρουν ηλεκτρικό ρεύμα, εκτίθενται σε μαγνητικό πεδίο.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να έχουν μόνιμη ή επαγόμενη μαγνήτιση, με την τελευταία να είναι παρούσα μόνο όταν το υλικό εκτίθεται σε εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Όσον αφορά την παραμένουσα μαγνήτιση, ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μπορεί να είναι μαλακό ή σκληρό ανάλογα με την τιμή του συνεκτικού πεδίου, (coercive field) που συμβολίζεται ως  $H_C$  και μετράται σε  $A/m$ , η οποία είναι η ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου που χρειάζεται για να μειωθεί η μαγνήτιση στο μηδέν αφότου έχει οδηγηθεί στον κορεσμό. Αν η παραμένουσα μαγνήτιση είναι σταθερή μέχρι ένα δεδομένο όριο εφαρμοζόμενου πεδίου, το υλικό θεωρείται σκληρό. Εάν ωστόσο η παραμένουσα μαγνήτιση αλλάζει σε επίπεδα κάτω από ένα δεδομένο κατώφλι, το υλικό θεωρείται μαλακό. Το κατώφλι που χρησιμοποιείται κάθε φορά εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Τυπικά το κατώφλι είναι 100μT-300μT για τις εφαρμογές τις οποίες η παρούσα διατριβή μελετά. Στη βιβλιογραφία, το κατώφλι θεωρείται συνήθως ίσο με 100 μT, δηλαδή περίπου το διπλάσιο του μαγνητικού πεδίου της Γης.

Ο έλεγχος των μαγνητικών υλικών περιλαμβάνει:

- Περιορισμό των μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών σε βαθμό που είναι αποδεκτός για μαγνητική καθαριότητα.
- Δημιουργία απαιτήσεων μαγνητικής ροπής σε επίπεδο συσκευής.
- Έλεγχος της δρομολόγησης του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Δημιουργία απαιτήσεων για τη δρομολόγηση ηλεκτρικού ρεύματος με όρους μαγνητικής ροπής ή πεδίου.

Το πρώτο βήμα για την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας σε επίπεδο αεροσκάφους είναι ο εντοπισμός και ο χαρακτηρισμός των μαγνητικών πηγών που είναι δυνατό να προκαλέσουν παρεμβολή. Συγκεκριμένα, κάθε συσκευή, που αποτελεί εξοπλισμό του αεροσκάφους, μελετάται σε ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις ώστε να ελεγχθεί αν πληροί τις προϋποθέσεις σε σχέση με τις μαγνητικές της εκπομπές. Επιπλέον, είναι απαραίτητο η καλωδίωση των συστημάτων να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι σχετικές μαγνητικές εκπομπές. Αυτό επιτυγχάνεται με την τεχνική *twisted pairs* σύμφωνα με την οποία η οδήγηση του ρεύματος να βρίσκεται μαζί με την επιστροφή του ώστε τα μαγνητικά πεδία, τα οποία παράγονται κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, να αλληλοαναιρούνται, αποφεύγοντας έτσι να δημιουργούνται κλειστοί βρόχοι που συμπεριφέρονται σαν μαγνητικά δίπολα. Τέλος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, καίριο ρόλο στη μαγνητική συμπεριφορά ενός διαστημικού σκάφους έχουν τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο εξοπλισμός και το ίδιο το διαστημόπλοιο. Κατά συνέπεια, επιλέγονται μη μαγνητικά υλικά

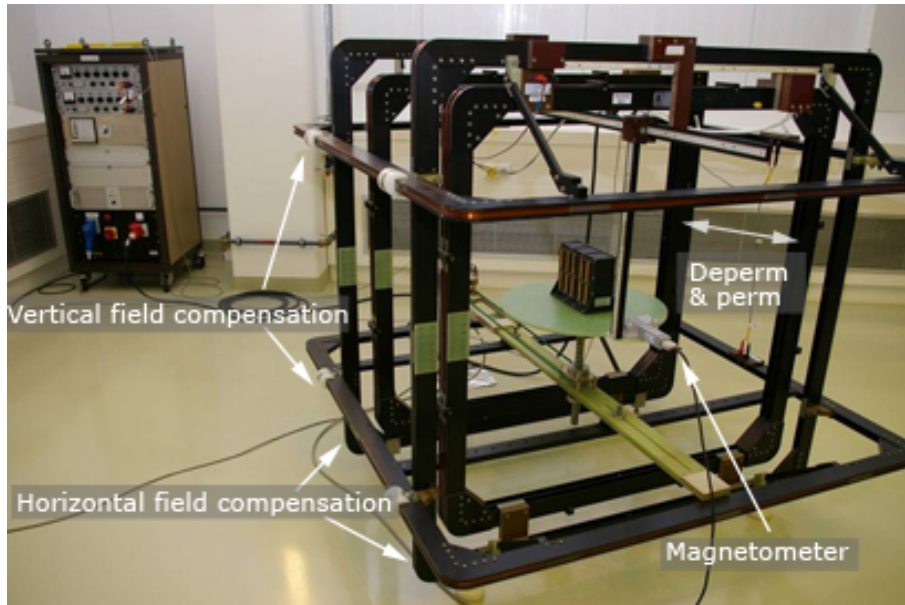
για αυτές τις κατασκευές, στο επίπεδο που αυτό είναι εφικτό, καθώς η χρήση μαγνητικών υλικών δεν μπορεί να αποφευχθεί πλήρως. Τελικός στόχος αυτών των μελετών είναι η τοποθέτηση του εξοπλισμού στο διαστημόπλοιο με τέτοιο τρόπο ώστε το περιβάλλον στις θέσεις των ευαίσθητων μαγνητομέτρων να είναι μαγνητικά καθαρό.

## **1.3 Επίγειες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου**

### **1.3.1 Μετρήσεις σε επίπεδο μονάδας**

Για τη διασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μιας συσκευής, που αποτελεί εξοπλισμό μιας διαστημικής αποστολής, είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες δοκιμές. Οι δοκιμές αυτές γίνονται σε ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις που ονομάζονται Mobile Coil Facility (MCF) [6]. Οι χώροι αυτοί διαθέτουν έναν μικρό αριθμό μαγνητομέτρων και εκτελούν περιστροφικές μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που εκπέμπει μια μαγνητική πηγή ώστε να προσεγγισθεί η μαγνητική της συμπεριφορά. Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τη συσκευή ώστε ο σηματοθορυβικός λόγος (Signal to Noise Ratio-SNR) να είναι υψηλός. Τέτοιου είδους μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά την αρχική φάση σχεδιασμού μιας διαστημικής αποστολής ώστε να διασφαλιστούν ότι πληρούνται οι αυστηρές απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας που τίθενται. Κάθε εγκατάσταση MCF διαθέτει δύο ζεύγη πηνίων Helmholtz τα οποία χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση του πεδίου της Γης (κάθετη και οριζόντια αντιστάθμιση του πεδίου). Επιπλέον, ένα ακόμα ζεύγος πηνίων Helmholtz χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου και άρα για την πρόκληση μαγνητικής ροπής στο εκάστοτε EUT (Equipment Under Test). Στην Εικόνα 3 απεικονίζεται ενδεικτικά η εγκατάσταση MCF που χρησιμοποιήθηκε για την αποστολή Ulysses με σημειωμένα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

Στη συνέχεια, οι τιμές του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου προσαρμόζονται στο μαγνητικό διπολικό μοντέλο (Magnetic Dipole Modeling - MDM) με έναν αλγόριθμο μη γραμμικής μεθόδου βελτιστοποίησης (Gauss-Newton) ή με έναν στοχαστικό. Στόχος είναι ο προσδιορισμός ενός μοντέλου το οποίο περιλαμβάνει έναν μικρό αριθμό μαγνητικών δίπολων και είναι ικανό να αναπαράγει τις DC μαγνητικές μετρήσεις που έγιναν σε επίπεδο μονάδας.



Εικόνα 3: Η εγκατάσταση MCF που χρησιμοποιήθηκε για την αποστολή Ulysses (πηγή: European Space Agency).

### 1.3.2 Μετρήσεις σε επίπεδο συστήματος & διαστημοπλοίου

Τέτοιου είδους μετρήσεις μπορούν να γίνουν και σε επίπεδο υποσυστήματος καθώς και σε επίπεδο διαστημοπλοίου. Όταν μετριέται μια διάταξη που περιλαμβάνει δύο ή περισσότερες συσκευές, τότε ουσιαστικά εξάγονται πληροφορίες όχι μόνο για τη μαγνητική συμπεριφορά της κάθε συσκευής αλλά και για τη μεταξύ τους αλληλοεπίδραση καθώς και την καλωδίωση που τις συνδέει.

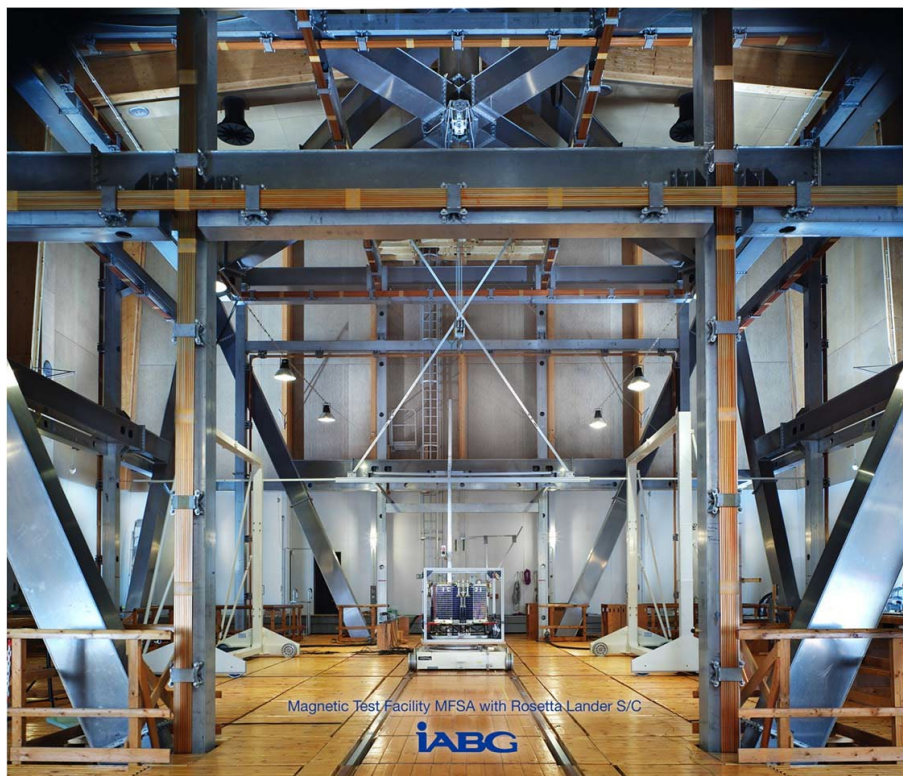
Σε επίπεδο ολόκληρου του διαστημικού σκάφους, οι μαγνητικές μετρήσεις διεξάγονται ώστε να εκτιμηθεί το συνολικό παραγόμενο μαγνητικό πεδίο στα σημεία όπου τοποθετείται ευαίσθητος μετρητικός εξοπλισμός, δηλαδή τα μαγνητόμετρα. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται σε ειδικές εγκαταστάσεις, οι οποίες επιτρέπουν την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου της Γης ώστε να δημιουργηθεί ένας καθαρός μαγνητικά χώρος, όπου μπορούν να εκτελεστούν μαγνητικές μετρήσεις. Η αντιστάθμιση των φυσικών διακυμάνσεων του μαγνητικού πεδίου της Γης επιτυγχάνεται χάρη στο σύστημα κλειστού βρόχου, που υπάρχει σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις, το οποίο ανατροφοδοτείται από ένα εξωτερικό μαγνητόμετρο αναφοράς. Παραδείγματα τέτοιων εγκαταστάσεων στην Ευρώπη είναι το MFSA της IABG στο Ottobrunn και η μαγνητική εγκατάσταση CNES στην Toulouse [6].

Τα μεγέθη αυτών των χώρων ποικίλλουν, αλλά αυτό που έχουν κοινό οι δύο εγκαταστάσεις είναι η χρήση τεσσάρων τετραγωνικών πηνίων ανά άξονα για την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου της Γης επιτρέποντας ταυτόχρονα



και βελτιωμένη ομοιογένεια του μαγνητικού πεδίου. Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η μαγνητική εγκατάσταση MFSA της IAGB, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία μεγάλης ζώνης μηδενικού DC μαγνητικού πεδίου με τις παρακάτω προδιαγραφές:

- Ανάλυση <math><1\text{ nT}</math> στο κέντρο του MFSA
- Ακρίβεια  $\sim 0.3\text{ nT}$
- Ομοιομορφία  $6\text{ nT}$  σε διάμετρο  $4\text{ m}$  (μέγιστη απόκλιση από την κεντρική τιμή)
- Σταθερότητα καλύτερη από  $0.5\text{ nT/h}$



*Εικόνα 4: Μαγνητική εγκατάσταση MFSA που χρησιμοποιήθηκε για την αποστολή Rosetta Lander.*

Οι κύριες λειτουργίες που μπορούν να εκτελεστούν με αυτή την εγκατάσταση είναι οι εξής:

- Προσδιορισμός μόνιμης/επαγόμενης μαγνητικής ροπής δορυφόρων και υποσυστημάτων
- Προσομοίωση του μαγνητικού περιβάλλοντος ενός περιστρεφόμενου αεροσκάφους
- Βαθμονόμηση μαγνητομέτρων που τοποθετούνται σε διαστημόπλοια

- Μαγνήτιση και απομαγνήτιση (με τα λευκά πηνία που είναι εμφανή στην Εικόνα 4)
- Η περιστρεφόμενη τράπεζα μπορεί να αντέξει βάρος 1500 kg.

Όπως και στην περίπτωση των μετρήσεων σε επίπεδο μονάδας, έτσι και στις μετρήσεις σε επίπεδο διαστημοπλοίου αιώτερος στόχος είναι η εξαγωγή ενός ισοδύναμου μοντέλου που μπορεί να παράγει σε ορισμένη απόσταση το ίδιο μαγνητικό πεδίο με το διαστημόπλοιο. Αυτό το μοντέλο στη συνέχεια δύναται να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στις θέσεις του ευαίσθητου εξοπλισμού, όπως είναι τα μαγνητόμετρα και να συγκριθεί εν τέλει με τις απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας που θέτει η εκάστοτε διαστημική αποστολή.

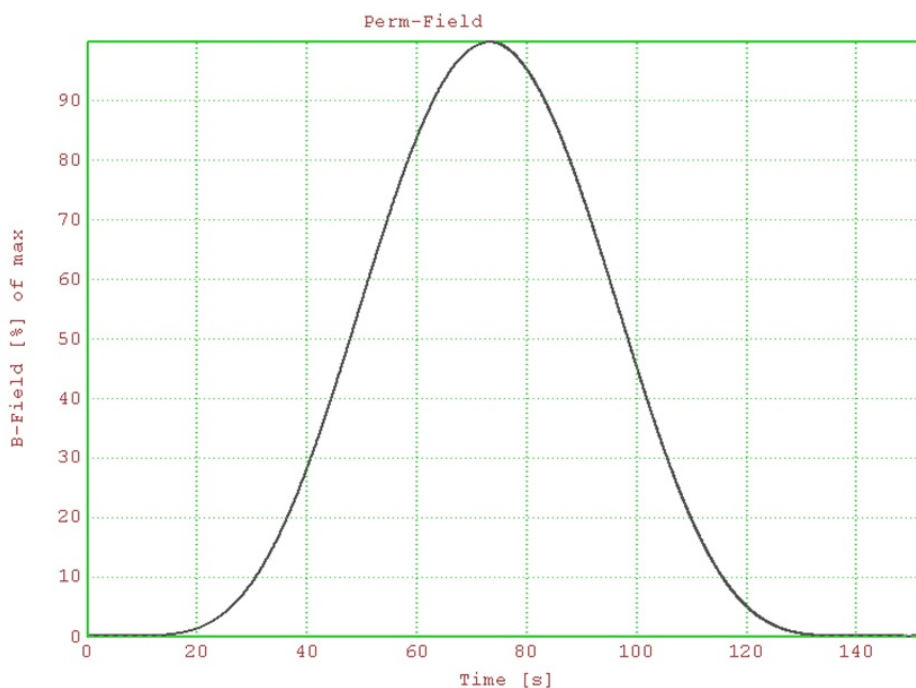
Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, το διαστημόπλοιο τοποθετείται στο κέντρο της εγκατάστασης και συνεπώς κατά το μέγιστο βαθμό στην περιοχή μαγνητικής καθαρότητας (στην περιοχή αυτή το μαγνητικό πεδίο περιβάλλοντος είναι μηδενικό). Καθώς το διαστημόπλοιο περιστρέφεται, τα μαγνητόμετρα της εγκατάστασης καταγράφουν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται. Τα μαγνητόμετρα αυτά επιλέγονται να τοποθετηθούν σε θέσεις όπου επιτυγχάνεται υψηλός σηματοθορυβικός λόγος. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί και για τους τρεις άξονες ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια.

Οι DC τιμές μαγνητικού πεδίου, που προκύπτουν κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε έναν αλγόριθμο μοντελοποίησης ώστε να εκτιμηθούν οι θέσεις και οι μαγνητικές ροπές των ισοδύναμων μαγνητικών δίπολων [33]. Το πεδίο που παράγεται από τα μαγνητικά δίπολα είναι όμοιο με το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το διαστημόπλοιο στα σημεία μέτρησης. Τα ισοδύναμα μαγνητικά δίπολα επιτρέπουν τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Έτσι, το προκύπτον μαγνητικό πεδίο στη θέση του ευαίσθητου εξοπλισμού μπορεί να συγκριθεί με τις απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας. Αυτή η προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε αρκετές αποστολές, όπως είναι οι Ulysses, Giotto, Cluster κ.α..

### **1.3.3 Μαγνήτιση και απομαγνήτιση**

Οι εγκαταστάσεις MCF ή άλλες μεγάλες μαγνητικές εγκαταστάσεις έχουν επίσης τη δυνατότητα να ελέγχουν τη μαγνητική σταθερότητα μιας συσκευής, αν είναι δηλαδή ικανή να μαγνητισθεί [6]. Συνήθως η μέγιστη τιμή του εξωτερικού πεδίου που χρησιμοποιείται για τη μαγνήτιση είναι περίπου 300 nT, καθώς σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος σπάνια ανιχνεύονται μεγαλύτερες τιμές. Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται το προφίλ του εξωτερικού

πεδίου που εφαρμόζεται στις εγκαταστάσεις αυτές. Τα επίπεδα του μαγνητικού πεδίου μαγνήτισης συνήθως είναι 100 pT, 200 pT και 300 pT και η διάρκεια εφαρμογής είναι 2 sec.



Εικόνα 5: Εξωτερικό εφαρμοζόμενο πεδίο για τη μαγνήτιση της συσκευής.

Σκοπός του εξομαλυμένου προφίλ εξωτερικού πεδίου είναι να αποφευχθεί η έκθεση της συσκευής σε βηματικό πεδίο κάτι που καθιστά ανεπιτυχή οποιαδήποτε περαιτέρω επιχείρηση για να απομαγνητισθεί. Επιπλέον, στην Εικόνα 6 απεικονίζεται το προφίλ του μεταβαλλόμενου AC μαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιείται για την απομαγνήτιση της εξεταζόμενης συσκευής.

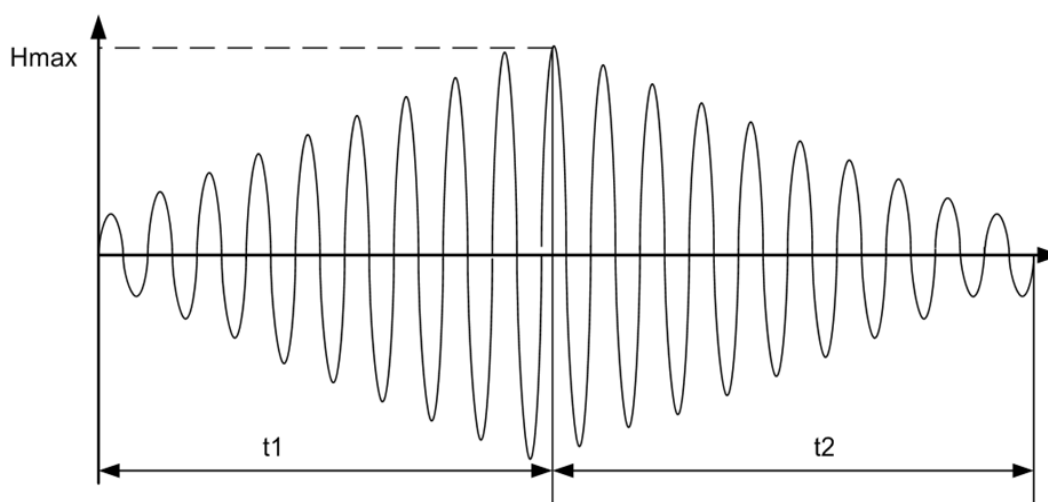
Οι παράμετροι για το πεδίο απομαγνήτισης είναι:

- Διάρκεια  $t_1 > 200 s$
- Διάρκεια  $t_2 > 400 s$
- Η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H_{max} = 3980 A/m$
- Συχνότητα 3 Hz έως 4 Hz
- Αύξηση: 2% ανά κύκλο
- Μείωση: 1% ανά κύκλο

Η συχνότητα επιλέγεται με βάση τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Αποφυγή των δινορευμάτων
- Επαρκώς προοδευτική αύξηση και μείωση του πεδίου απομαγνήτισης
- Συνολικός χρόνος

Χρειάζεται να σημειωθεί πως μονάδες που περιλαμβάνουν μια σημαντική ποσότητα μαλακών μαγνητικών υλικών, όπως μπαταρίες για παράδειγμα, μπορούν να έχουν μια μαγνητική ροπή που μειώνεται δραματικά μετά τη διαδικασία της απομαγνήτισης.



Εικόνα 6: Εξωτερικό εφαρμοζόμενο πεδίο για την απομαγνήτιση της συσκευής.

## 1.4 Μοντελοποίηση με μαγνητικά δίπολα

Η μέθοδος, που έχει πλέον καθιερωθεί για τη μοντελοποίηση DC μαγνητικών πεδίων, είναι η MDM, η οποία αναπτύχθηκε από τον Klaus Mehlem [7]. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι ένα DC μαγνητικό πεδίο μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα πεπερασμένο σύνολο μαγνητικών δίπολων επιλύοντας έτσι ένα πρόβλημα που ανήκει στην κατηγορία των αντίστροφων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται μετρήσεις του σταθερού μαγνητικού πεδίου που παράγεται από μια συσκευή με βάση τις οποίες εξάγεται ένα μοντέλο το οποίο αποτελείται από έναν μικρό αριθμό μαγνητικών δίπολων, που είναι ικανό να αναπαράγει το μαγνητικό πεδίο στα σημεία που μετρήθηκε [18] [19]. Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου μοντέλου, οι μαγνητικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε έναν αλγόριθμο ώστε να προσδιορισθούν οι θέσεις  $x, y, z$  και οι μαγνητικές ροπές  $m_x, m_y, m_z$  των ισοδύναμων μαγνητικών δίπολων που αποτελούν το μοντέλο. Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται λοιπόν χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις κοντινού μαγνητικού πεδίου που παράγεται από την εξεταζόμενη συσκευή και εφαρμόζοντας είτε ντετερμινιστικές ή στοχαστικές μεθόδους.

Ο αριθμός των μαγνητικών δίπολων επιλέγεται από τον χρήστη και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ποιότητα της μοντελοποίησης, δηλαδή τον

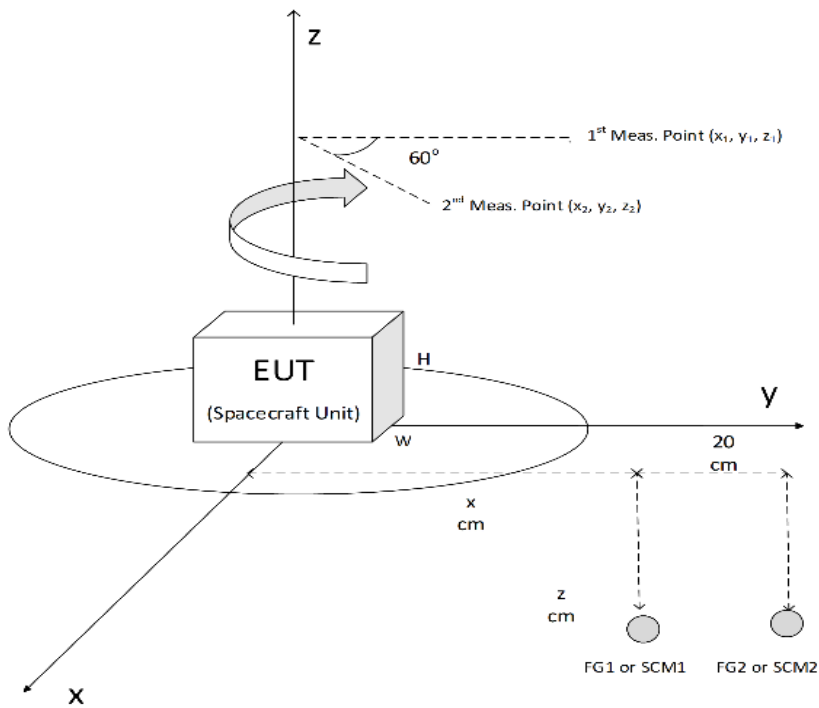
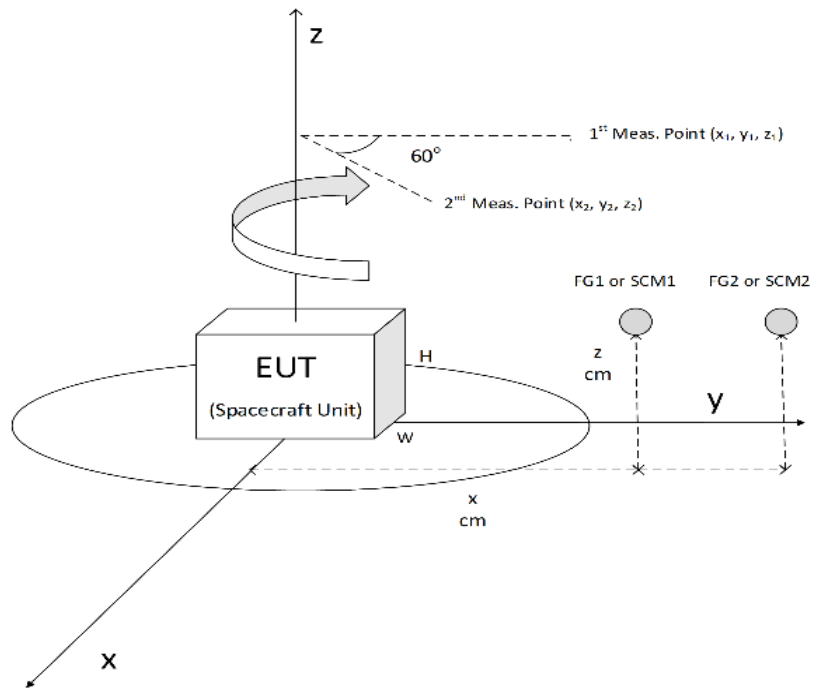
βαθμό που το μετρούμενο και το μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο συμφωνούν, θεωρώντας όμως δεδομένο πως η διαδικασία αυτή αφορά το μακρινό πεδίο. Τελικά, το παραγόμενο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου σε σημεία ενδιαφέροντος, όπως είναι οι θέσεις των μαγνητόμετρων. Έτσι, είναι δυνατή η σύγκριση του συνολικού μαγνητικού πεδίου με τις απαιτήσεις της μαγνητικής καθαρότητας σε αυτά τα σημεία.

Αφού εξαχθούν τα μοντέλα για τις συσκευές που βρίσκονται μέσα στο διαστημόπλοιο, είναι δυνατή η εκτίμηση του συνολικού μαγνητικού πεδίου σε επίπεδο συστήματος στα σημεία ενδιαφέροντος, δηλαδή στις θέσεις όπου είναι τοποθετημένος ευαίσθητος εξοπλισμός. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες κατά την αρχική φάση σχεδίασης της αποστολής, είναι δυνατή η τοποθέτηση του εξοπλισμού σε τέτοια σημεία ώστε να ελαχιστοποιείται η μαγνητική παρεμβολή στις θέσεις του ευαίσθητου εξοπλισμού, όπως είναι τα μαγνητόμετρα.

## **1.5 Μαγνητικές μετρήσεις στα πλαίσια της παρούσας εργασίας**

### **1.5.1 Μετρητική διάταξη**

Σύμφωνα με την προτεινόμενη τεχνική, οι μετρήσεις μαγνητικού πεδίου θεωρείται ότι γίνονται στο πεδίο του χρόνου και εκτελούνται από δύο μαγνητόμετρα, τα οποία βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Η εκάστοτε εξεταζόμενη συσκευή βρίσκεται πάνω σε ένα περιστρεφόμενο τραπέζι και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται καθώς η εξεταζόμενη συσκευή περιστρέφεται ανά 60°. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε δύο επίπεδα, πάνω και κάτω από το περιστρεφόμενο τραπέζι. Οι έξι γωνίες περιστροφής της συσκευής ισοδυναμούν με 12 σημεία μέτρησης που σχηματίζουν δύο κύκλους λόγω των δύο επιπέδων. Συνεπώς, η μετρητική διάταξη αποτελείται από 12 διπλά σημεία παρατήρησης, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της μοντελοποίησης. Τα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης διάταξης των μετρήσεων συνοψίζονται στην Εικόνα 7. Η προτεινόμενη διάταξη προέκυψε ύστερα από προσομοιώσεις, όπου κρίθηκε πως ο συγκεκριμένος αριθμός σημείων παρατήρησης είναι επαρκής ώστε να εξαχθεί αργότερα ένα κατάλληλο μοντέλο.



*Εικόνα 7: Διάταξη για την πραγματοποίηση μετρήσεων μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής σε 12 διπλά σημεία.*

Τα μαγνητόμετρα, που πραγματοποιούν τις μαγνητικές μετρήσεις, βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τη μετρούμενη συσκευή ώστε να διασφαλιστεί

υψηλός σηματοθορυβικός λόγος SNR. Εντούτοις, τα μαγνητόμετρα δεν μπορούν να τοποθετηθούν πολύ κοντά στη συσκευή καθώς θα συμβεί κορεσμός τους. Επίσης, η απόσταση του μετρητικού εξοπλισμού σχετίζεται και με τη συμπεριφορά του μαγνητικού πεδίου που παράγεται καθώς είναι επιθυμητό να μπορεί να προσεγγιστεί με τον κυβικό νόμο της απόστασης του δίπολου. Συνεπώς, οι αποστάσεις που συνήθως επιλέγονται είναι 3-5 φορές τη μέγιστη διάσταση της συσκευής που μελετάται [8]. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για τη διεξαγωγή αυτών των μετρήσεων η καλωδίωση είναι θωρακισμένη και η οδήγηση του ρεύματος βρίσκεται μαζί με την επιστροφή του (twisted pairs) ώστε οι μαγνητικές εκπομπές των αγωγών ρεύματος να είναι ελαχιστοποιημένες. Για την παρούσα μετρική διάταξη χρησιμοποιούνται μαγνητόμετρα τύπου Fluxgate και τύπου Search Coils, των οποίων τα χαρακτηριστικά αναλύονται παρακάτω.

### 1.5.2 Fluxgate μαγνητόμετρα

Property	DM-060	DM-050	DM-020	DM-005
Sample rate	0.1 Hz – 10 kHz in 1,2,5,10 pattern			
Digital Filter	0 dB @ DC – $f_c/3$ , <-120 dB @ $\geq f_c/2$			
Max. Bandwidth	4 kHz	500 Hz	1 kHz	3 kHz
Offset error (25 °C)	< 10 nT	< 5 nT		
Offset drift (25 °C)	< 0.5 nT/°C			
Scaling error (25 °C)	< 0.05 %			
Scaling drift (25 °C)	< 5 ppm/°C	< 15 ppm/°C	<20 ppm	
Orthogonality error	< 0.01°			
Isogeometric error <sup>2</sup>	< 8 mm	< 1 mm	14 mm	
Housing alignment error	Longitudinal axis: < 1°	Longitudinal axis: < 1°		Longitudinal axis: < 1°
Power consumption	< 3 W	< 2 W		< 3W
Max. cable length	30 m with notebook   300 m with Coax Ethernet   >300 on request			
Interfaces	PCMCIA	Coax-Ethernet Hub		MinEthernet
Degree of protection	IP65 , IP68 on request / underwater tight, depth on request			
Temperature Range	-5°C to..50° C			
Diameter ./ Length [mm]	63 ./ 300	48 ./ 150	48 ./ 150	25 ./ 200
Sensor weight	1.4 kg	0.3 kg	0.3 kg	1.2 kg

*Εικόνα 8: Χαρακτηριστικά του FGM που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στην παρούσα εργασία.*

Τα μαγνητόμετρα τύπου Fluxgate, τα οποία χρησιμοποιούνται στη διάταξη που περιγράφηκε, είναι προϊόντα της εταιρείας Bartington και το μοντέλο είναι το MD-005. Οι προδιαγραφές του μοντέλου αυτού βρίσκονται στην Εικόνα 8 και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 10 KHz. Επιπλέον, στην Εικόνα 9 απεικονίζεται η χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς ενός FGM μαγνητόμετρου. Είναι φανερό πως το φάσμα περιέχει πληροφορία μέχρι τα 4.5 KHz περίπου, καθώς η συνάρτηση μεταφοράς κόβει τις συχνότητες άνω των 5 KHz λειτουργώντας ως βαθυπερατό φίλτρο.

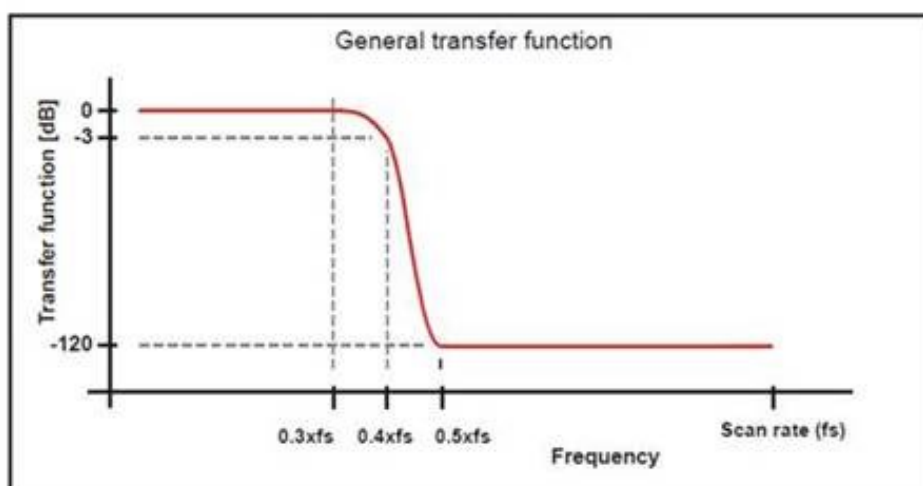


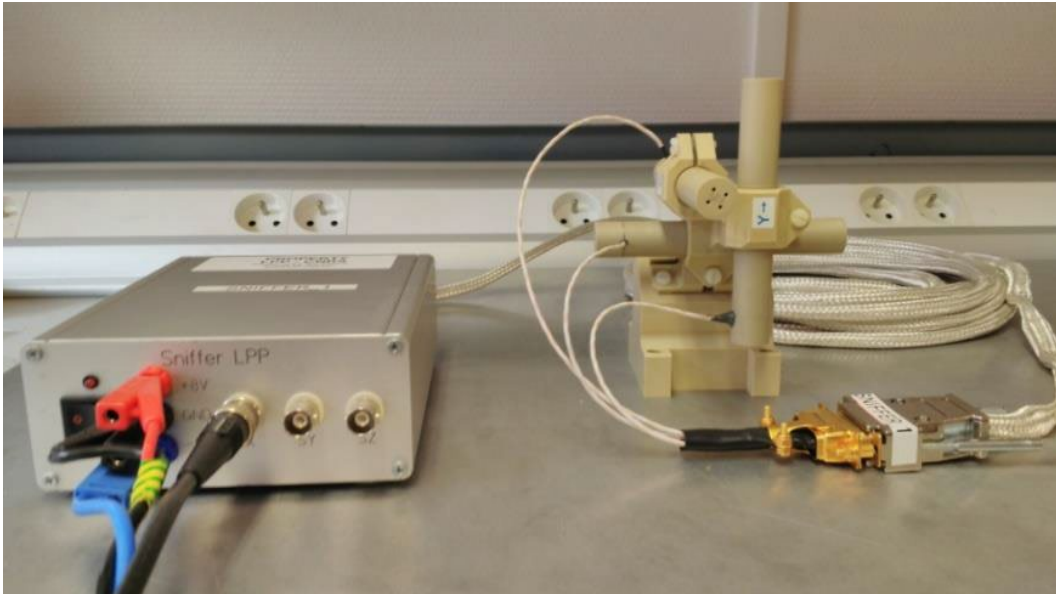
Fig. 1. The bandwidth of the measured signal relative to the selected data rate.

Εικόνα 9: Χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς FGM μαγνητόμετρου.

### 1.5.3 Search coil μαγνητόμετρα

Τα SCM μαγνητόμετρα τα οποία χρησιμοποιούνται για τις μαγνητικές μετρήσεις, που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, παράγονται από την εταιρεία Laboratoire de Physique des Plasmas - LPP [9]. Το μαγνητόμετρο αυτό είναι εξοπλισμένο με ένα ηλεκτρονικό κουτί που έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται τα λαμβανόμενα δεδομένα και να εφαρμόζει απευθείας ένα ψηφιακό φίλτρο που απορρίπτει τις συχνότητες των 50 KHz, 150 KHz και 250 KHz. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να μετρά στο πεδίο του χρόνου και τις τρεις συνιστώσες του εκάστοτε μαγνητικού πεδίου καθώς αποτελείται από τρεις ορθογωνικούς αισθητήρες επαγωγής. Στην Εικόνα 10 απεικονίζεται το μαγνητόμετρο SCM μαζί με το ηλεκτρονικό κουτί.





Εικόνα 10: Μαγνητόμετρο SCM συνδεδεμένο με το ηλεκτρονικό κουτί.

Το συγκεκριμένο SCM έχει τη δυνατότητα μέτρησης του πεδίου στον χρόνο και στις τρεις συνιστώσες. Συγκεκριμένα, το παρόν μαγνητόμετρο προσφέρει μη βαθμονομημένη αναλογική τάση. Είναι σημαντικό το μετρούμενο σήμα να διατηρείται σε επίπεδα ανάμεσα στα  $\pm 2V$  ώστε να διασφαλιστεί η γραμμικότητα σε όλο το εύρος ζώνης στη διάρκεια της μέτρησης. Οι παλμογράφοι που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν ελάχιστο ρυθμό δειγματοληψίας  $500 \text{ ksamples/second}$  (συχνότητα δειγματοληψίας  $500 \text{ KHz}$ ) και να καταγραφουν το πεδίο για  $20 \text{ sec}$ .

Σε κάθε μετρούμενο σήμα χρειάζεται να εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός Fourier ώστε να βαθμονομηθεί και να αντιστοιχηθεί σε μαγνητικό πεδίο. Το προκύπτον σήμα με μονάδες  $V/\sqrt{Hz}$  χρειάζεται να επεξεργαστεί ως προς το πλάτος και τη φάση σύμφωνα με τη διαθέσιμη συνάρτηση μεταφοράς (Transfer Function-TF):

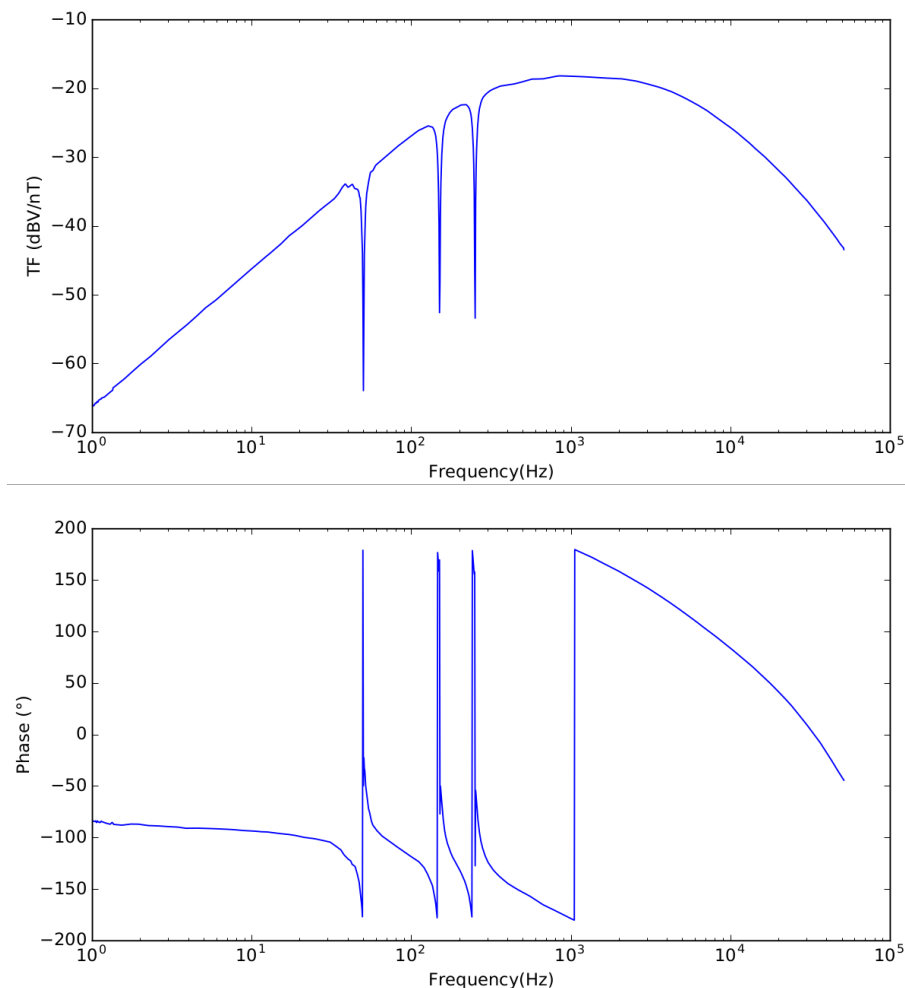
$$PSD_{Field} \left( \frac{nT}{\sqrt{Hz}} \right) = FFT_{Measured} \left( \frac{dBV}{\sqrt{Hz}} \right) / TF \left( \frac{dBV}{nT} \right) \quad \text{Εξ. 1}$$

Για κάθε άξονα του αισθητήρα, που μετράει μια συγκεκριμένη συνιστώσα του πεδίου, υπάρχει ειδική συνάρτηση μεταφοράς. Επιπλέον, κάθε SCM διαθέτει διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς. Συνεπώς, καθώς στις μετρήσεις χρησιμοποιούνται δύο SCM αισθητήρες, είναι απαραίτητες συνολικά 6 συναρτήσεις μεταφοράς για να γίνει σωστά η βαθμονόμηση. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η ευαισθησία του δέκτη σε συνάρτηση με τη

συχνότητα. Τέλος, στην Εικόνα 11 απεικονίζεται η συνάρτηση μεταφοράς του πλάτους και της φάσης ενδεικτικά για έναν άξονα ενός αισθητήρα.

Πίνακας 1: Ευαισθησία του δέκτη SCM σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

Frequency (Hz)	Sensitivity $fT/\sqrt{Hz}$
<b>1</b>	300000
<b>10</b>	15000
<b>100</b>	600
<b>1000</b>	130
<b>3000</b>	140
<b>100000</b>	300
<b>30000</b>	800



Εικόνα 11: Συνάρτηση μεταφοράς που ανήκει σε SCM.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το θεωρητικό μαθηματικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίζεται η παρούσα μελέτη. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το φαινόμενο της μαγνητικής δύναμης, οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της φασματικής πυκνότητας ενός σήματος στο πεδίο της συχνότητας καθώς και τα χαρακτηριστικά των τραπεζοειδών παλμών τα οποία είναι απαραίτητα για τις προτεινόμενες διαδικασίες μοντελοποίησης. Επιπλέον, το μαθηματικό υπόβαθρο περιλαμβάνει τους φυσικούς νόμους που διέπουν το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα μαγνητικό δίπολο και την ανάλυση της επίδρασης ενός αγωγίμου επιπέδου στη διαδικασία των μετρήσεων και της παραγωγής ενός κατάλληλου μοντέλου σύμφωνα με τη θεωρία των ειδώλων.

#### 2.2 Μαγνητική δύναμη

Από το νόμο του Ampere, η στοιχειώδης δύναμη που ασκείται σε ένα στοιχειώδες στοιχείο  $I \cdot d\mathbf{l}$  υπό την παρουσία μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{B}$  δίνεται από τη σχέση  $d\mathbf{F} = I \cdot (d\mathbf{l} \times \mathbf{B})$ . Επίσης, η συνολική δύναμη σε μια ρευματική κατανομή  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$  που βρίσκεται σε εξωτερικό πεδίο  $\mathbf{B}$  μπορεί να υπολογισθεί ως [9] [10] :

$$\mathbf{F} = \int \mathbf{J}(\mathbf{x}) \times \mathbf{B} dV, \quad \text{Εξ. 2}$$

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί ως:

$$\mathbf{F} = \langle (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B} \rangle V,$$

Εξ. 3

όπου  $\mathbf{M}$  είναι το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής της εξεταζόμενης μάζας και  $\mathbf{B}$  είναι το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου. Το σύμβολο  $\langle \dots \rangle$  εκφράζει τη μέση τιμή της περικλειόμενης ποσότητας ως προς τον όγκο της εξεταζόμενης μάζας και  $V$  είναι ο όγκος της.

Η μαγνητική ροπή μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα της παραμένουσας μαγνητικής ροπής  $\mathbf{M}_r$ , η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος, και της επαγόμενης μαγνητικής ροπής  $\mathbf{M}_i$  η οποία προκύπτει από την τοποθέτηση του σώματος σε μαγνητικό πεδίο. Η επαγόμενη μαγνητική ροπή μπορεί να εκφραστεί σε γραμμική σχέση με το μαγνητικό πεδίο σαν συνάρτηση της μαγνητικής ευαισθησίας:

$$\mathbf{M}_i = \frac{\chi}{\mu_0} \mathbf{B},$$

Εξ. 4

Η μαγνητική ευαισθησία,  $\chi$ , δηλώνει τον βαθμό της επαγόμενης μαγνήτισης ενός υλικού σε σχέση με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο, ενώ το  $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και είναι ίση με  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ m kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$ . Συνεπώς, η μαγνητική δύναμη μπορεί να γραφεί:

$$\mathbf{F} = \left\langle \left[ (\mathbf{M}_r + \frac{\chi}{\mu_0} \mathbf{B}) \cdot \nabla \right] \mathbf{B} \right\rangle V,$$

Εξ. 5

Στην παραπάνω σχέση θεωρείται πως η παράγωγος της παραμένουσας μαγνητικής ροπής είναι αμελητέα. Επιπλέον, θεωρώντας μια διαστημική αποστολή, το συνολικό πεδίο περιλαμβάνει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τον εξοπλισμό του διαστημοπλοίου  $\mathbf{B}_{SC}$  καθώς και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}_p$ .

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_p + \mathbf{B}_{SC}$$

Εξ. 6

Επιπροσθέτως, οι διακυμάνσεις της μαγνητικής ροπής καθώς και της μαγνητικής ευαισθησίας μπορούν να μη ληφθούν υπόψιν στον υπολογισμό της μαγνητικής δύναμης. Εντούτοις, οι διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου και της κλίσης του ευθύνονται για τις διακυμάνσεις της παραγόμενης

μαγνητικής δύναμης χρειάζεται να συμπεριληφθούν στην ανάλυση αυτή. Έτσι, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα του σταθερού DC όρου του πεδίου  $\mathbf{B}^{\text{DC}}$  και της χρονικά μεταβαλλόμενης συνιστώσας  $\delta\mathbf{B}$ . Εφαρμόζοντας αυτή την ανάλυση για το μαγνητικό πεδίο τότε έχουμε:

$$\mathbf{B}_{\text{SC}} = \mathbf{B}_{\text{SC}}^{\text{DC}} + \delta\mathbf{B}_{\text{SC}} \quad \text{and} \quad \mathbf{B}_{\text{p}} = \mathbf{B}_{\text{p}}^{\text{DC}} + \delta\mathbf{B}_{\text{p}}, \quad \text{Εξ. 7}$$

Η κλίση του μαγνητικού πεδίου του διαστημοπλοίου ομοίως μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα ενός σταθερού DC όρου και μιας κυμαινόμενης συνιστώσας. Ωστόσο, οι αντίστοιχοι όροι για το διαπλανητικό πεδίο μπορούν να αγνοηθούν με ασφάλεια, καθώς είναι μικρές οι διαστάσεις του διαστημοπλοίου σε σχέση με το διαπλανητικό μέσο:

$$\nabla\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\text{SC}} = \mathbf{B}_{\text{SC}}^{\text{DC}} + \delta\mathbf{B}_{\text{SC}} \quad \text{Εξ. 8}$$

Χρησιμοποιώντας αυτές τις σχέσεις τότε η μαγνητική δύναμη που ασκείται πάνω σε μία εξεταζόμενη μάζα είναι:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} = \mathbf{F}^{\text{DC}} + \delta\mathbf{F} = & \left\langle \left[ \left( \mathbf{M}_{\text{r}} + \frac{\chi}{\mu_0} \mathbf{B}_{\text{p}}^{\text{DC}} \right) \cdot \nabla \right] \mathbf{B}_{\text{SC}}^{\text{DC}} \right\rangle V \\ & + \left\langle \left[ \left( \mathbf{M}_{\text{r}} + \frac{\chi}{\mu_0} \mathbf{B}_{\text{SC}}^{\text{DC}} \right) \cdot \nabla \right] \mathbf{B}_{\text{SC}}^{\text{DC}} \right\rangle V + \delta\mathbf{F}, \end{aligned} \quad \text{Εξ. 9}$$

Με τη διακύμανση της δύναμης να ισούται με:

$$\begin{aligned} \delta\mathbf{F} = & \left\langle \left[ \frac{\chi}{\mu_0} \delta\mathbf{B}_{\text{p}} \cdot \nabla \right] \mathbf{B}_{\text{SC}}^{\text{DC}} \right\rangle V \\ & + \left\langle \left[ \left( \frac{\chi}{\mu_0} \delta\mathbf{B}_{\text{SC}} \right) \cdot \nabla \right] \mathbf{B}_{\text{SC}}^{\text{DC}} \right\rangle V \\ & + \left\langle \left[ \left( \mathbf{M}_{\text{r}} + \frac{\chi}{\mu_0} \mathbf{B}_{\text{p}}^{\text{DC}} \right) \cdot \delta\nabla \right] \mathbf{B}_{\text{SC}} \right\rangle V \\ & + \left\langle \left[ \left( \mathbf{M}_{\text{r}} + \frac{\chi}{\mu_0} \mathbf{B}_{\text{SC}}^{\text{DC}} \right) \cdot \delta\nabla \right] \mathbf{B}_{\text{SC}} \right\rangle V \\ & + \left\langle \left[ \left( \frac{\chi}{\mu_0} \delta\mathbf{B}_{\text{p}} \cdot \delta\nabla \right) \mathbf{B}_{\text{SC}} \right] \right\rangle V \\ & + \left\langle \left[ \left( \frac{\chi}{\mu_0} \delta\mathbf{B}_{\text{SC}} \cdot \delta\nabla \right) \mathbf{B}_{\text{SC}} \right] \right\rangle V, \end{aligned} \quad \text{Εξ. 10}$$

όπου  $\delta\mathbf{B}$  είναι η διακύμανση του μαγνητικού πεδίου και  $\delta\nabla$  η διακύμανση της κλίσης του μαγνητικού πεδίου. Σύμφωνα με τη σχέση της Εξ. 9, ο σταθερός όρος της μαγνητικής δύναμης αποτελείται από το άθροισμα του DC όρου που αφορά το διαπλανητικό πεδίο και του DC όρου που αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά του μαγνητικού πεδίου που προέρχεται από τις ηλεκτρομαγνητικές πηγές του διαστημοπλοίου. Οι όροι που συνιστούν τη διακύμανση της μαγνητικής δύναμης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε όρους που οφείλονται στη διακύμανση του μαγνητικού πεδίου ( $\delta\mathbf{B}$ ), σε όρους που σχετίζονται με τη διακύμανση της κλίσης του μαγνητικού πεδίου ( $\delta\nabla\mathbf{B}$ ) και σε όρους δεύτερης τάξης που εκφράζουν τις παραγόμενες AC συνιστώσες της μαγνητικής δύναμης στο μετρούμενο εύρος συχνοτήτων ( $\delta\mathbf{B} \cdot \delta\nabla\mathbf{B}$ ). Συγκεκριμένα, οι όροι δεύτερης τάξης προκύπτουν από τη σύζευξη της διακύμανσης του μαγνητικού πεδίου με τη διακύμανση της κλίσης του μαγνητικού πεδίου το οποίο παράγεται από τον εξοπλισμό του διαστημοπλοίου:

$$\delta\mathbf{F} = \left\langle \left[ \frac{\chi}{\mu_0} \delta\mathbf{B} \cdot \delta\nabla \right] \mathbf{B}_{\text{SC}} \right\rangle V \quad \text{Εξ. 11}$$

Οι όροι δεύτερης τάξης αξίζουν περαιτέρω μελέτη, καθώς αν συζευχθούν δύο ή παραπάνω μαγνητικά πεδία με κοντινές βασικές συχνότητες τότε είναι δυνατή η παραγωγή μαγνητική δύναμη σε συχνότητες κοντά στο DC και οι οποίες αποτελούν ουσιαστικά θόρυβο για τις μετρήσεις μαγνητικής δύναμης που μια αποστολή σκοπεύει να εκτελέσει. Για παράδειγμα, αν θεωρηθούν δύο ημιτονοειδή μαγνητικά πεδία με κοντινές συχνότητες  $\omega_1, \omega_2$ , τότε με τη διαμόρφωση πλάτους, που υφίστανται μέσω της σχέσης της Εξ. 11, θα παραχθούν συνιστώσες της μαγνητικής δύναμης και στη συχνότητα  $\omega_1 - \omega_2$ , που θα βρίσκεται στο εύρος ζώνης πολύ κοντά στο DC.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου οφείλονται κυρίως στις διακυμάνσεις του ρεύματος που τροφοδοτεί τις συσκευές του διαστημοπλοίου και έτσι ο όρος  $\delta\mathbf{B}_{\text{SC}}$  μπορεί να θεωρηθεί ως το γινόμενο ενός χωρικού παράγοντα με το AC σήμα (εν προκειμένω με ημιτονοειδή μορφή). Συνεπώς, η κλίση αυτού του πεδίου θα είναι ανάλογη του πεδίου με παράγοντα αντίστοιχο της γεωμετρίας του εξοπλισμού σε σχέση με την εξεταζόμενη μάζα και μπορεί να εκφρασθεί ως [12]:

$$\delta \frac{\partial B_i}{\partial x} = \delta \frac{B_i}{l_0}, \quad \text{Εξ. 12}$$

όπου το  $i$  αντιστοιχεί στις  $x, y, z$  συνιστώσες και  $l_0$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος του διαστημοπλοίου. Επομένως, η  $x$  συνιστώσα της μαγνητικής δύναμης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\delta F_x = \left( \frac{\chi(t)V}{\mu_0 l_0} |\delta \mathbf{B}|^2 \right) \quad \text{Εξ. 13}$$

Η μαγνητική ευαισθησία  $\chi(t)$  είναι συνάρτηση του χρόνου καθώς και τα μαγνητικά πεδία μέσα στο διαστημόπλοιο είναι επίσης χρονικά μεταβαλλόμενα. Επομένως, όταν είναι παρόντα  $N$  μαγνητικά πεδία μέσα στο διαστημικό σκάφος, τότε θα συνεισφέρουν στον θόρυβο ενδεικτικά στη  $x$  συνιστώσα:

$$\delta F_x \sim |\delta(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 + \dots \mathbf{B}_N)|^2 \quad \text{Εξ. 14}$$

### 2.3 Εκτίμηση φασματικής πυκνότητας

Η φασματική πυκνότητα πλάτους (Amplitude Spectral Density-ASD) και η φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density-PSD) απαιτούν πρωτίστως τον υπολογισμό του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform-FFT). Ο αλγόριθμος FFT υπολογίζει το δίπλευρο φάσμα ενός σήματος  $x$  σε μορφή φανταστικού αριθμού, το οποίο ουσιαστικά απεικονίζει μισό πλάτος στις αρνητικές και στις θετικές συχνότητες. Το δίπλευρο φάσμα μπορεί με την κατάλληλη κανονικοποίηση να εκφραστεί ως μέτρο και φάση. Η κανονικοποίηση αφορά το πλάτος του φάσματος του σήματος και γίνεται χρησιμοποιώντας το μήκος  $L$  του σήματος στο πεδίο του χρόνου [13]. Οι παρακάτω εξισώσεις υπολογίζουν το μέτρο και τη φάση του φάσματος ενός σήματος  $x$ :

$$AS(\text{peak}) = \frac{\text{Magnitude}[FFT(x)]}{L} \quad \text{Εξ. 15}$$

$$\text{Phase (rad)} = \arctan\left(\frac{\text{imag}[FFT(x)]}{\text{real}[FFT(x)]}\right) \quad \text{Εξ. 16}$$

Η φάση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας υπολογίζεται σε rad, αλλά σε περίπτωση που χρειάζεται μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε degrees. Επίσης,

το δίπλευρο φάσμα μπορεί να μετατραπεί σε μονόπλευρο διπλασιάζοντας το πλάτος που αντιστοιχεί σε κάθε συχνότητα εκτός της DC.

Για τον υπολογισμό του FFT συχνά απαιτείται η εφαρμογή παραθύρου ώστε να αποφευχθούν οι ασυνέχειες του σήματος κατά τη διαδικασία αυτή και συνεπώς η φασματική διαρροή [13]. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να οριστούν ορισμένα μεγέθη χρήσιμα για την εφαρμογή του παραθύρου στο σήμα στο πεδίο του χρόνου. Το παράθυρο είναι μια συνάρτηση με μήκος  $L$  και αποτελείται από ένα διάνυσμα πραγματικών αριθμών  $\{w_j\}$ ,  $j = 0, 1, \dots, L - 1$ . Η συνάρτηση του παραθύρου πολλαπλασιάζεται με το σήμα στο πεδίο του χρόνου και το αποτέλεσμα υπόκειται σε μετασχηματισμό Fourier. Παρακάτω υπολογίζονται ορισμένοι συντελεστές, που είναι απαραίτητοι για τη σωστή κανονικοποίηση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας:

$$S_1 = \sum_{j=1}^{L-1} w_j \quad \text{Εξ. 17}$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^{L-1} w_j^2 \quad \text{Εξ. 18}$$

Επιπλέον, ορίζονται το ισοδύναμο εύρος ζώνης θορύβου (Normalized Equivalent Noise Bandwidth-NENBW) και το ενεργό εύρος ζώνης θορύβου (Effective Noise Bandwidth-ENBW) ως:

$$NENBW = L \frac{S_2}{S_1^2} \quad \text{Εξ. 19}$$

$$ENBW = NENBW \frac{F_s}{L} = F_s \frac{S_2}{S_1^2} \quad \text{Εξ. 20}$$

όπου  $F_s$  η συχνότητα δειγματοληψίας. Το φάσμα της ισχύος (Power Spectrum-PS) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον παράγοντα  $S_1$  για λόγους κανονικοποίησης:

$$PS_{rms} = \frac{2 \cdot |FFT(x)|^2}{S_1^2} \quad \text{Εξ. 21}$$



Η φασματική πυκνότητα ισχύος προκύπτει από το πηλίκο του φάσματος ισχύος προς το ισοδύναμο εύρος ζώνης του θορύβου:

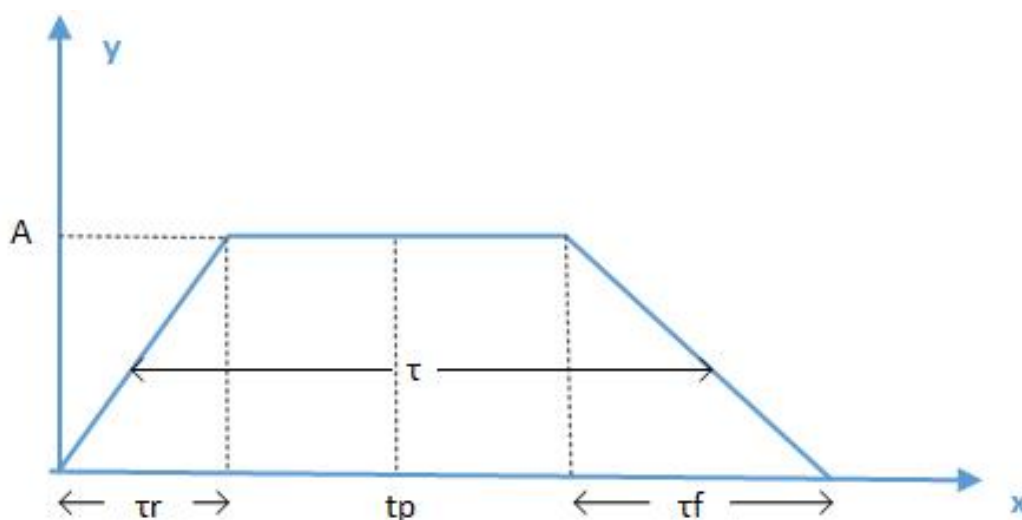
$$PSD_{rms} = \frac{PS_{rms}}{ENBW} = \frac{2 \cdot |FFT(x)|^2}{F_s S_2} \quad \text{Εξ. 22}$$

Οι Εξ. 21 και Εξ. 22 ισχύουν για κάθε συχνότητα εκτός της DC και της Nyquist ( $F_s/2$ ). Η φασματική πυκνότητα ισχύος τελικά είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των δειγμάτων  $L$  έπειτα από την κανονικοποίηση. Η φασματική πυκνότητα πλάτους μπορεί να υπολογισθεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$ASD = \sqrt{PSD} \quad \text{Εξ. 23}$$

## 2.4 Τραπεζοειδής παλμός

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι εξισώσεις φάσματος που περιγράφουν έναν τραπεζοειδή παλμό. Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται ένας τραπεζοειδής παλμός με τα χαρακτηριστικά του στο πεδίο του χρόνου [1].



Εικόνα 12: Τραπεζοειδής παλμός στο πεδίο του χρόνου.

Τα χαρακτηριστικά του τραπεζοειδή παλμού περιλαμβάνουν το εύρος του παλμού  $\tau$ , τον χρόνο ανόδου  $\tau_r$ , τον χρόνο καθόδου  $\tau_f$ , το πλάτος του  $A$  και τη χρονική στιγμή την οποία αυτός συμβαίνει  $\tau_p$ . Η φασματική συμπεριφορά μιας σειράς τραπεζοειδών παλμών περιγράφεται από τη σχέση:

$$S_{trap} = -j \frac{A}{2\pi n} e^{-\frac{jn\omega_0(\tau+\tau_r)}{2}} \left( \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_r\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_r} e^{\frac{jn\omega_0\tau}{2}} - \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_f\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_f} e^{-\frac{jn\omega_0\tau}{2}} \right) e^{-j2\pi f\tau_p}, \quad \text{Εξ. 24}$$

όπου  $n = f \cdot T$  και  $\omega_0 = 2\pi/T$ . Η μεταβλητή  $T$  αντιστοιχεί στην περίοδο επανάληψης του παλμού και μετριέται σε sec και η  $f$  είναι το διάνυσμα της συχνότητας σε Hz. Όταν οι χρόνοι ανόδου και καθόδου είναι ίσοι  $\tau_r = \tau_f$ , τότε η παραπάνω εξίσωση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$S_{trap} = A \frac{\tau}{T} \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau} \cdot \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_r\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_r} \cdot e^{-jn\omega_0(\tau+\tau_r)/2} \cdot e^{-j2\pi f\tau_p} \quad \text{Εξ. 25}$$

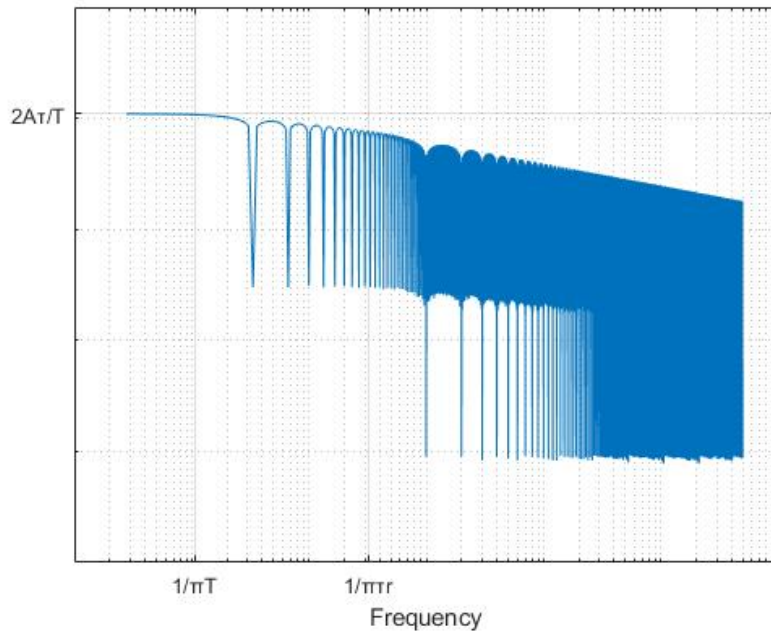
Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι του ενός τραπεζοειδείς παλμοί με διαφορετικά χαρακτηριστικά, τότε το συνολικό φάσμα προκύπτει ως το άθροισμα των φασμάτων των εκάστοτε παλμών:

$$S_{multipletrap} = \sum_{i=1}^N A_i \frac{\tau_i}{T} \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_i\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_i} \cdot \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\omega_0\tau_{r_i}\right)}{\frac{1}{2}n\omega_0\tau_{r_i}} \cdot e^{-jn\omega_0(\tau_i+\tau_{r_i})/2} \cdot e^{-j2\pi f\tau_{p_i}} \quad \text{Εξ. 26}$$

Επιπλέον, ένα σημαντικό στοιχείο του φάσματος σειράς τραπεζοειδών παλμών είναι η περιβάλλουσα του, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$E_{trap} = 2A \frac{\tau}{T} \cdot |\text{sinc}(\pi\tau f)| \cdot |\text{sinc}(\pi\tau_r f)| \quad \text{Εξ. 27}$$

Στην Εικόνα 13 απεικονίζεται ενδεικτικά η περιβάλλουσα του φάσματος μιας σειράς τραπεζοειδών παλμών.



Εικόνα 13: Περιβάλλουσα του φάσματος ενός τραπεζοειδούς παλμού.

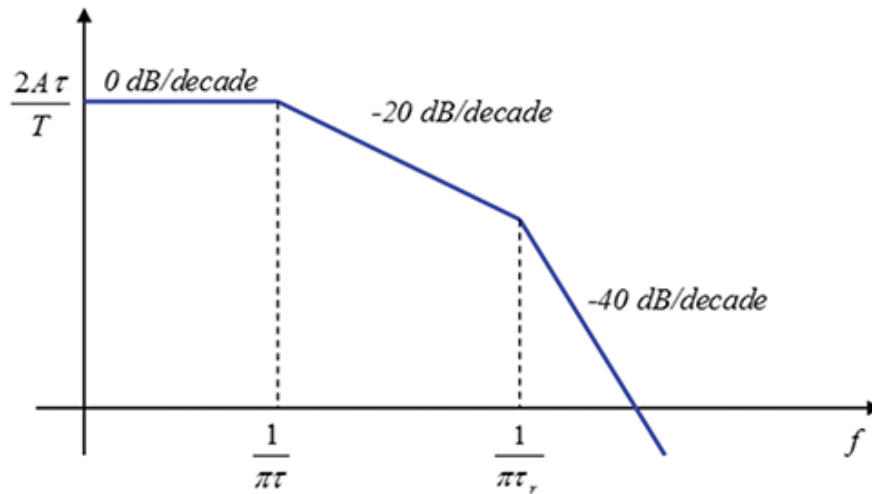
Από την περιβάλλουσα μπορούν να εκτιμηθούν τα άνω φασματικά όρια της σειράς παλμών, τα οποία αντιστοιχούν στις μέγιστες δυνατές τιμές φάσματος στο εύρος ζώνης που μελετάται καθορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις μέγιστες φασματικές εκπομπές. Γνωρίζοντας πως οι ασύμπτωτες της συνάρτησης *sinc* είναι:

$$\left| \frac{\sin(x)}{x} \right| = \begin{cases} 1 & \text{for small } x \\ \frac{1}{|x|} & \text{for large } x \end{cases} \quad \text{Εξ. 28}$$

τότε τα άνω φασματικά όρια μπορούν να υπολογιστούν:

$$S_{\text{bounds}} = \begin{cases} 2A \frac{\tau}{T} & \text{for } f \ll 1/\pi\tau \\ 2A \frac{\tau}{T} \cdot \left| \frac{1}{\pi\tau f} \right| & \text{for } 1/\pi\tau \ll f \ll 1/\pi\tau_r \\ 2A \frac{\tau}{T} \cdot \left| \frac{1}{\pi\tau f} \right| \cdot \left| \frac{1}{\pi\tau_r f} \right| & \text{for } f \gg 1/\pi\tau_r \end{cases} \quad \text{Εξ. 29}$$

Η συνολική ασύμπτωτη προκύπτει ως σύνθεση των τριών ασύμπτωτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.



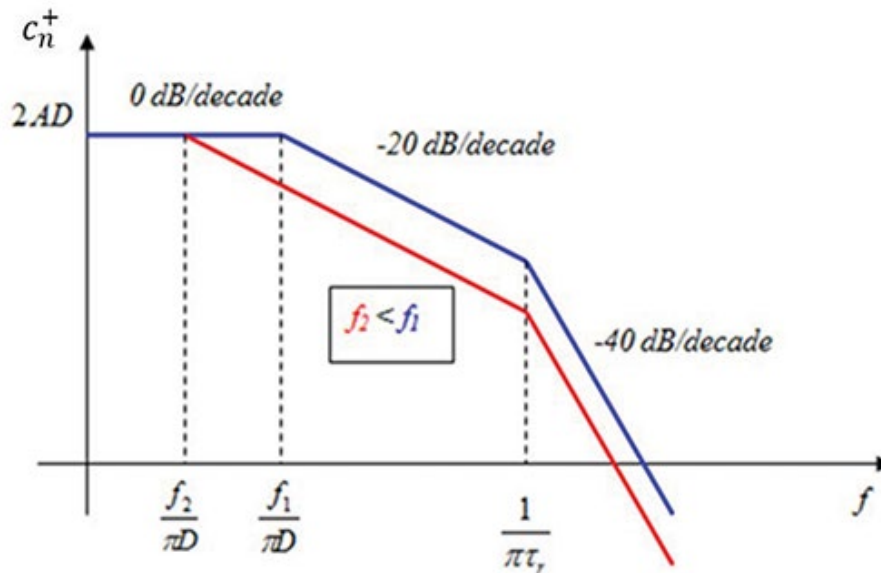
Εικόνα 14: Άνω φασματικά όρια τραπεζοειδή παλμού.

Η σύνθετη ασύμπτωτη αποτελείται από τρία ευθύγραμμο τμήματα. Το πρώτο τμήμα οφείλεται στο πρώτο κομμάτι της Εξ. 29 και έχει κλίση  $0 \text{ dB/decade}$  με αρχικό επίπεδο ίσο με  $2A\tau/T$ . Το δεύτερο ευθύγραμμο τμήμα έχει κλίση  $-20 \text{ dB/decade}$  και οφείλεται στο δεύτερο κομμάτι της Εξ. 29. Το τελευταίο τμήμα της ασύμπτωτης έχει κλίση  $-40 \text{ dB/decade}$  και προκύπτει από το δεύτερο και τρίτο κομμάτι της Εξ. 29. Όπως είναι εμφανές, το εύρος του παλμού  $\tau$  πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο στο χρόνο ανόδου/καθόδου του παλμού, δηλαδή  $\tau \geq \tau_r$ . Συνεπώς, το πρώτο σημείο καμπής των φασματικών ορίων σχετίζεται με το εύρος του παλμού  $1/\pi\tau$ , ενώ το δεύτερο σημείο καμπής σχετίζεται με τον χρόνο ανόδου  $1/\pi\tau_r$ .

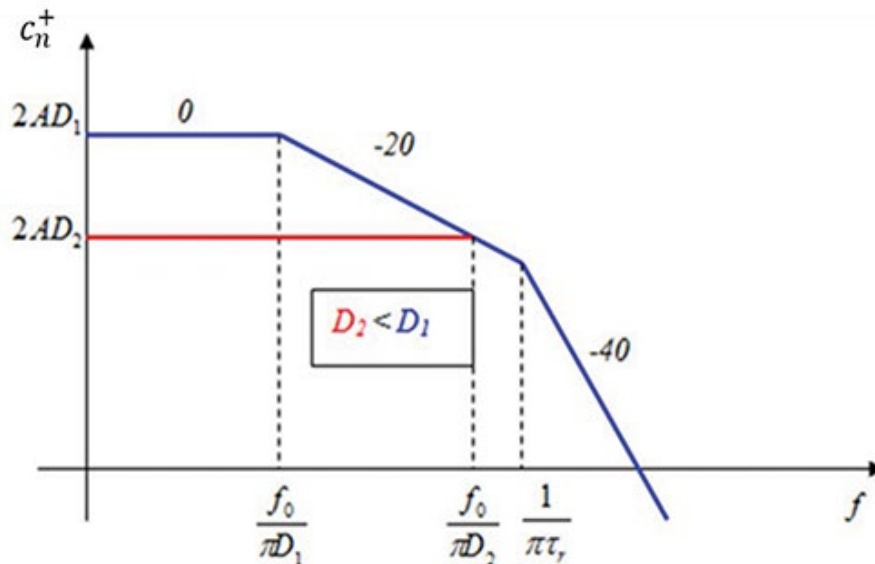
Από τα φασματικά όρια συνεπάγεται ότι το υψίσυχο περιεχόμενο της τραπεζοειδούς παλμοσειράς οφείλεται κυρίως στους χρόνους ανόδου και καθόδου του παλμού. Όσο μικρότεροι είναι αυτοί οι χρόνοι, τόσο περισσότερο θα είναι το φασματικό περιεχόμενο στις υψηλές συχνότητες. Ως εκ τούτου, οι χαμηλοί χρόνοι ανόδου/καθόδου των μεταβατικών φαινομένων είναι συχνά υπεύθυνοι για τις υψίσυχνες εκπομπές και πιθανώς συμβάλλουν στη μαγνητική παρεμβολή.

Επιπλέον, η συχνότητα της παλμοσειράς είναι δυνατό να επηρεάσει το παραγόμενο φάσμα [1] [14]. Συνήθως, όταν η συχνότητα μιας σειράς παλμών μειώνεται, δηλαδή αυξάνεται η περίοδος επανάληψης του παλμού  $T$ , το εύρος του παλμού  $\tau$  αυξάνεται αντίστοιχα ώστε να παραμένει σταθερός ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle). Συνεπώς, η αύξηση της συχνότητας της παλμοσειράς δεν επηρεάζει συνήθως τη DC συνιστώσα του προκύπτοντος φάσματος. Εντούτοις, αν αυξηθεί η συχνότητα της παλμοσειράς και ο κύκλος λειτουργίας παραμείνει σταθερός, τότε το εύρος του παλμού θα αυξηθεί. Αυτή η αύξηση

θα μετακινήσει το πρώτο σημείο καμπής στα φασματικά όρια,  $1/\pi\tau$ , πιο χαμηλά στο εύρος συχνοτήτων και έτσι ένα κομμάτι στην Εικόνα 14 το οποίο αρχικά είχε μηδενική κλίση πλέον θα έχει κλίση ίση με  $-20 \text{ dB/decade}$ . Η διαφορά αυτή συνεπάγεται μείωση του φασματικού περιεχομένου στις υψηλές συχνότητες. Το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 15.



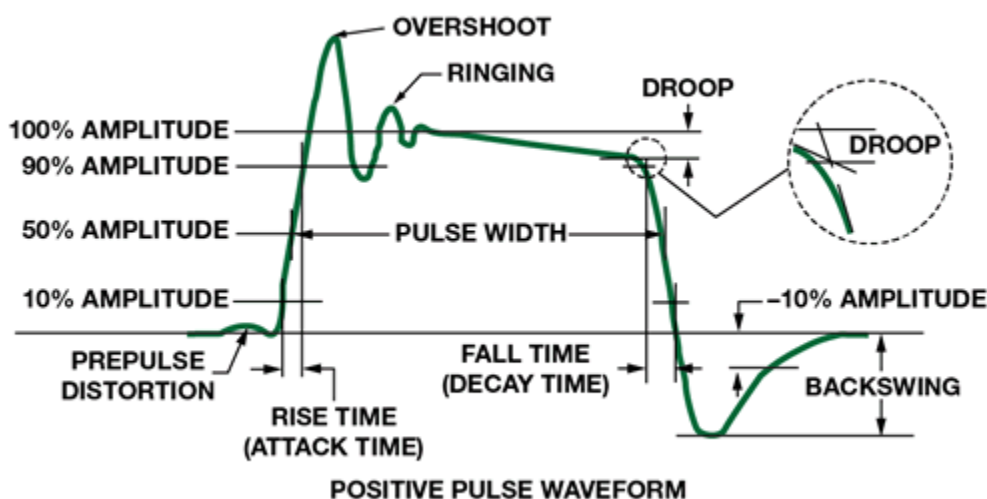
Εικόνα 15: Φαινόμενο μείωσης της συχνότητας μιας παλμοσειράς με σταθερό κύκλο λειτουργίας.



Εικόνα 16: Φαινόμενο μείωσης του κύκλου λειτουργίας με σταθερή τη συχνότητα της παλμοσειράς.

Η περίπτωση όπου μειώνεται ο κύκλος λειτουργίας με τη συχνότητα της παλμοσειράς να παραμένει σταθερή απεικονίζεται στην Εικόνα 16 [1] [14]. Καθώς ο κύκλος λειτουργίας μειώνεται, το εύρος του παλμού  $\tau$  μειώνεται αντίστοιχα. Η DC συνιστώσα θα έχει μειωμένο πλάτος, ενώ το πρώτο σημείο καμπής,  $1/\pi\tau$ , θα μετακινηθεί σε πιο υψηλή συχνότητα. Το φαινόμενο αυτό μειώνει το φασματικό περιεχόμενο στις χαμηλές συχνότητες, ενώ το υψίσυχο φάσμα δεν επηρεάζεται.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως παρασιτικά επαγωγικά και χωρητικά στοιχεία των τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Board - PCB) και καλωδίων σε ένα ψηφιακό σύστημα μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα κωδωνισμού (ringing effect), τα οποία είναι δυνατό να επηρεάσουν την ηλεκτρομαγνητική καθαρότητα σε ένα υπό εξέταση περιβάλλον (π.χ. διαστημόπλοιο) [1]. Το φαινόμενο αυτό με ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά του απεικονίζεται στην Εικόνα 17 στο πεδίο του χρόνου.



Εικόνα 17: Φαινόμενο κωδωνισμού.

Καθώς το σήμα μεταβαίνει από μια τιμή σε μία άλλη, υπάρχει μία τάση να εμφανίζεται ταλάντωση γύρω από τη μετάβαση αυτή. Συνήθως, προστίθεται μία αντίσταση σε σειρά με την έξοδο του κυκλώματος για λόγους απόσβεσης του φαινομένου αυτού εξομαλύνοντας την μετάβαση. Στο πεδίο της συχνότητας, ο κωδωνισμός τείνει να ενισχύσει ορισμένες περιοχές του φάσματος του σήματος, οι οποίες είναι σχετικές με το φαινόμενο αυτό [1].

## 2.5 Μαγνητικό δίπολο

Χωρίς απώλεια της γενικότητας, ένα σύστημα φορτίων ή ρευμάτων θεωρείται ότι μεταβάλλεται ημιτονοειδώς στο χρόνο και συνεπώς η μαγνητική διπολική ροπή μπορεί να γραφεί ως:

$$\mathbf{m}(\mathbf{r}', t) = \mathbf{m}(\mathbf{r}')e^{-i\omega t} \quad \text{Εξ. 30}$$

Το εύρος ζώνης που εξετάζεται ώστε να πληρούνται οι αυστηρές προδιαγραφές για την AC μαγνητική καθαρότητα στις διαστημικές αποστολές είναι μέχρι τα 250 KHz. Καθώς λοιπόν η συχνότητα ταλάντωσης της μαγνητικής ροπής πρόκειται να είναι μέχρι τα 250 KHz, η οποία αντιστοιχεί σε μήκος κύματος πάνω από 1.2 km, και τα σημεία παρατήρησης που χρησιμοποιούνται για επίγειες αλλά και για μετρήσεις κατά τη διάρκεια της αποστολής βρίσκονται σε μικρή απόσταση από την εξεταζόμενη συσκευή, είναι ασφαλής η υπόθεση πως το μαγνητικό πεδίο που παράγεται μπορεί να θεωρηθεί ημιστατικό [15]. Το μαγνητικό πεδίο, που παράγεται από μία μαγνητική διπολική ροπή  $\mathbf{m}$  ή μια ηλεκτρική διπολική ροπή  $\mathbf{p}$ , είναι αντίστοιχα [11]:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{e^{-i\omega t} \mu_0}{4\pi} \left\{ k^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{m}) \times \mathbf{n} \frac{e^{ikr}}{r} + [3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}) - \mathbf{m}] \left( \frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} \right) e^{ikr} \right\} \quad \text{Εξ. 31}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 c k^2 e^{-i\omega t}}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{e^{ikr}}{r} \left( 1 - \frac{1}{ikr} \right) \quad \text{Εξ. 32}$$

όπου  $r$  είναι η απόσταση μεταξύ της πηγής και του σημείου παρατήρησης,  $\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα της απόστασης και  $k = \omega/c$ . Στην κοντινή περιοχή, όπου ισχύει  $r \ll \lambda$ , τα ημιστατικά μαγνητικά πεδία, μπορούν να προσεγγισθούν ως:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_{obs}, t) = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \left[ \frac{3(\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r})((\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r}) \cdot \mathbf{m})}{|\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r}|^5} - \frac{\mathbf{m}}{|\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r}|^3} \right] \quad \text{Εξ. 33}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_{obs}, t) = \frac{\mu_0 i \omega e^{-i\omega t}}{4\pi} ((\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r}) \times \mathbf{p}) \frac{1}{|\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r}|^3} \quad \text{Εξ. 34}$$

όπου  $\mathbf{r}_{obs} = (x_0, y_0, z_0)$  είναι το σημείο παρατήρησης και  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  είναι η θέση του μαγνητικού δίπολου. Είναι εμφανές πως ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με απόσταση του σημείου παρατήρησης από την μαγνητική πηγή είναι  $1/r^3$ . Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει θα ταλαντώνεται στο πεδίο του χρόνου με την ίδια συχνότητα που ταλαντώνεται η μαγνητική ροπή του δίπολου που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή του, σύμφωνα με τον όρο  $e^{-i\omega t}$ .

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r})[(\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r}) \cdot \mathbf{m}(t)]}{|\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r}|^5} - \frac{\mathbf{m}(t)}{|\mathbf{r}_{obs} - \mathbf{r}|^3} \right] \quad \text{Εξ. 35}$$

Η Εξ. 35 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου (στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας) στη θέση όπου βρίσκονται τα μαγνητόμετρα ή σε οποιοδήποτε σημείο ενδιαφέροντος  $\mathbf{r}_{obs}$  πάνω στο αεροσκάφος και για οποιαδήποτε μαγνητική ροπή, επαγόμενη ή παραμένουσας μιας συσκευής, η οποία ακολουθεί μια χρονική εξάρτηση  $\mathbf{m}(t)$  (ή εξάρτηση στο πεδίο της συχνότητας  $\mathbf{m}(f)$ ).

## 2.6 Αγωγήμο επίπεδο

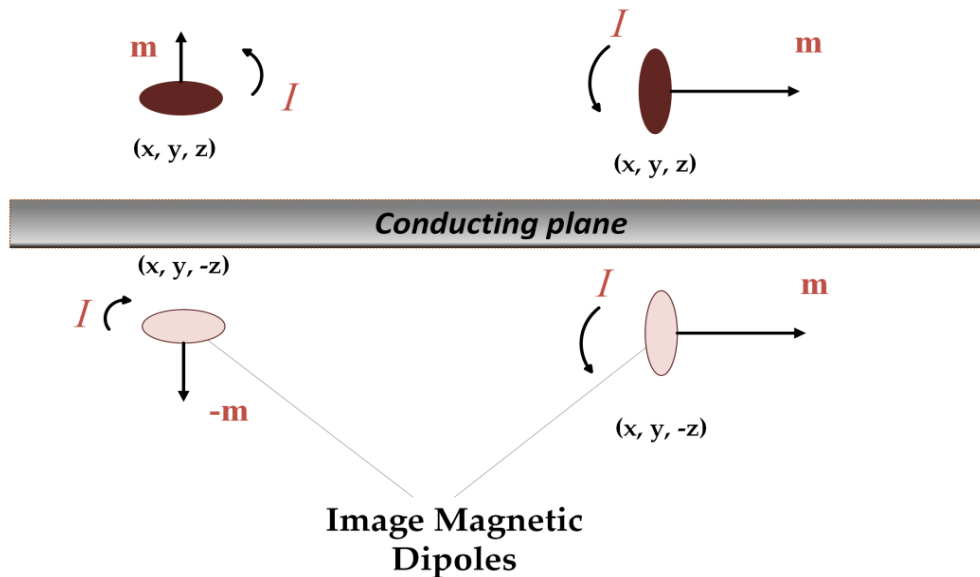
Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά την επίδραση του αγωγήμο επιπέδου στα ημιστατικά μαγνητικά πεδία.

Κατά τις αρχικές φάσης μελέτης και σχεδιασμού μιας διαστημικής αποστολής, διενεργούνται μετρήσεις σχετικές με τις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές του αντίστοιχου εξοπλισμού. Οι μετρήσεις αυτές διεξάγονται σε ειδικές εγκαταστάσεις που συνήθως περιλαμβάνουν αγωγήμες επιφάνειες. Συνεπώς, τα μαγνητικά πεδία που μετρούνται επηρεάζονται από την παρουσία τέτοιου είδους επιφανειών.

Σε περιπτώσεις όπου ένα μαγνητικό δίπολο είναι τοποθετημένο πάνω από μια αγωγήμη επιφάνεια, τότε είναι απαραίτητη η χρήση της θεωρίας των ειδώλων για την εξέταση του φαινομένου [1] [16]. Σύμφωνα με τη θεωρία των ειδώλων, το μαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο παρατήρησης στον χώρο πάνω από το αγωγήμο επίπεδο μπορεί να υπολογισθεί ως το άθροισμα των μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από δύο μαγνητικές πηγές: (i) το αρχικό μαγνητικό δίπολο ( $\mathbf{B}^s$ ) και (ii) το είδωλο του που βρίσκεται κάτω από το αγωγήμο επίπεδο ( $\mathbf{B}^i$ ). Το είδωλο είναι και αυτό ένα μαγνητικό δίπολο και η θέση του είναι συμμετρική ως προς το αρχικό. Συνεπώς, η αγωγήμη επιφάνεια μπορεί να αντικατασταθεί με μια διάταξη που θα περιλαμβάνει τα μαγνητικά δίπολα και τα είδωλα του καθενός στις κατάλληλες θέσεις. Στην Εικόνα 18



απεικονίζονται δύο περιπτώσεις τοποθέτησης μια μαγνητικής λούπας (που ισοδυναμεί με μαγνητικό δίπολο) πάνω από ένα αγώγιμο επίπεδο και τα προκύπτοντα είδωλα τους με τις κατάλληλες μαγνητικές ροπές και θέσεις.



Εικόνα 18: Μαγνητικά δίπολα πάνω από αγώγιμη επιφάνεια και τα είδωλα τους.

Από τη θεωρία των ειδώλων προκύπτει πως οι θέσεις των ειδώλων είναι συμμετρικές ως προς την αγώγιμη επιφάνεια. Επίσης, όταν η κατανομή ρεύματος είναι κάθετη προς το αγώγιμο επίπεδο, τότε η ρευματική κατανομή του ειδώλου είναι αντίθετη της αρχικής, ενώ όταν είναι παράλληλη το είδωλο παρουσιάζει ίδια κατανομή ρεύματος με την εξεταζόμενη μαγνητική λούπα. Οι μαγνητικές ροπές του ειδώλου λοιπόν είναι:

$$\begin{aligned} m_{\parallel}^i &= m_{\parallel}^s \\ m_{\perp}^i &= -m_{\perp}^s \end{aligned} \quad \text{Εξ. 36}$$

Τα είδωλα μαζί με τις αρχικές μαγνητικές πηγές θα συνεισφέρουν στο συνολικό μαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο παρατήρησης  $\mathbf{r}_{obs}$ :

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_{obs})^{tot} = \mathbf{B}(\mathbf{r}_{obs}, x, y, z)^s + \mathbf{B}(\mathbf{r}_{obs}, x', y', z')^i \quad \text{Εξ. 37}$$

όπου  $(x', y', z')$  δηλώνουν τη θέση του ειδώλου, η οποία είναι συμμετρική ως προς το αρχικό μαγνητικό δίπολο σε σχέση με την αγωγίμο επιφάνεια.

Η θεωρία των ειδώλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εκ τούτου σε διαδικασίες μοντελοποίησης ώστε να ληφθεί υπόψιν μια αγωγίμη επιφάνεια που υπάρχει στη μετρητική διάταξη και να αποσυσχετιστεί από τα μετρούμενα μαγνητικά πεδία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

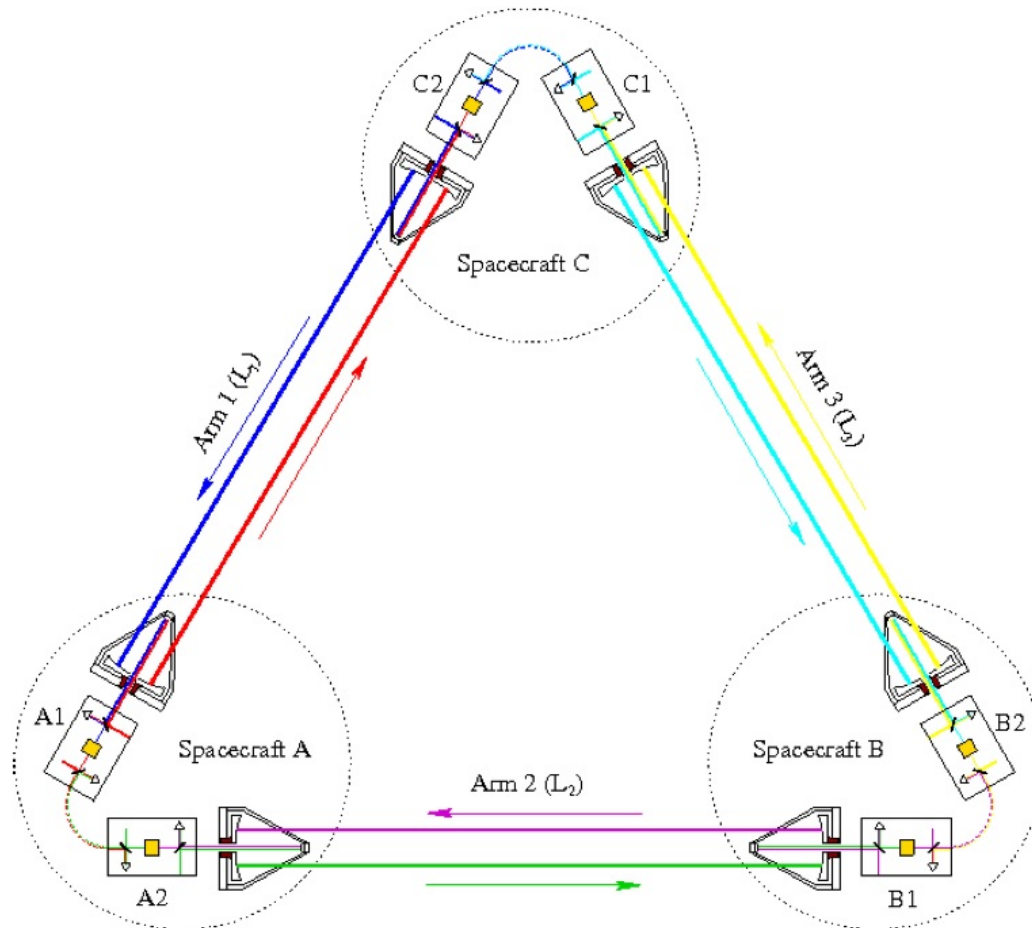
### 3. ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΟΛΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

Η μαγνητική καθαρότητα στις διαστημικές αποστολές αποτελεί μια σημαντική προϋπόθεση ώστε οι μετρήσεις που λαμβάνονται να είναι αξιόπιστες. Ορισμένες διαστημικές αποστολές έχουν ως στόχο τη μελέτη δυναμικών φαινομένων μετρώντας τις επαγόμενες δυνάμεις πάνω σε ειδικές μάζες υπό εξέταση (test masses), όπως στις περιπτώσεις των αποστολών LISA και LISA Pathfinder. Η αποστολή LISA Pathfinder προτίθεται να εξετάσει νέες και ζωτικής σημασίας τεχνολογίες για την αποστολή LISA. Συγκεκριμένα, η αποστολή LISA σκοπεύει να ανιχνεύσει και να παρατηρήσει βαρυτικά κύματα που προέρχονται από τεράστιες μαύρες τρύπες στο εύρος συχνοτήτων 0.1 mHz έως 0.1 Hz. Με αυτόν τον τρόπο θα συγκεντρωθούν πληροφορίες για τον σχηματισμό, την ανάπτυξη, την πυκνότητα και τον περιβάλλοντα χώρο των μαύρων τρυπών. Για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων χαμηλής συχνότητας απαιτούνται διαφορικές μετρήσεις ανάμεσα σε δύο σώματα που απέχουν  $5 \cdot 10^6$  km. Για την ακρίβεια, η αποστολή LISA περιλαμβάνει τρία διαστημόπλοια σε τριγωνικό σχηματισμό, δημιουργώντας έτσι τρεις βραχίονες. Ο σχηματισμός αυτός απεικονίζεται στην Εικόνα 19. Καθένας δορυφόρος απέχει  $5 \cdot 10^6$  km από τον άλλον και περιέχει δύο μάζες. Η ανίχνευση ενός βαρυτικού κύματος προκύπτει από την παρατήρηση της μεταβολής του μήκους της διαδρομής που ακολουθεί το φως μεταξύ των δύο μαζών δοκιμής που βρίσκονται σε έναν βραχίονα σε σχέση με τα ζεύγη μαζών των υπόλοιπων βραχιόνων [10].

Για να επιτευχθεί μαγνητική καθαρότητα είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθούν οι συνεισφορές μαγνητικών δυνάμεων στις εξεταζόμενες μάζες καθώς ενδέχεται να προκαλέσουν “θόρυβο” στην κίνησή τους [3]. Αυτός ο θόρυβος οφείλεται στην ανεπιθύμητη επιτάχυνση των μαζών και κυριαρχεί σε συχνότητες κάτω από το 1 mHz. Οι επιταχύνσεις περιλαμβάνουν αυτές που προκαλούνται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και του μαγνητικού πεδίου, τις διακυμάνσεις φορτίου των μαζών λόγω της κοσμικής και ηλιακής ακτινοβολίας κ.α. Οι διακυμάνσεις αυτές ανιχνεύονται από τις διατάξεις που μετράνε τη μαγνητική δύναμη και ως εκ τούτου πρέπει να μελετηθούν και να αφαιρεθούν από τις μετρήσεις ώστε οι τελευταίες να είναι αξιόπιστες. Αυτός ο θόρυβος ουσιαστικά προκαλείται από την αλληλοεπίδραση των μαγνητικών

ιδιοτήτων των εξεταζόμενων μαζών με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο καθώς και την κλίση του στη θέση στην οποία αυτές βρίσκονται. Σε κάθε περίπτωση, ο θόρυβος θα πρέπει να βρίσκεται στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα.



Εικόνα 19: Τριγωνικός σχηματισμός των τριών διαστημοπλοίων της αποστολής LISA. Κάθε δορυφόρος φιλοξενεί δυο μάζες δοκιμής.

Επιπροσθέτως, λαμβάνοντας υπόψιν πως οι μετρήσεις των βαρυτικών κυμάτων διαρκούν λίγα δευτερόλεπτα, οι απαιτήσεις για μαγνητική καθαρότητα αφορούν όχι μόνο το σταθερό μαγνητικό πεδίο (DC) που αντιστοιχεί σε χρονική περίοδο λίγων ωρών, αλλά εκτείνονται μέχρι τα αργά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία, η συχνότητα των οποίων φτάνει μέχρι τα μερικά mHz. Έτσι λοιπόν οι αποστολές αυτές χρειάζονται όχι μόνο μαγνητική καθαρότητα ως προς τα χρονικά σταθερά μαγνητικά πεδία, αλλά έχουν ακόμα υψηλότερες απαιτήσεις για τα αργά χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία.

Πρωταρχικός στόχος για την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας είναι η μελέτη του εξοπλισμού που βρίσκεται μέσα στο διαστημόπλοιο καθώς αυτός αποτελεί τον βασικό παράγοντα μόλυνσης των μετρήσεων των μαγνητικών πεδίων που σκοπεύει να εκτελέσει μια αποστολή. Γενικά, η εκπομπή των χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων οφείλεται στη λειτουργία των

ρολογιών και των περιοδικών σημάτων των ψηφιακών κυκλωμάτων, όπως συμβαίνει στη Μονάδα Διατήρησης και Διανομής Ισχύος (Power Conditioning and Distribution Unit- PCDU), καθώς και στη μεταγωγή των ψηφιακών στοιχείων κυρίως στους μετατροπείς ισχύος. Επιπλέον, τα μεταβατικά φαινόμενα που αντιστοιχούν σε υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις του ρεύματος που τροφοδοτεί τις συσκευές του διαστημοπλοίου καθώς και τα θερμικά φαινόμενα και ο υψίσυχνος θόρυβος που είναι παρόντα μέσα στο διαστημικό σκάφος μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές στη μαγνητική συμπεριφορά του εξοπλισμού. Συνεπώς, τα μαγνητικά πεδία, που δημιουργούνται από τον εξοπλισμό, μπορούν να αλληλοεπιδράσουν μεταξύ τους καθώς και με τα διαπλανητικά μαγνητικά πεδία στη θέση όπου είναι τοποθετημένος ο ευαίσθητος μετρητικός εξοπλισμός ή/και στη θέση των εξεταζόμενων μαζών και ως εκ τούτου να παραχθεί μαγνητική δύναμη στις χαμηλές φασματικές συνιστώσες. Συγκεκριμένα, η αλληλεπίδραση των AC μαγνητικών πεδίων συνεπάγεται μια διαμόρφωση πλάτους, η οποία δύναται να δημιουργήσει συνιστώσες μαγνητικής δύναμης σε αρκετά χαμηλότερες συχνότητες σε σχέση με τη θεμελιώδη συχνότητα που έχουν τα σήματα. Οι συνιστώσες αυτές αποτελούν ουσιαστικά θόρυβο, ο οποίος παρεμβάλλει στις μετρήσεις μαγνητικής δύναμης της αποστολής.

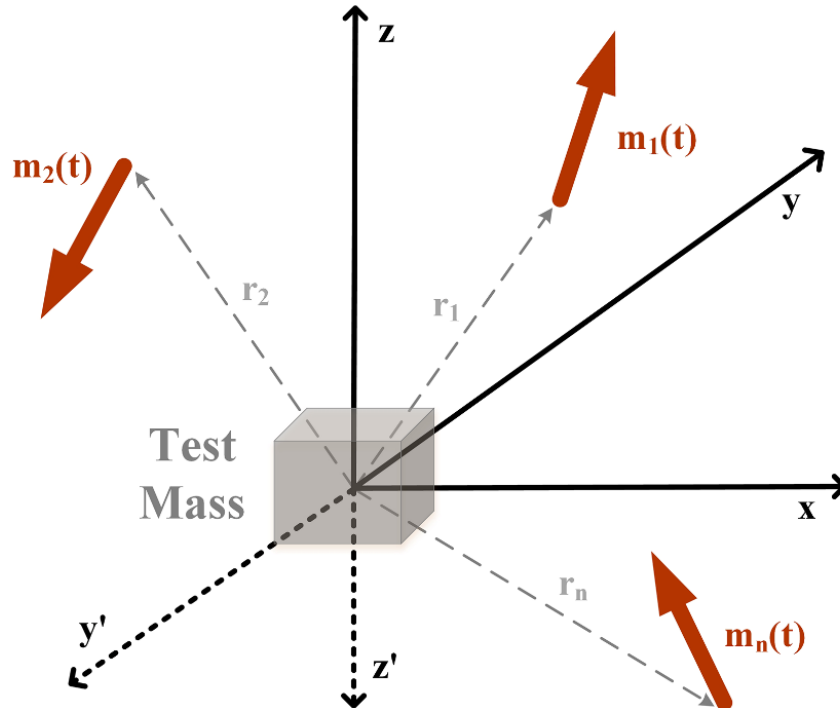
Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στη μαγνητική δύναμη, η οποία παράγεται στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων λόγω της αλληλεπίδρασης των μαγνητικών πεδίων μέσα σε ένα διαστημόπλοιο. Για τον σκοπό αυτό θεωρούνται ορισμένα μαγνητικά δίπολα, τα οποία τροφοδοτούνται με καθορισμένα ρεύματα υψηλής συχνότητας για λόγους προσομοίωσης. Στη συνέχεια, εξετάζεται η σύζευξη των παραγόμενων μαγνητικών πεδίων ώστε να καθοριστεί η συμβολή αυτής της μαγνητικής δύναμης στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων όπου πραγματοποιούνται και οι μετρήσεις της αποστολής.

### **3.2 Προσομοιωμένες μετρήσεις μαγνητικής δύναμης**

Για τη μελέτη του φαινομένου της παρεμβολής της μαγνητικής δύναμης, η οποία παράγεται από την αλληλοεπίδραση των μαγνητικών πεδίων που βρίσκονται μέσα στο διαστημόπλοιο, χρησιμοποιείται η διάταξη που απεικονίζεται στην Εικόνα 20 [23].

Θεωρούνται  $N$  μαγνητικές πηγές με ροπές  $\mathbf{m}_1(t), \mathbf{m}_2(t), \dots, \mathbf{m}_n(t)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  και μία δοκιμαστική μάζα, η οποία βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις πηγές αυτές. Οι χρονικές κατανομές των μαγνητικών ροπών που υλοποιούνται είναι δυνατόν να αντιστοιχούν στον εξοπλισμό που λειτουργεί μέσα στο αεροσκάφος ή στις διακυμάνσεις του ρεύματος που τον τροφοδοτεί. Εν συνεχεία, υπολογίζεται το πεδίο που παράγεται από τα μαγνητικά δίπολα  $\mathbf{B}_1(t), \mathbf{B}_2(t), \dots, \mathbf{B}_n(t)$  με βάση την Εξ. 35 στη θέση που βρίσκεται η δοκιμαστική μάζα. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η σύζευξη των παραγόμενων πεδίων που προκύπτουν από δύο μαγνητικές πηγές χρησιμοποιώντας την Εξ. 14. Η ανάλυση αυτή μπορεί να επεκταθεί και

για περισσότερες πηγές. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, θεωρείται πως η δοκιμαστική μάζα βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και οι εικονικές μαγνητικές πηγές στις θέσεις  $(-10, -10, -10)$  cm και  $(10, 5, 5)$  cm.



Εικόνα 20: Διάταξη για τη μελέτη της μαγνητικής δύναμης.

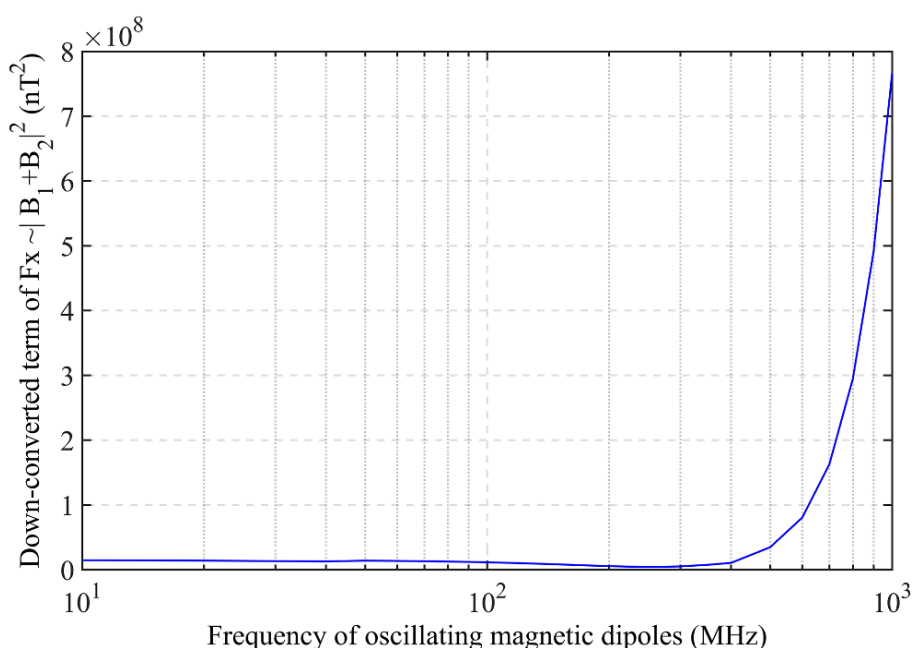
### 3.2.1 Σύζευξη μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από ημιτονοειδείς μαγνητικές ροπές

Αρχικά, θεωρείται πως οι μαγνητικές ροπές των δύο πηγών έχουν ημιτονοειδή μορφή με ίσες συχνότητες που κυμαίνονται από 10 MHz ως 1 GHz. Το σενάριο αυτό είναι κατάλληλο για μια βασική μελέτη ώστε έπειτα να είναι δυνατή η εξέταση επιπλέον χρονικών κατανομών της μαγνητικής ροπής π.χ. τετραγωνικός παλμός, θόρυβος κ.α. Αφού υπολογιστούν τα μαγνητικά πεδία που παράγονται με βάση την Εξ. 35, μελετάται η σύζευξή τους μέσω της σχέσης:

$$\delta F \sim |\delta(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2)|^2 = |\delta(\mathbf{B}_1^2 + \mathbf{B}_2^2 + 2\mathbf{B}_1\mathbf{B}_2)| \quad \text{Εξ. 38}$$

Εξετάζοντας την Εξ. 38, είναι εμφανές πως οι όροι  $\delta(\mathbf{B}_1^2 + \mathbf{B}_2^2)$  αντιστοιχούν στην DC συνιστώσα της μαγνητικής δύναμης, η οποία παράγεται πάνω στην εξεταζόμενη μάζα και δύναται να επηρεάσει τις μετρήσεις της αποστολής.

Επιπλέον, στην περίπτωση που οι συχνότητες των μαγνητικών πεδίων είναι ίσες ή πολύ κοντινές, ο όρος  $\delta(2\mathbf{B}_1\mathbf{B}_2)$  δημιουργεί φασματικές συνιστώσες της μαγνητικής δύναμης στο εύρος ζώνης πολύ κοντά στο DC. Για την παρούσα προσομοίωση, οι μαγνητικές ροπές είναι προσανατολισμένες στον z άξονα και έχουν χρονική εξάρτηση  $m_{1z} = m_1 \cdot \cos(2\pi ft)$  και  $m_{2z} = m_2 \cdot \cos(2\pi ft)$ , με πλάτη  $m_1 = 10 \text{ mAm}^2$  και  $m_2 = 1 \text{ mAm}^2$ , αντίστοιχα. Η συχνότητα ταλάντωσης των μαγνητικών ροπών  $f$  κυμαίνεται από 10 MHz ως 1 GHz. Όπως ήδη αναλύθηκε, είναι αναμενόμενο να προκύψουν DC όροι της μαγνητικής δύναμης σύμφωνα με την Εξ. 38. Στην Εικόνα 21 απεικονίζεται η παραγόμενη συνιστώσα της μαγνητικής δύναμης στην περιοχή του DC σε συνάρτηση με την συχνότητα ταλάντωσης της ροπής των μαγνητικών πηγών.



Εικόνα 21: Συνιστώσα  $|\delta(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2)|^2$  της μαγνητικής δύναμης συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης των μαγνητικών ροπών.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 21, η τιμή της χαμηλόσυχνης συνιστώσας της μαγνητικής δύναμης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα ταλάντωσης των μαγνητικών ροπών. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, διότι καθώς η συχνότητα ταλάντωσης αυξάνεται, αυξάνονται και οι τιμές του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου και συνεπώς και των όρων που αποτελούν τη συνιστώσα της μαγνητικής δύναμης η οποία βρίσκεται στο χαμηλό εύρος ζώνης. Έτσι λοιπόν, επιβεβαιώνεται το γεγονός πως η σύζευξη δύο μαγνητικών πεδίων υψηλής συχνότητας είναι δυνατόν να δημιουργήσει φασματικές συνιστώσες μαγνητικής δύναμης στο εύρος συχνοτήτων κοντά στο DC και συνεπώς να επηρεάσει τις μετρήσεις πάνω στις εξεταζόμενες

μάζες που η αποστολή στοχεύει να εκτελέσει στο συγκεκριμένο κομμάτι φάσματος.

### 3.2.2 Σύζευξη μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από τις μαγνητικές ροπές που ακολουθούν την Gauss κατανομή

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν δύο εικονικές μαγνητικές πηγές των οποίων οι μαγνητικές ροπές ακολουθούν κατανομή προσθετικού λευκού θορύβου Gauss (AWGN). Τα σήματα αυτά, τα οποία ουσιαστικά προσομοιώνουν τον θόρυβο που είναι παρών στο περιβάλλον του διαστημοπλοίου, έχουν την παρακάτω εξάρτηση στο πεδίο της συχνότητας:

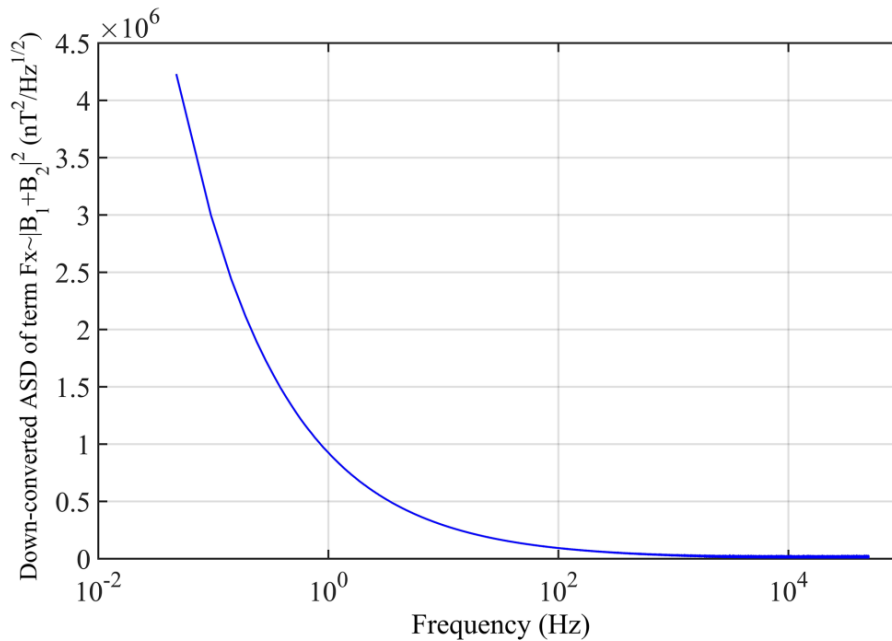
$$AWGN(f) = \sum_{i=1}^N \alpha \cdot DiracDelta(f_i), \quad \text{Εξ. 39}$$

όπου  $N$  είναι το πλήθος των φασματικών συνιστωσών που περιέχει το φάσμα του θορύβου και  $\alpha$  το πλάτος της εκάστοτε φασματικής συνιστώσας. Η τιμή της ισχύος της κάθε μαγνητικής ροπής επιλέγεται να είναι 60 dB κάτω από το μοναδιαίο σήμα αναφοράς. Ακολουθώς, υπολογίζεται ο ASD του όρου  $|\delta(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2)|^2$ , ο οποίος παράγει συνιστώσες της μαγνητικής δύναμης στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας τη φασματική απεικόνιση της αυτοσυσχέτισης του σήματος. Η αυτοσυσχέτιση ενός σήματος  $f(u)$  προκύπτει από τη συσχέτιση του σήματος με μια χρονικά καθυστερημένα εκδοχή του ίδιου και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_{ff}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u)\bar{f}(u - \tau)du, \quad \text{Εξ. 40}$$

όπου  $\bar{f}$  αναπαριστά τον συζυγή μιγαδικό και  $\tau$  είναι η χρονική καθυστέρηση. Η αυτοσυσχέτιση του λευκού θορύβου είναι απαραίτητη διαδικασία ώστε να εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός FFT και να υπολογιστεί με αυτόν τον τρόπο ο ASD του σήματος. Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται ο ASD του όρου  $|\delta(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2)|^2$  συναρτήσει της συχνότητας  $f$ .





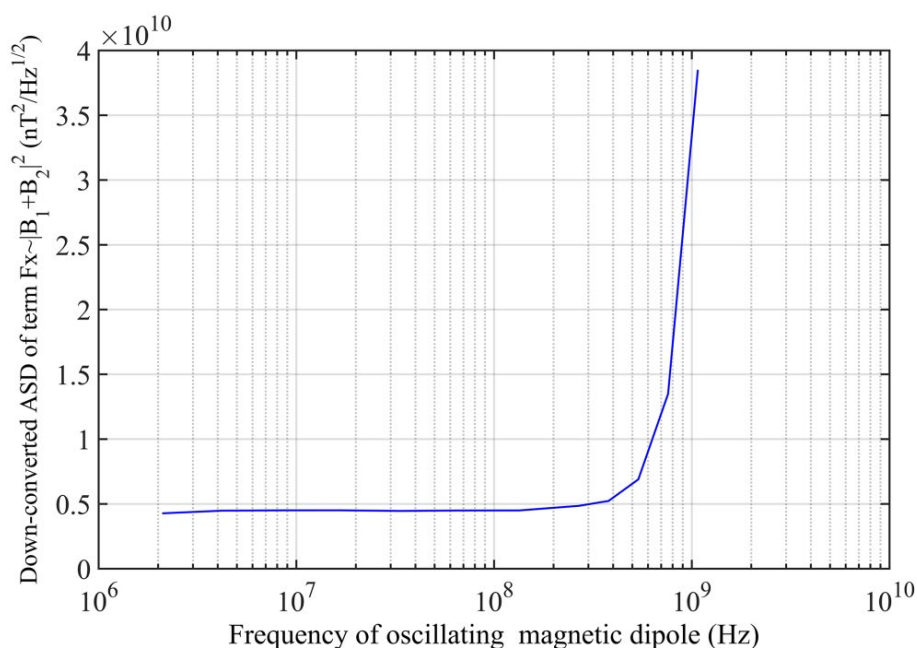
Εικόνα 22: ASD της συνιστώσας  $|\delta(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2)|^2$  της μαγνητικής δύναμης συναρτήσει της συχνότητας των μαγνητικών ροπών.

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, η παραγόμενη μαγνητική δύναμη που προκύπτει από τη σύζευξη των δύο μαγνητικών πεδίων παρουσιάζει σημαντικό φασματικό περιεχόμενο στις χαμηλές συχνότητες και ειδικά κάτω από το 1 Hz. Οι φασματικές συνιστώσες αυτές προκύπτουν όταν αλληλοεπιδρούν δύο σήματα θορύβου AWGN γειτονικών συχνοτήτων. Συνολικά, το φασματικό περιεχόμενο που παράγεται αποτελεί θόρυβο και άρα καθιστά το περιβάλλον μη κατάλληλο για αξιόπιστες μετρήσεις επιτάχυνσης των εξεταζόμενων μαζών.

### 3.2.3 Σύζευξη μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από ημιτονοειδή μαγνητική ροπή και μαγνητική ροπή που ακολουθεί την Gauss κατανομή

Στο τελευταίο μέρος των προσομοιώσεων, θεωρούνται πάλι δύο μαγνητικά δίπολα με ροπές προσανατολισμένες στον z άξονα. Η μαγνητική ροπή του ενός δίπολου έχει ημιτονοειδή μορφή, η οποία εκφράζεται ως  $m_z = m_0 \cdot \cos(2\pi f t)$ , με  $m_0 = 10 \text{ mA}\cdot\text{m}^2$ . Το δεύτερο δίπολο παρουσιάζει AWGN μαγνητική ροπή, σύμφωνα με την Εξ. 39 και η ισχύς της είναι 60 dB κάτω από τη μονάδα. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τις παραπάνω μαγνητικές πηγές στη θέση της δοκιμαστικής μάζας. Η χαμηλόσυχη συνιστώσα της μαγνητικής δύναμης που προκύπτει από την αλληλοεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων συναρτήσει

της συχνότητας ταλάντωσης του αντίστοιχου δίπολου φαίνεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Συνιστώσα  $|\delta(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2)|^2$  της μαγνητικής δύναμης συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης της μαγνητικής ροπής.

Είναι εμφανές πως η αλληλοεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων είναι ικανή να παράγει μαγνητική δύναμη στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων ακόμα και στην περίπτωση που ο θόρυβος βρίσκεται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με το ημιτονοειδές μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το άλλο μαγνητικό δίπολο. Ειδικά στην περίπτωση που η συχνότητα ταλάντωσης είναι υψηλή, η παραγόμενη μαγνητική δύναμη είναι αρκετά υψηλή και μπορεί να προκαλέσει σοβαρή παρεμβολή στις μετρήσεις δημιουργώντας θόρυβο επιτάχυνσης πάνω στις μάζες.

### 3.3 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο μελετά την παραγόμενη μαγνητική δύναμη σε διαστημικές αποστολές. Συγκεκριμένα, οι αποστολές αυτές σκοπεύουν να ανιχνεύσουν βαρυτικά κύματα μέσω της μέτρησης της επιτάχυνσης πάνω σε δύο δοκιμαστικές μάζες εξαιτίας των εξεταζόμενων δυναμικών φαινομένων. Εντούτοις, μέσα στο διαστημόπλοιο είναι δυνατό να αλληλοεπιδράσουν τα AC μαγνητικά πεδία που παράγονται από τον εξοπλισμό που υπάρχει και να προκύψει επιπλέον ανιχνεύσιμη μαγνητική δύναμη, η οποία ουσιαστικά παρεμβάλλει στις μετρήσεις της αποστολής. Εξετάζοντας το φαινόμενο αυτό,

μελετήθηκε αρχικά το σχετικό φυσικό και μαθηματικό υπόβαθρο. Στη συνέχεια, θεωρήθηκαν ορισμένα εικονικά μαγνητικά δίπολα, που αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία του εξοπλισμού ή την παρουσία θορύβου, και εξετάστηκε η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων που παράγουν χρησιμοποιώντας διαφορετικές κάθε φορά χρονικά μεταβαλλόμενες μαγνητικές ροπές. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, η σύζευξη δύο σημάτων με κοντινές συχνότητες δημιουργεί συνιστώσες της μαγνητικής δύναμης στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων μέσω της AM διαμόρφωσης που λαμβάνει χώρα. Επιπλέον, η αύξηση της συχνότητας των μαγνητικών ροπών συνεπάγεται αύξηση της τιμής της DC συνιστώσας της μαγνητικής δύναμης. Σε κάθε περίπτωση, το φασματικό περιεχόμενο της μαγνητικής δύναμης που παράγεται θεωρείται σημαντικό και ενισχύει τον θόρυβο του περιβάλλοντος στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις της αποστολής. Η επέκταση της παραπάνω ανάλυσης είναι ικανή να προσδιορίσει την επίδραση της σύζευξης των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από τις ηλεκτρομαγνητικές πηγές του διαστημοπλοίου στις μετρήσεις της δυναμικών φαινομένων της αποστολής ώστε οι παραγόμενες συνιστώσες να μειωθούν στο ελάχιστο και να μη ληφθούν υπόψιν αφού αποτελούν θόρυβο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4. ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

#### 4.1 Εισαγωγή

Πολλές διαστημικές αποστολές θέτουν αυστηρές απαιτήσεις για μαγνητική καθαρότητα των αργά χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων. Το εύρος συχνοτήτων το οποίο εξετάζεται έχει συνήθως άνω όριο μερικές δεκάδες KHz, ενώ το κατώτερο όριο εκτείνεται κάτω από την περιοχή των sub-mHz που αντιστοιχεί σε χρονικές περιόδους ωρών ή και περισσότερο. Είναι λοιπόν απαραίτητο να μετρηθούν οι μαγνητικές εκπομπές κάθε συσκευής του διαστημοπλοίου ώστε αυτή να χαρακτηριστεί και στη συνέχεια να παραχθεί ένα μοντέλο κατάλληλο να περιγράψει και να προβλέψει τη μαγνητική της συμπεριφορά. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται σε κοντινή απόσταση από τη συσκευή ώστε να επιτευχθεί υψηλός σηματοθορυβικός λόγος SNR και συνήθως εκτελούνται σε αρκετά σημεία γύρω από την εξεταζόμενη συσκευή για να διασφαλιστεί η επαρκής κάλυψή της.

Αρκετές μέθοδοι έχουν υλοποιηθεί για τον προσδιορισμό «μαγνητικά καθαρών» σημείων [25] [26] [27]. Η επικρατούσα προσέγγιση βασίζεται στην τεχνική του μοντέλου πολλαπλών μαγνητικών δίπολων MDM, σύμφωνα με την οποία θεωρείται πως μια συσκευή μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν μικρό αριθμό μαγνητικών δίπολων. Χρειάζεται να σημειωθεί πως η προσέγγιση με την τεχνική MDM δεν είναι ενδεικνυόμενη για όλες τις μαγνητικές πηγές του διαστημοπλοίου, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στις ηλιακές συστοιχίες, η επεξεργασία χρειάζεται να γίνει με τον νόμο Biot-Savart λόγω των ηλεκτρικών ρευμάτων που ρέουν στη συσκευή [8]. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η τεχνική MDM υλοποιείται με την στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων PSO ώστε να εκτιμηθεί ένας αριθμός μαγνητικών δίπολων, τα οποία μπορούν να προσομοιάσουν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από μια συσκευή [20] στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων. Για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος έχουν εφαρμοσθεί επιτυχώς και άλλες μέθοδοι, όπως είναι η διαφορική εξέλιξη (Differential Evolution - DE). Για να εξαχθεί το μοντέλο απαιτείται ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των μαγνητικών πηγών, δηλαδή η θέση και η μαγνητική ροπή, χρησιμοποιώντας μετρήσεις κοντινού μαγνητικού

πεδίου της υπό εξέταση συσκευής. Το εκτιμώμενο μοντέλο είναι ικανό να μιμηθεί τη μαγνητική συμπεριφορά του διαστημικού εξοπλισμού. Παρόλο που η τεχνική MDM έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε περιπτώσεις DC μαγνητικών εκπομπών, τα AC μαγνητικά πεδία που παράγονται από μια συσκευή δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς για σκοπούς μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μια μεθοδολογία κατάλληλη για την κάλυψη των απαιτήσεων μαγνητικής καθαρότητας που αφορούν χαμηλόσυχρες AC μαγνητικές εκπομπές χρησιμοποιώντας επίγειες μετρήσεις αλλά και ήδη υπάρχουσες τεχνικές.

## 4.2 Περιγραφή της μεθόδου

Αρχικά, τα δύο μαγνητόμετρα εκτελούν μετρήσεις μαγνητικού πεδίου όταν η συσκευή βρίσκεται εκτός λειτουργίας, καταγράφοντας έτσι τον θόρυβο περιβάλλοντος. Έπειτα, αφού ενεργοποιηθεί η εξεταζόμενη συσκευή, καταγράφουν τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου  $B_{1x}(t)$ ,  $B_{1y}(t)$ ,  $B_{1z}(t)$  και  $B_{2x}(t)$ ,  $B_{2y}(t)$ ,  $B_{2z}(t)$  που παράγονται στο πεδίο του χρόνου σε όλα τα σημεία μέτρησης. Στη συνέχεια, αφού το μετρούμενο σήμα αποθρομβοποιηθεί με διάφορες αποτελεσματικές τεχνικές που εξαρτώνται από τη μορφή του σήματος, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier (FFT) ώστε να υπολογιστούν οι συνιστώσες του φάσματος για κάθε μέτρηση. Ακολούθως, το μαγνητικό πεδίο συγκρίνεται με το μαγνητικό πεδίο του περιβάλλοντος (background), το οποίο παραλλήλως έχει υποστεί αντίστοιχη διαδικασία επεξεργασίας. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των συχνοτήτων  $f_i$  των μαγνητικών εκπομπών της συσκευής, οι οποίες δεν είναι παρούσες στο περιβάλλον και ως εκ τούτου οφείλονται στη λειτουργία της συσκευής [22]. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου σε όλα τα σημεία μέτρησης χρησιμοποιούνται ώστε να προσδιορισθεί ένα μοντέλο κατάλληλο για να περιγράψει τη μαγνητική υπογραφή της συσκευής σε κάθε συχνότητα που έχει ανιχνευθεί. Συγκεκριμένα, η κάθε συχνότητα μπορεί να επεξεργαστεί ξεχωριστά λύνοντας ένα DC αντίστροφο πρόβλημα ώστε οι τιμές του μαγνητικού πεδίου να μοντελοποιηθούν σύμφωνα με την τεχνική MDM.

Το μοντέλο για την κάθε συχνότητα αποτελείται από έναν μικρό αριθμό μαγνητικών δίπολων  $N_{dip}$  και το φάσμα που παράγεται από αυτά είναι ικανό να προσομοιώσει τις πραγματικές μετρήσεις μαγνητικού πεδίου  $B_{measured}$  της πηγής που πραγματοποιήθηκαν. Οι παράμετροι των μαγνητικών δίπολων που πρέπει να εκτιμηθούν για την κάθε συχνότητα  $f_i$  είναι η θέση  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$  και η μαγνητική ροπή  $(m_{x_{ij}}, m_{y_{ij}}, m_{z_{ij}})$ , όπου το  $i$  αναφέρεται στην εκάστοτε συχνότητα που μελετάται και  $j=1,2,...,N$  είναι το πλήθος των μαγνητικών

δίπολων που επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν στο εκάστοτε πρόβλημα μοντελοποίησης. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην Εξ. 35 ώστε να εκτιμήσει τις παραμέτρους του μοντέλου χρησιμοποιώντας τις τιμές του μαγνητικού πεδίου στα σημεία παρατήρησης, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για κάθε συχνότητα. Ο στοχαστικός αλγόριθμος PSO στοχεύει στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να προσδιορίσει τις επιθυμητές μεταβλητές. Συγκεκριμένα, η PSO χρησιμοποιεί σωματίδια, τα οποία κινούνται με μια ταχύτητα στον χώρο αναζήτησης και χαρακτηρίζονται από ένα διάνυσμα θέσης  $\mathbf{D}_i$ , το οποίο αποτελείται από τα στοιχεία  $(x_j, y_j, z_j, mx_j, my_j, mz_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_{dip}$  και μπορεί να αποτελεί λύση στο πρόβλημα. Στο αρχικό στάδιο του αλγορίθμου αποδίδονται τυχαίες θέσεις και ροπές στο διάνυσμα  $\mathbf{D}_i$ . Τα σωματίδια κινούνται στον χώρο αναζήτησης, ανταλλάσσουν πληροφορίες και επαναπροσδιορίζουν τις ταχύτητές τους. Οι ταχύτητες αλλάζουν σύμφωνα με τη βέλτιστη λύση του κάθε σωματιδίου (personal best) αλλά και τη βέλτιστη λύση που προκύπτει από όλο το πλήθος σωματιδίων (global best). Όταν ολοκληρωθούν οι απαραίτητες επαναλήψεις αυτής της διαδικασίας, το σμήνος σωματιδίων συγκλίνει στη βέλτιστη καθολική λύση  $gbest$ . Η λύση  $B_{modeled}$  προκύπτει από την Εξ. 35 για τη μοντελοποίηση με τη χρήση μαγνητικών δίπολων. Η Εξ. 35 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια καθώς τα μαγνητικά πεδία που μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αντιστοιχούν στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων όπου το πεδίο θεωρείται σχεδόν στατικό.

Σε κάθε περίπτωση, χρειάζεται να οριστεί μια συνάρτηση κόστους ικανή να εκτιμά την ποιότητα των λύσεων και συνεπώς την απόδοση του αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος PSO προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση  $F$ , καθώς επιλύεται ξεχωριστά για την κάθε επιλεγμένη συχνότητα  $f_i$ :

$$F = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^M (B_{modeled}(l, k) - B_{measured}(l, k))^2, \quad \text{Εξ. 41}$$

όπου  $M$  το πλήθος των σημείων μέτρησης και η μεταβλητή  $k = 1, 2, 3$  αντιστοιχεί στους άξονες  $x, y, z$  καθώς τα μαγνητόμετρα είναι τριαξονικά και καταγράφουν και τις τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου.

Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν η αντικειμενική συνάρτηση  $F$  ελαχιστοποιηθεί γεγονός που υποδηλώνει ότι το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από το εκτιμώμενο μοντέλο είναι ικανό να μιμηθεί το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο του πραγματικού εξοπλισμού στην εκάστοτε συχνότητα  $f_i$ .

Επιπρόσθετα, για την αξιολόγηση της καλύτερης προβλεπόμενης λύσης υπολογίζεται η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square

Error – RMS) μεταξύ του προβλεπόμενου και του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου στο φάσμα, με τον μέσο όρο να αντιστοιχεί στο πλήθος των σημείων μέτρησης  $M$  και τις τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot M} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^M (B_{modeled}(l, k) - B_{measured}(l, k))^2}, \quad \text{Εξ. 42}$$

Επιπλέον, χρησιμοποιείται ένα ακόμα κριτήριο για την αξιολόγηση της προκύπτουσας λύσης. Η συνάρτηση GoF (Goodness of Fit) υπολογίζει τη σχετική απόκλιση μεταξύ του προβλεπόμενου και του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου στο πεδίο της συχνότητας:

$$GoF = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^M (B_{modeled}(l, k) - B_{measured}(l, k))^2}{\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^M (B_{measured}(l, k))^2}}, \quad \text{Εξ. 43}$$

Τα εκτιμώμενα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω επεξεργασία. Συγκεκριμένα, είναι δυνατός ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου στις προσδιορισμένες συχνότητες λειτουργίας της συσκευής σε απομακρυσμένα σημεία ενδιαφέροντος. Αυτό το βήμα είναι σημαντικό ώστε να προσδιορισθούν τα σημεία του χώρου μέσα στο αεροσκάφος, όπου είναι απαραίτητο να υπάρχει μαγνητική καθαρότητα.

### 4.3 Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται η επεξεργασία και η διαδικασία μοντελοποίησης των μετρούμενων μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από πραγματικό διαστημικό εξοπλισμό. Τα αποτελέσματα επαληθεύουν την ικανότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας να μπορεί να παράγει μοντέλα κατάλληλα να προσομοιώσουν τη μαγνητική συμπεριφορά της εκάστοτε συσκευής. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιούνται δύο μαγνητόμετρα, τα οποία καταγράφουν τις τρεις συνιστώσες του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου  $B_{1x}(t)$ ,  $B_{1y}(t)$ ,  $B_{1z}(t)$  και  $B_{2x}(t)$ ,  $B_{2y}(t)$ ,  $B_{2z}(t)$  στο πεδίο του χρόνου. Τα μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται είναι είτε τύπου Fluxgate είτε τύπου Search Coil με συχνότητες δειγματοληψίας 10 KHz και 500 KHz, αντίστοιχα. Επίσης, η διάταξη για τη διεξαγωγή των μετρήσεων είναι η προτεινόμενη σύμφωνα με την Εικόνα 7 και είναι τοποθετημένη σε μια εγκατάσταση MCF. Όπως είναι εμφανές σε κάθε περίπτωση, τα δύο



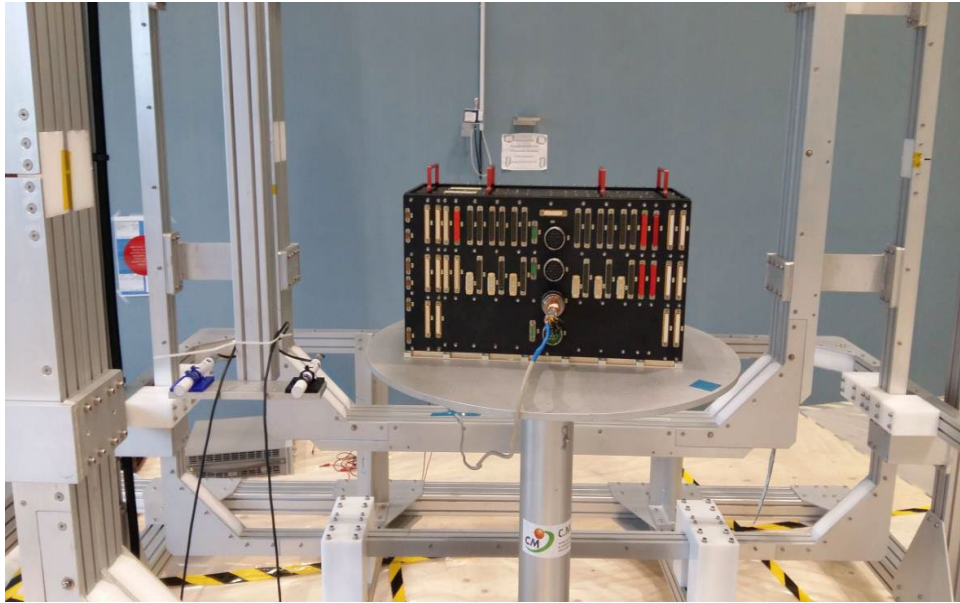
μαγνητόμετρα βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους (τεχνική των δύο μαγνητομέτρων- gradiometer configuration) και μετρούν ταυτόχρονα τόσο τις μαγνητικές εκπομπές της υπό εξέταση συσκευής όσο και όλες τις AC διακυμάνσεις των μαγνητικών πεδίων που είναι παρόντα κατά τη διάρκεια της μέτρησης, όπως είναι το μαγνητικό πεδίο της Γης ή άλλος τεχνικός εξοπλισμός [21]. Ο υπολογισμός της διαφοράς των μετρούμενων μαγνητικών πεδίων από τα δύο μαγνητόμετρα επιτρέπει την απομάκρυνση αυτών των AC διακυμάνσεων του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος και συνεπώς δεν θα ληφθούν υπόψιν στη συνέχεια της διαδικασίας [6].

Αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου, υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ των μαγνητικών πεδίων που μετρούνται ταυτόχρονα από τα δύο μαγνητόμετρα, για λόγους αποθορυβοποίησης όπως αναφέρθηκε. Επιπλέον, για περαιτέρω αποθορυβοποίηση του σήματος δύναται να εφαρμοσθεί φίλτράρισμα των εκπομπών που οφείλονται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας στις συχνότητες 50 Hz και στις αρμονικές (100 Hz, 150 Hz κ.α.) και αφαίρεση της DC συνιστώσας του μετρούμενου σήματος. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier (FFT) και το προκύπτον φάσμα του μαγνητικού πεδίου συγκρίνεται με το φάσμα του περιβάλλοντος. Με τη βοήθεια μιας καθορισμένης διαδικασίας, που θα παρουσιαστεί στην επόμενη παράγραφο, ανιχνεύονται οι συχνότητες που αντιστοιχούν στη λειτουργία της συσκευής, μελετώνται και εξάγεται ένα μοντέλο που είναι δυνατό να αναπαράγει το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο στην εκάστοτε ανιχνευμένη συχνότητα.

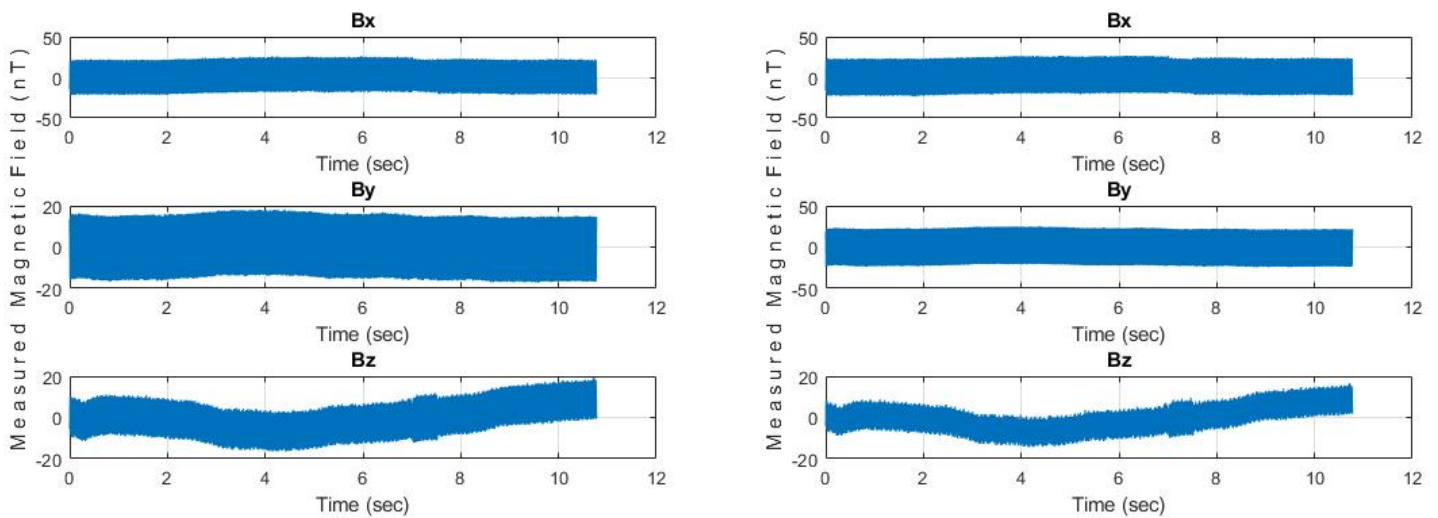
#### **4.3.1 Μονάδα διατήρησης και διανομής ισχύος (PCDU)**

Αρχικά, η συσκευή που υποβάλλεται σε μετρήσεις είναι η μονάδα διατήρησης και διανομής ισχύος στο διαστημόπλοιο (Power Conditioning and Distribution Unit - PCDU). Τα μαγνητόμετρα εκτελούν μετρήσεις μαγνητικού πεδίου στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων, όταν η υπό μέτρηση συσκευή βρίσκεται σε σταθερή λειτουργία. Η διάταξη των μετρήσεων απεικονίζεται στην Εικόνα 24. Τα μαγνητόμετρα είναι τύπου Fluxgate και βρίσκονται σε αποστάσεις 56 cm και 90 cm από το κέντρο του τραπέζιου. Οι μετρήσεις εκτελούνται σε δύο επίπεδα, σε ύψη 10 cm και -10 cm, καθώς περιστρέφεται το τραπέζι πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένος ο εξοπλισμός.

Τα μαγνητόμετρα πραγματοποιούν μετρήσεις για χρονικό διάστημα περίπου ίσο με 10 sec. Ακολούθως, αφαιρείται η DC συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου και τα προκύπτοντα σήματα για τα δύο μαγνητόμετρα, όταν η συσκευή δεν έχει ξεκινήσει την περιστροφή, δηλαδή βρίσκεται στις 0°, παρουσιάζονται στην Εικόνα 25.

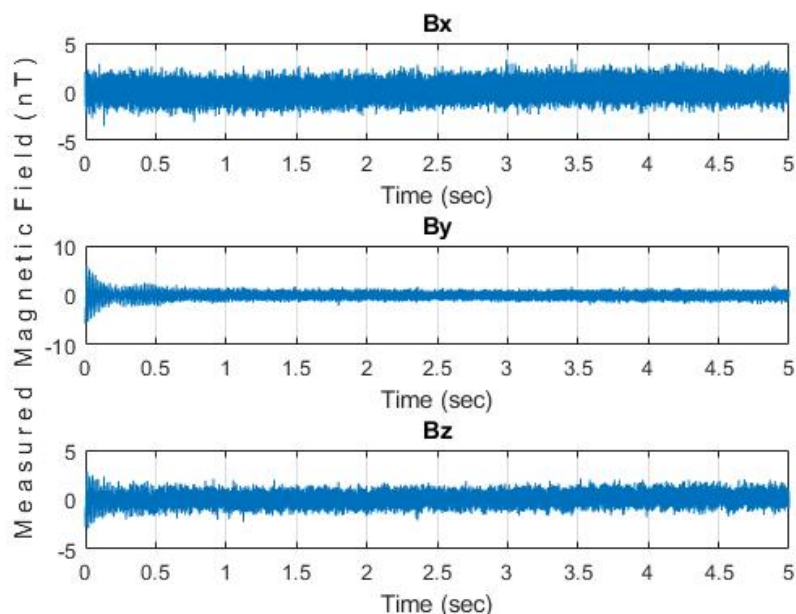


*Εικόνα 24: Διάταξη για την πραγματοποίηση μετρήσεων AC μαγνητικού πεδίου του PCDU με Fluxgate Magnetometers (εργαστήριο Thales Alenia).*



*Εικόνα 25: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο του PCDU σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας με Fluxgate Magnetometer-κοντινό (αριστερά) και μακρινό μαγνητόμετρο (δεξιά).*

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ των μαγνητικών πεδίων που μετρώνται ταυτόχρονα για όλες τις γωνίες περιστροφής. Επιπλέον, το σήμα υποβάλλεται σε φιλτράρισμα των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή τα 50 Hz και τις αρμονικές. Με αυτούς τους τρόπους το μαγνητικό πεδίο προκύπτει αποθρομβοποιημένο και απεικονίζεται ενδεικτικά για την περίπτωση που η συσκευή δεν έχει ξεκινήσει να περιστρέφεται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26: Μαγνητικό πεδίο PCDU σε σταθερή λειτουργία έπειτα από τις τεχνικές αποθορυβοποίησης.

Η ίδια διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων ακολουθείται ταυτόχρονα για τον θόρυβο περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το φάσμα του σήματος μέσω του FFT και συγκρίνεται με το φάσμα του θορύβου περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ένα εξομαλυμένο προφίλ θορύβου κατάλληλο για την παραπάνω σύγκριση [22]. Για τον συγκεκριμένο υπολογισμό χρησιμοποιείται η μεταβλητή  $S_{BW}$ , η οποία είναι διαφορετική για κάθε εύρος ζώνης του εξεταζόμενου φάσματος. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές της μεταβλητής  $S_{BW}$  που χρησιμοποιήθηκαν για τα διάφορα εύρη συχνοτήτων.

Πίνακας 2: Παράμετρος  $S_{BW}$  για τα διαφορετικά εύρη ζώνης.

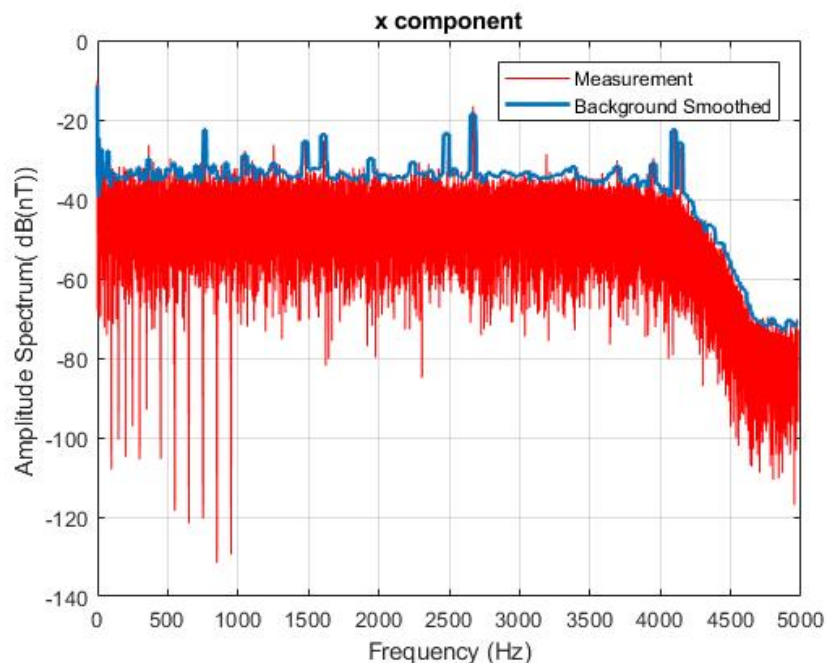
Frequency Range (Hz)	$S_{BW}$ (Hz)
<b>0.1 – 1</b>	0.1
<b>1 – 10</b>	1
<b>10 – 100</b>	5
<b>100 – 1000</b>	10
<b>1000 – 5000</b>	20

Κάθε δείγμα συχνότητας  $f_i$  του φάσματος του θορύβου περιβάλλοντος αντιστοιχεί σε ένα από τα εύρη ζώνης του Πίνακα 2 :

$$f_i - S_{BW} < f_i < f_i + S_{BW},$$

Εξ. 44

Η τιμή του φάσματος για το κάθε επιλεγμένο δείγμα  $f_i$  συγκρίνεται με τις υπόλοιπες τιμές φάσματος, που αντιστοιχούν στις συχνότητες του εκάστοτε εύρους ζώνης της Εξ. 44, και η μεγαλύτερη τιμή επιλέγεται για να αντιπροσωπεύσει την τιμή φάσματος του εξομαλυμένου προφίλ θορύβου στην συχνότητα  $f_i$ . Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα δείγματα της συχνότητας και στη συνέχεια το εξομαλυμένο προφίλ του θορύβου συγκρίνεται με το φάσμα του μαγνητικού πεδίου, όπως ενδεικτικά φαίνεται στην Εικόνα 27 για τη  $x$  συνιστώσα.



Εικόνα 27: Μαγνητικό πεδίο του PCDU σε σταθερή λειτουργία σε σύγκριση με το προφίλ θορύβου του περιβάλλοντος.

Στόχος του αλγορίθμου αυτού είναι καταρχάς να ανιχνεύσει ποιες συνιστώσες μεγάλου πλάτους των μαγνητικών εκπομπών του PCDU δεν αντιστοιχούν στο προφίλ θορύβου και ως εκ τούτου οφείλονται στη λειτουργία του. Επιπλέον, η εξομάλυνση που εφαρμόζεται στο σήμα του θορύβου περιβάλλοντος επιτρέπει την αποφυγή της εσφαλμένης ερμηνείας συνιστωσών του που βρίσκονται σε γειτονικές συχνότητες στο φάσμα του μαγνητικού πεδίου της συσκευής που ενδέχεται να αναγνωρισθούν εσφαλμένα ως εκπομπές της. Συνεπώς, η μεταβλητή εύρους ζώνης  $S_{BW}$  που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση χρειάζεται να αυξάνεται καθώς αυξάνεται το εύρος ζώνης που εξετάζεται. Η σύγκριση αυτή γίνεται και για τις τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου

που παράγεται από τη συσκευή, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες συνιστώσες του προφίλ θορύβου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε όλα τα σημεία παρατήρησης.

Επιπλέον, επιλέγεται ένα κατώφλι πάνω από το επίπεδο θορύβου, το οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό των πραγματικών εκπομπών της συσκευής. Συγκεκριμένα, οι συχνότητες στις οποίες οι φασματικές συνιστώσες ξεπερνούν αυτό το κατώφλι, και όχι απλά το επίπεδο θορύβου, χαρακτηρίζονται ως οι συχνότητες οι οποίες αντιστοιχούν στη λειτουργία του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, αν το κατώφλι θορύβου οριστεί στα 8 dB, τότε ως συχνότητες λειτουργίας του PCDU ανιχνεύονται οι συχνότητες, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

*Πίνακας 3: Εντοπισμένες συχνότητες λειτουργίας του PCDU για 8 dB κατώφλι θορύβου.*

<b>Identified Frequencies (Hz)</b>
1260
3200

Ακολούθως, για κάθε ανιχνευμένη συχνότητα χρησιμοποιούνται οι μέγιστες τιμές πλάτους στο εκάστοτε εύρος ζώνης που μελετάται σύμφωνα με την Εξ. 44. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται και για τις τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου και για όλα τα σημεία παρατήρησης. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου σε όλα τα σημεία συνιστούν την είσοδο για τη στοχαστική μέθοδο PSO που έχει ως στόχο να προσδιορίσει ένα μοντέλο που να προσομοιάζει τη μαγνητική συμπεριφορά της συσκευής στην κάθε επιλεγμένη συχνότητα. Και για τις δύο διαδικασίες μοντελοποίησης, δηλαδή μία για την κάθε συχνότητα λειτουργίας, χρησιμοποιούνται μόνο οι έξι διπλές μετρήσεις των σημείων παρατήρησης που βρίσκονται στον πάνω κύκλο. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός πως η μετρητική διάταξη περιλαμβάνει αγωγίμο επίπεδο και ως εκ τούτου αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψιν στην παραγωγή μοντέλου. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται βασίζεται στη θεωρία των ειδώλων και αναλύεται εκτενώς στο κεφάλαιο 7. Η θεωρία των ειδώλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο στον χώρο πάνω από το αγωγίμο επίπεδο, όπου είναι τοποθετημένη η μαγνητική πηγή. Συνεπώς, λόγω της συγκεκριμένης διάταξης, οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε επίπεδο κάτω από την αγωγίμη επιφάνεια απορρίπτονται και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία της μοντελοποίησης. Επιπλέον, επιλέγεται η συνεισφορά δύο μαγνητικών δίπολων για την κάθε συχνότητα και επιχειρείται ταύτιση των μέτρων των μετρούμενων και μοντελοποιημένων τιμών του μαγνητικού πεδίου. Οι

εκτιμώμενες παράμετροι των μοντέλων καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 και Πίνακα 5, αντίστοιχα.

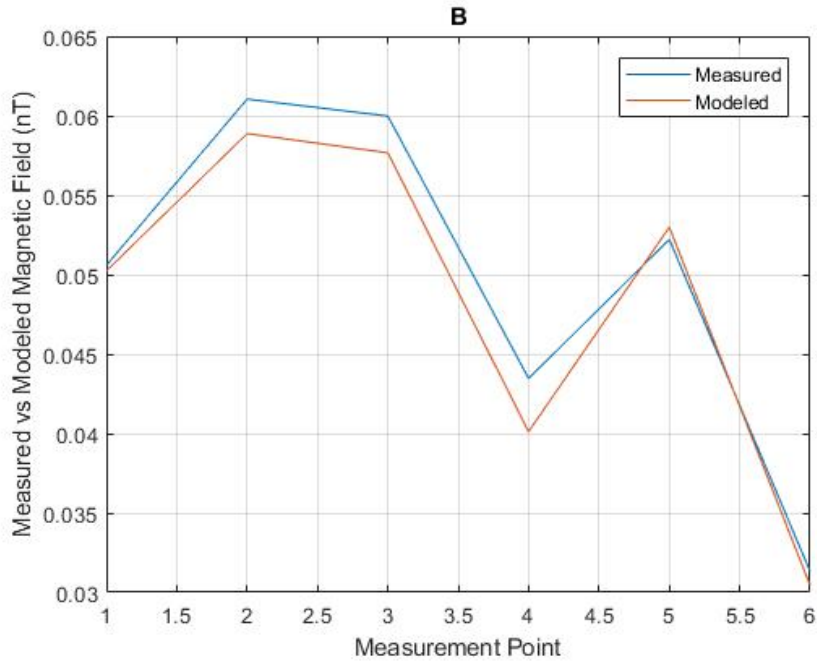
Πίνακας 4: Παράμετροι μοντέλων μαγνητικών δίπολων για κάθε συχνότητα λειτουργίας του PCDU.

Frequency (Hz)	1260		3200	
	1	2	1	2
<b>Dipole</b>				
<b>x (cm)</b>	1.2848	-0.3981	0.2952	2.3142
<b>y (cm)</b>	-1.9452	-2.9495	1.7438	-2.6818
<b>z (cm)</b>	0.2727	0.0982	0.4007	0.1413
<b>mx (mAm<sup>2</sup>)</b>	-0.105	0.0863	-0.0234	0.0516
<b>my (mAm<sup>2</sup>)</b>	-0.0694	0.0993	-0.0251	0.0172
<b>mz (mAm<sup>2</sup>)</b>	-0.5098	2.8161	0.2729	-0.1916

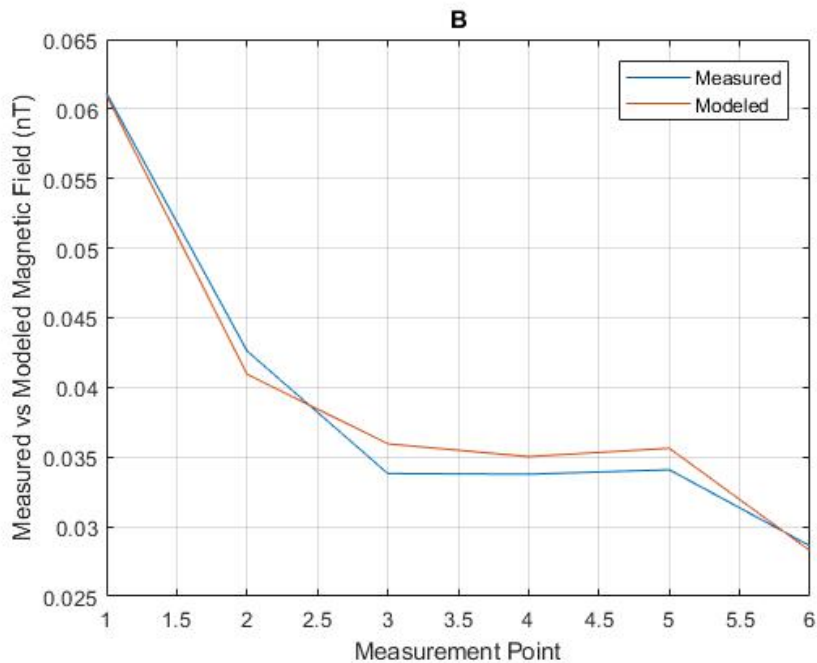
Πίνακας 5: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενων μοντέλων για κάθε συχνότητα λειτουργίας του PCDU.

Frequency (Hz)	Field RMS (nT)	GoF (%)
<b>1260</b>	0.0024	3.838
<b>3200</b>	0.0015	3.419

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στη διαδικασία μοντελοποίησης λαμβάνεται υπόψιν και η επίδραση του αγωγίμου περιστρεφόμενου τραπεζιού πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένη η συσκευή. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η αποσυσχέτιση του εκτιμώμενου μοντέλου από την εγκατάσταση στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Στις Εικόνα 28 και Εικόνα 29, παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου του μετρούμενο και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου στα 6 διπλά σημεία παρατήρησης για κάθε συχνότητα λειτουργίας του PCDU που ανιχνεύθηκε.



Εικόνα 28: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο (μέτρο) για τη συχνότητα 1260 Hz-PCDU.



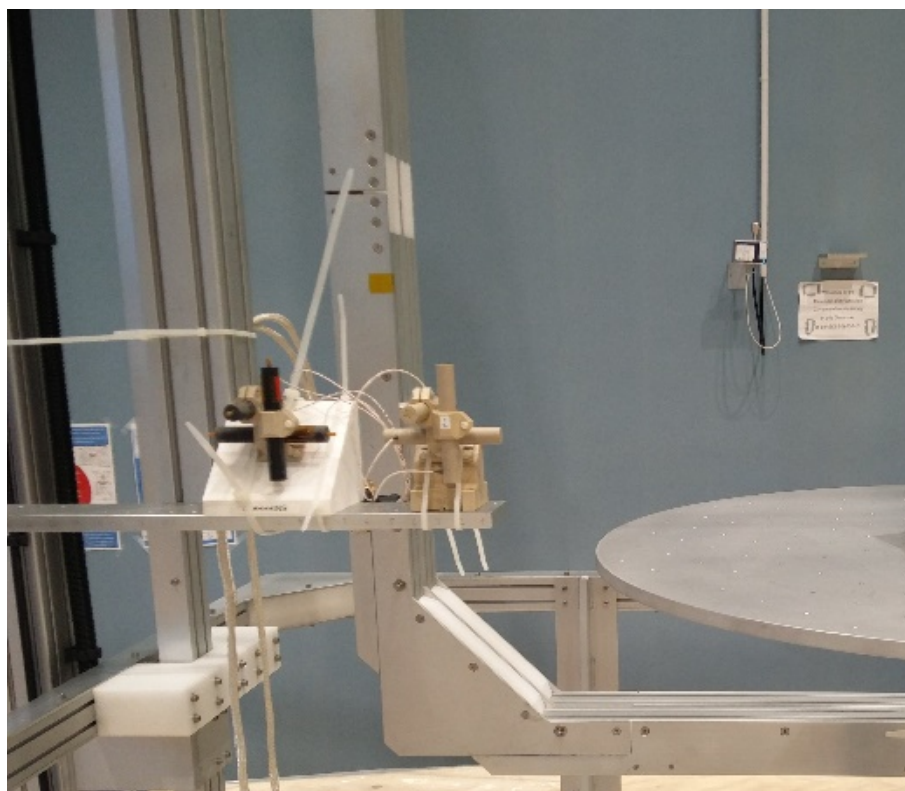
Εικόνα 29: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο (μέτρο) για τη συχνότητα 3200 Hz-PCDU.

Όπως εύκολα παρατηρείται, οι εκτιμώμενες παράμετροι των μοντέλων στις προσδιορισμένες συχνότητες μπορούν να αναπαράγουν αποτελεσματικά το μετρούμενο φάσμα του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το PCDU.

Επίσης, τα αντίστοιχα χαμηλά σφάλματα RMS και GoF (<10%) επιβεβαιώνουν πως τα προκύπτοντα μοντέλα είναι ικανά να περιγράψουν τη μαγνητική υπογραφή του PCDU.

#### **4.3.2 Μονάδα διαχείρισης εντολών και δεδομένων (CDMU)**

Στη συνέχεια, η συσκευή που εξετάζεται σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας είναι η Μονάδα Διαχείρισης Εντολών και Δεδομένων (Command & Data Handling Management Unit-CDMU). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιούνται μαγνητόμετρα τύπου Search Coil σε διάταξη όμοια με της υποενότητας 4.3.1. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων τα SCM μαγνητόμετρα βρίσκονται σε αποστάσεις περίπου 55,6 cm και 71,6 cm από το κέντρο του τραπέζιου και σε ύψη 10 cm και -10 cm. Η διάταξη που χρησιμοποιείται απεικονίζεται στην Εικόνα 30.



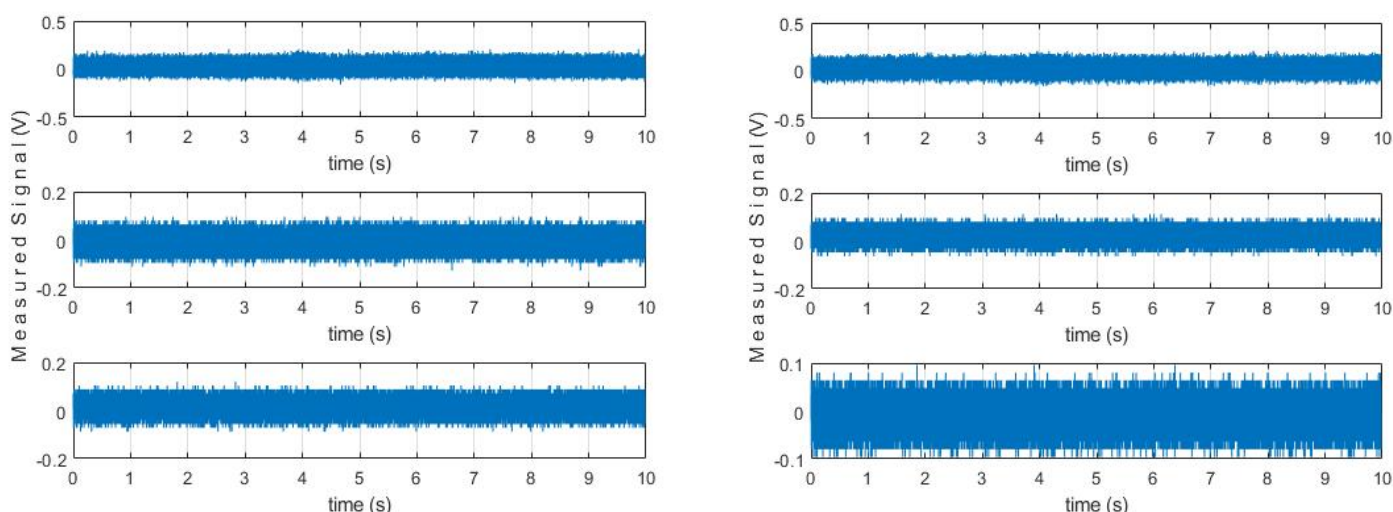
*Εικόνα 30: SCM μαγνητόμετρα τοποθετημένα σύμφωνα με την τεχνική των δύο μαγνητομέτρων ώστε να καταγράφουν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το CDMU (εργαστήριο Thales Alenia).*

Αρχικά, τα Search Coil μαγνητόμετρα καταγράφουν τις τρεις συνιστώσες των σημάτων που παράγονται κατά τη λειτουργία της συσκευής σε διάρκεια 10 sec



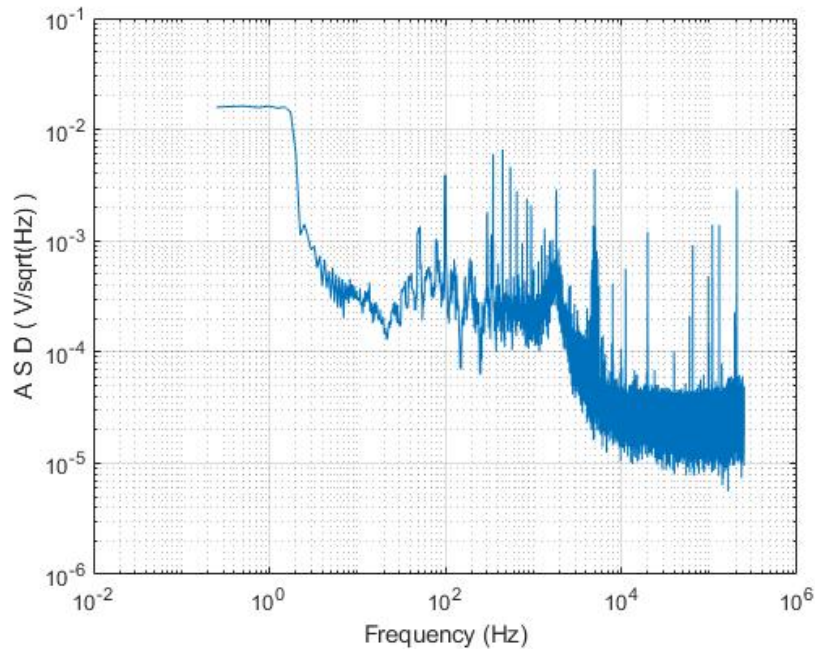
καθώς περιστρέφεται στα δύο διαφορετικά επίπεδα. Επιπλέον, εκτελούνται μετρήσεις και όταν η συσκευή δεν βρίσκεται σε λειτουργία, αποκτώντας έτσι πληροφορία για τον θόρυβο περιβάλλοντος. Τα δύο μαγνητόμετρα μετρούν αναλογική τάση και στην Εικόνα 31 απεικονίζονται τα σήματα αυτά για περιστροφή του CDMU κατά  $0^\circ$  σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί πως δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ των δύο σημάτων, όπως εφαρμόστηκε στην περίπτωση των Fluxgate μαγνητομέτρων για λόγους αποθρομβοποίησης. Αυτό οφείλεται στο ότι το σήμα που μετράται σε Volts δεν αντιστοιχεί απευθείας σε μονάδες μέτρησης μαγνητικού πεδίου και χρησιμοποιούνται κατάλληλες συναρτήσεις μεταφοράς ώστε να μετατραπούν τα *Volts* σε  $nT/\sqrt{Hz}$ , οι οποίες είναι διαφορετικές για κάθε μαγνητόμετρο [9].



*Εικόνα 31: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο του CDMU σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας με Search Coil μαγνητόμετρα-κοντινό (αριστερά) και μακρινό μαγνητόμετρο (δεξιά).*

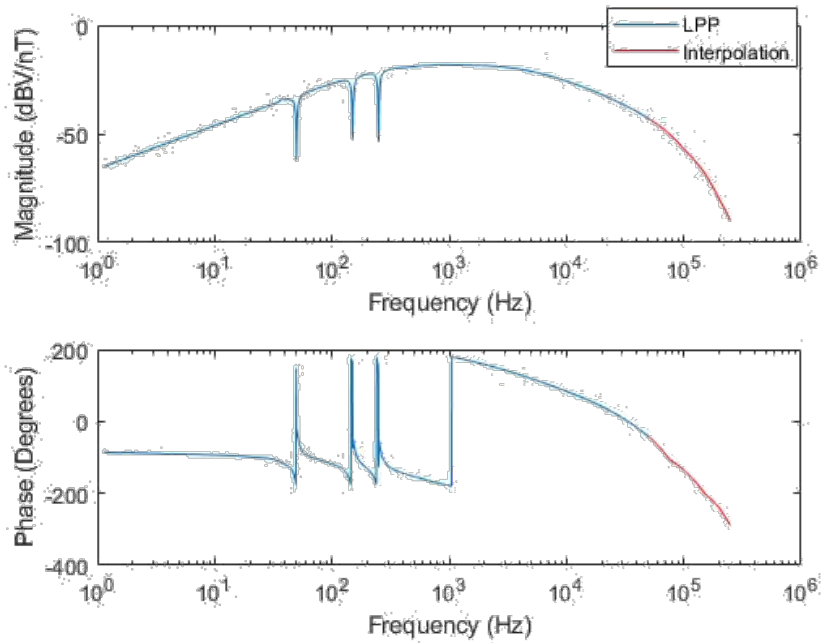
Στη συνέχεια, υπολογίζεται το φάσμα των μετρούμενων σημάτων. Στην Εικόνα 32 απεικονίζεται ενδεικτικά η  $\chi$ -συνιστώσα του ASD του σήματος, που μετράται στο κοντινό μαγνητόμετρο όταν η συσκευή βρίσκεται σε  $0^\circ$  γωνία περιστροφής.



Εικόνα 32: x- συνιστώσα του ASD του μετρούμενου σήματος -κοντινό μαγνητόμετρο.

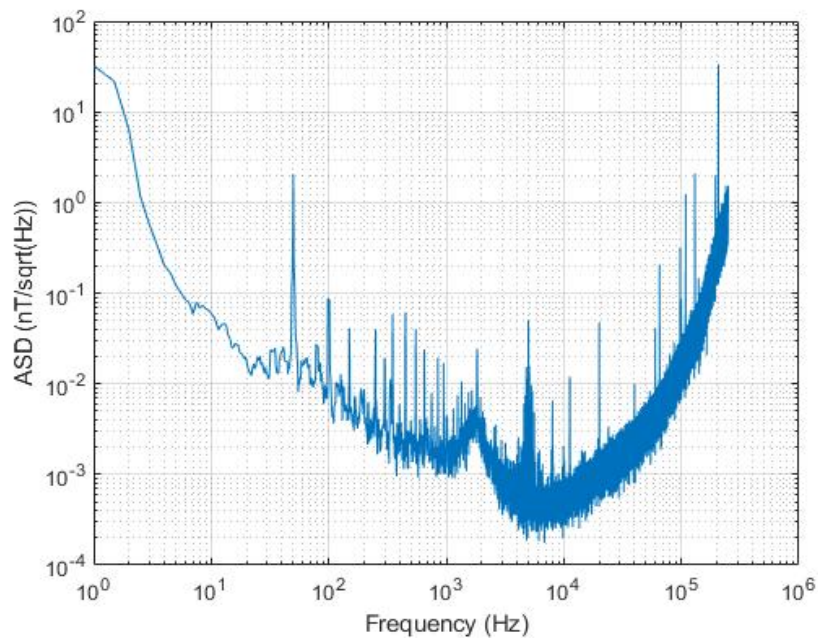
Ο υπολογισμός της φασματικής πυκνότητας πλάτους είναι απαραίτητος ώστε να εφαρμοστεί η κατάλληλη συνάρτηση μεταφοράς, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 1.5.3. Το προκύπτον σήμα αντιστοιχεί σε μονάδες μαγνητικού πεδίου και προκύπτει από την Εξ. 1.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι διαφορετικές για κάθε μαγνητόμετρο αλλά και κάθε συνιστώσα. Επιπλέον, οι συναρτήσεις μεταφοράς που παρέχονται από την LPP αφορούν το εύρος ζώνης από 1 Hz έως 51 KHz [9]. Εντούτοις, η συχνότητα δειγματοληψίας των 500 KHz μπορεί να προσφέρει εκτίμηση του φάσματος έως τα 250 KHz. Γι' αυτόν τον λόγο, επεκτείνεται το εύρος ζώνης μέχρι τα 250 KHz μέσω γραμμικής παρεμβολής. Στην Εικόνα 33 απεικονίζεται η συνάρτηση μεταφοράς ενδεικτικά για την μία συνιστώσα του αισθητήρα SCM αφού επεκταθεί το εύρος ζώνης.



*Εικόνα 33: Χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς και φάσης ενός αισθητήρα SCM μέχρι τα 250 KHz μετά από επέκταση του εύρους ζώνης.*

Στην Εικόνα 34 απεικονίζεται ο ASD του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει μετά την εφαρμογή της συνάρτησης μεταφοράς του SCM μαγνητόμετρου ενδεικτικά για το σήμα της Εικόνα 32.



*Εικόνα 34: x- συνιστώσα του ASD του μαγνητικού πεδίου μετά την εφαρμογή της συνάρτησης μεταφοράς -κοντινό μαγνητόμετρο.*

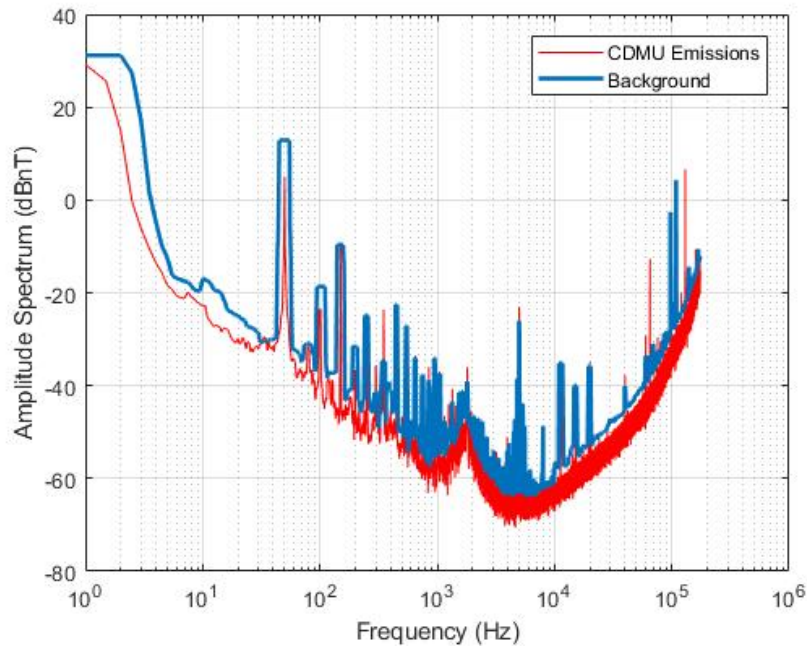
Ακολούθως, χρειάζεται να προσδιορισθούν οι συχνότητες που αντιστοιχούν στη λειτουργία της συσκευής. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η σύγκριση του φάσματος του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το CDMU με τον θόρυβο του περιβάλλοντος στο πεδίο της συχνότητας [22]. Συγκεκριμένα, το προφίλ θορύβου εξομαλύνεται με τη βοήθεια της μεταβλητής  $S_{BW}$ , η οποία είναι διαφορετική για κάθε εύρος ζώνης του εξεταζόμενου φάσματος. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι τιμές της μεταβλητής  $S_{BW}$  που χρησιμοποιήθηκαν για τα διάφορα εύρη συχνοτήτων.

*Πίνακας 6: Παράμετρος BW για τα διαφορετικά εύρη ζώνης.*

<b>Frequency Range (Hz)</b>	<b><math>S_{BW}</math>(Hz)</b>
<b>0.1 – 1</b>	0.1
<b>1 – 10</b>	1
<b>10 – 100</b>	5
<b>100 – 1000</b>	10
<b>1000 – 10000</b>	20
<b>100000-250000</b>	100

Η διαδικασία υπολογισμού του εξομαλυμένου προφίλ θορύβου είναι όμοια με την περίπτωση των FGM μαγνητομέτρων. Η σύγκριση του μέτρου του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου του CDMU με το αντίστοιχο εξομαλυμένο προφίλ θορύβου απεικονίζεται στην Εικόνα 35 όταν η συσκευή δεν έχει ξεκινήσει την περιστροφή, δηλαδή βρίσκεται στις 0°. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται κατά την περιστροφή του εξεταζόμενου εξοπλισμού.

Αντίστοιχα, στόχος του αλγορίθμου αυτού είναι να εντοπίσει ποιες συχνότητες αντιστοιχούν στη λειτουργία της εξεταζόμενης συσκευής. Το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου επιτρέπει την ορθή ανίχνευση αυτών των συχνοτήτων με τον τρόπο που περιγράφηκε στα FGM μαγνητόμετρα. Για τη διαδικασία αυτή επιλέγεται ένα κατώφλι, το οποίο καθορίζει ποιες συχνότητες αντιστοιχούν σε μαγνητικές εκπομπές της συσκευής και η σύγκριση αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία μέτρησης στα δύο επίπεδα της διάταξης και για τους δύο SCM αισθητήρες.



Εικόνα 35: Μαγνητικές εκπομπές του CDMU σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου-κοντινό μαγνητόμετρο.

Επιπλέον, η διάταξη των δύο μαγνητομέτρων χρησιμοποιείται για να τον σωστό εντοπισμό των συχνοτήτων λειτουργίας του εξοπλισμού, μέσω της σύγκρισης των δύο μαγνητικών πεδίων που μετρούνται ταυτόχρονα ανά γωνία στροφής του CDMU. Συγκεκριμένα, θεωρώντας πως το μαγνητικό πεδίο στους δύο αισθητήρες αντιστοιχεί σε μαγνητικά δίπολα, τότε το μέτρο του καθενός μπορεί να γραφεί ως:

$$|\mathbf{B}_1| \sim \frac{1}{r_1^3} \quad \text{Εξ. 45}$$

$$|\mathbf{B}_2| \sim \frac{1}{r_2^3}$$

όπου  $r_1, r_2$  είναι η απόσταση του κάθε αισθητήρα από το κέντρο του τραπεζιού, όπου είναι τοποθετημένη η εξεταζόμενη συσκευή. Ο λόγος των μέτρων των μαγνητικών πεδίων είναι:

$$\frac{|\mathbf{B}_1|}{|\mathbf{B}_2|} \sim \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^3 \quad \text{Εξ. 46}$$

Για τις παραπάνω σχέσεις, γίνεται η υπόθεση πως οι μαγνητικές πηγές βρίσκονται στην αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων. Εντούτοις, αυτή η υπόθεση δεν πάντα έγκυρη καθώς τα μαγνητικά δίπολα μπορούν να βρίσκονται οπουδήποτε μέσα στην συσκευή, οι διαστάσεις της οποίας δεν μπορούν να αγνοηθούν. Γι' αυτό τον λόγο, χρησιμοποιείται ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου που αντιστοιχεί σε  $n = 2.5$  ώστε να ανιχνευθούν οι μαγνητικές εκπομπές της συσκευής [24]. Συγκεκριμένα, για την κάθε συχνότητα που ανιχνεύθηκε στο προηγούμενο βήμα (σύγκριση με εξομαλυμένο θόρυβο) γίνεται η παρακάτω σύγκριση ανάμεσα στα πεδία που μετρήθηκαν ταυτόχρονα από τα δύο μαγνητόμετρα:

$$\frac{|B_1|}{|B_2|} > \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{2.5} \quad \text{Εξ. 47}$$

Όταν λοιπόν το μαγνητικό πεδίο που μετράται στο κοντινό μαγνητόμετρο είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στο μακρινό μαγνητόμετρο τουλάχιστον κατά τον παράγοντα  $(r_1/r_2)^{2.5}$ , τότε η συχνότητα που μελετάται είναι χαρακτηριστική για τις μαγνητικές εκπομπές του εξεταζόμενου εξοπλισμού. Συνεπώς, οι συχνότητες που εμφανίζονται στις μετρήσεις και των δύο αισθητήρων με παρόμοιες τιμές μαγνητικού πεδίου (π.χ. οι συχνότητες που αντιστοιχούν στη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου 50 Hz και αρμονικές) απορρίπτονται. Στην περίπτωση που το κατώφλι θορύβου οριστεί στα 8 dB, τότε οι συχνότητες οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 αναγνωρίζονται ως συχνότητες λειτουργίας του CDMU [22].

Όπως παρατηρείται, οι συχνότητες λειτουργίας που εντοπίστηκαν βρίσκονται εκτός του εύρους ζώνης της συνάρτησης μεταφοράς (1 Hz - 51 KHz) και συγκεκριμένα στο τμήμα συχνοτήτων όπου επεκτάθηκε έως τα 250 KHz. Ως εκ τούτου, οι τιμές του μαγνητικού πεδίου στις εντοπισμένες συχνότητες δεν είναι ακριβείς αλλά κανονικοποιημένες, αντιστοιχώντας έτσι σε μια ποιοτική διαδικασία μοντελοποίησης.

*Πίνακας 7: Εντοπισμένες συχνότητες λειτουργίας του CDMU για 8 dB κατώφλι θορύβου.*

<b>Identified Frequencies (KHz)</b>
65
130

Στη συνέχεια, για κάθε εντοπισμένη συχνότητα χρησιμοποιούνται τα μέτρα των μέγιστων τιμών πλάτους του μαγνητικού πεδίου στο εκάστοτε εύρος ζώνης που μελετάται. Οι τιμές αυτές, αφού συγκεντρωθούν για όλα τα σημεία μέτρησης του μαγνητικού πεδίου, αποτελούν είσοδο για τη στοχαστική μέθοδο PSO. Η PSO, όπως χρησιμοποιήθηκε και στην περίπτωση των Fluxgate μαγνητομέτρων, έχει ως στόχο τον προσδιορισμό ενός μοντέλου που να προσεγγίζει τις μαγνητικές εκπομπές της εξεταζόμενης συσκευής, για την κάθε ανιχνευμένη συχνότητα λειτουργίας. Το κάθε μοντέλο μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή και περισσότερα (συνήθως μέχρι δύο ή τρία) μαγνητικά δίπολα με καθορισμένες θέσεις και μαγνητικές ροπές. Και σε αυτή τη διαδικασία μοντελοποίησης επιχειρείται ταύτιση των μέτρων των μετρούμενων και μοντελοποιημένων τιμών του μαγνητικού πεδίου και λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση του αγωγίμου περιστρεφόμενου τραπεζιού πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένο το CDMU. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται οι τιμές των μαγνητικών πεδίων των σημείων μέτρησης που βρίσκονται στο επίπεδο  $z=10$  cm (12 σημεία παρατήρησης) λόγω των περιορισμών που θέτει η αγωγίμη επιφάνεια της διάταξης. Οι εκτιμώμενες παράμετροι των μοντέλων καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 8 και Πίνακα 9, αντίστοιχα [22].

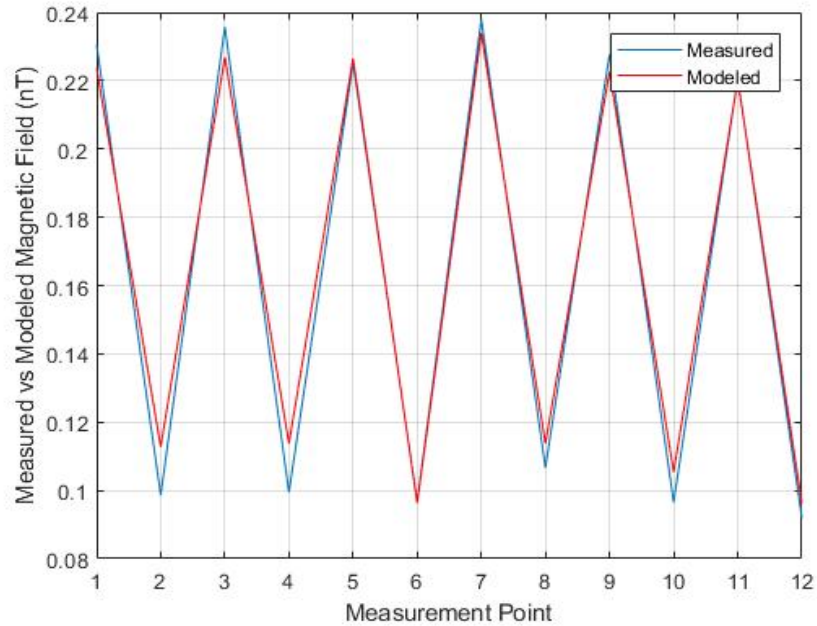
Πίνακας 8: Παράμετροι μοντέλων μαγνητικών δίπολων για κάθε συχνότητα λειτουργίας του CDMU.

<b>Frequency (KHz)</b>	<b>65</b>	<b>130</b>
<b>Dipole</b>	1	1
<b>x (cm)</b>	3.2	0.7
<b>y (cm)</b>	0.2	0.7
<b>z (cm)</b>	0.5	1.8
<b>mx (mAm<sup>2</sup>)</b>	0.12	1.15
<b>my (mAm<sup>2</sup>)</b>	0.01	0.19
<b>mz (mAm<sup>2</sup>)</b>	2.90	4.19

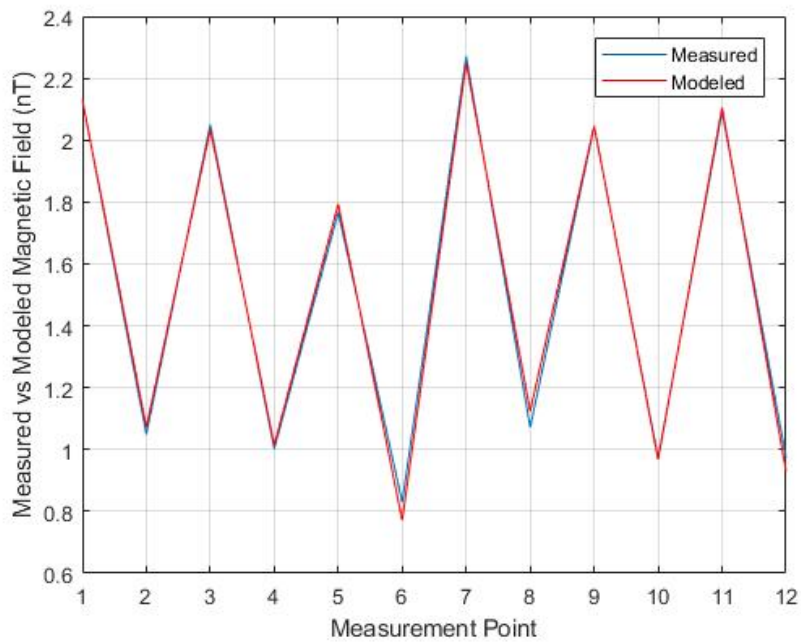
Πίνακας 9: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενων μοντέλων για κάθε συχνότητα λειτουργίας του CDMU.

<b>Frequency (KHz)</b>	<b>Field RMS (nT)</b>	<b>GoF (%)</b>
<b>65</b>	0.0075	4.2645
<b>130</b>	0.0801	4.9522

Στην Εικόνα 36 και Εικόνα 37 παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου στα 12 σημεία παρατήρησης για κάθε συχνότητα λειτουργίας του CDMU που εντοπίστηκε.



Εικόνα 36: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στα 65 KHz για το CDMU.



Εικόνα 37: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στα 130 KHz για το CDMU.



Οι χαμηλές τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης του Πίνακα 9 ( $GoF < 5\%$ ) επιβεβαιώνουν την καλή προσαρμογή μεταξύ του μοντελοποιημένου και του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και για τις δύο συχνότητες λειτουργίας που ανιχνεύθηκαν, όπως είναι εμφανές και στις Εικόνα 36 και Εικόνα 37. Η προτεινόμενη προσέγγιση διασφαλίζει πως οι εκτιμώμενες παράμετροι του κάθε μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αναπαράγουν τις μαγνητικές εκπομπές της συσκευής στις συχνότητες λειτουργίας που εντοπίστηκαν.

#### **4.4 Συμπεράσματα**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ορισμένες μεθοδολογίες μέτρησης και μοντελοποίησης μαγνητικών πεδίων που παράγονται από πραγματικό διαστημικό εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία και στη συνέχεια εφαρμόστηκε για την περίπτωση της μαγνητικής συμπεριφοράς δύο συσκευών σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας. Μόλις ολοκληρωθούν οι μαγνητικές μετρήσεις μίας συσκευής, τα δεδομένα που καταγράφηκαν υφίστανται ειδική επεξεργασία ώστε να ανιχνευθούν οι συχνότητες λειτουργίας της. Στη συνέχεια, οι τιμές του μαγνητικού πεδίου σε αυτές τις συχνότητες χρησιμοποιούνται ως είσοδος στον αλγόριθμο μοντελοποίησης ώστε τελικά να παραχθεί ένα μοντέλο κατάλληλο να περιγράψει τη μαγνητική συμπεριφορά της εξεταζόμενης συσκευής. Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου καθώς τα εκτιμώμενα μοντέλα ήταν ικανά να αναπαράγουν τις μαγνητικές εκπομπές των δύο συσκευών που υποβλήθηκαν σε μετρήσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5. ΕΞΕΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

#### 5.1 Εισαγωγή

Η μαγνητική καθαρότητα στις διαστημικές αποστολές θέτει αυστηρά όρια στις μαγνητικές εκπομπές του διαστημικού εξοπλισμού. Γι' αυτό τον λόγο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι συσκευές που πρόκειται να φέρει ένα αεροσκάφος υπόκεινται σε επίγειες ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις ώστε να χαρακτηρισθούν και στη συνέχεια να παραχθεί ένα κατάλληλο μοντέλο που να προσομοιάζει τη μαγνητική υπογραφή κάθε συσκευής.

Για να εξετασθεί μια συσκευή συνήθως μελετάται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας. Ωστόσο, όταν οι συσκευές ξεκινούν να λειτουργούν παρουσιάζουν μια μεταβατική μαγνητική συμπεριφορά μέχρι να φτάσουν στην κατάσταση συνεχούς λειτουργίας τους. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην βηματική απόκριση του ρεύματος κατά την ενεργοποίηση της συσκευής. Οι καταναλωτές και οι μηχανισμοί υψηλής ισχύος είναι συνήθως οι συσκευές οι οποίες βρίσκονται σε ένα διαστημόπλοιο και παράγουν μεταβατικά μαγνητικά πεδία, με χαρακτηριστικά παραδείγματα την επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Rechargeable Battery), τον διακόπτη ραδιοσυχνότητας (RF Switch) και τη συσκευή ελέγχου και διαμοιρασμού ισχύος (PCDU). Ορισμένες συσκευές ενεργοποιούνται μια φορά κατά τη διάρκεια της αποστολής (π.χ. το PCDU) με αποτέλεσμα το χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο να αντιστοιχεί σε μία βηματική απόκριση, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η συσκευή λειτουργεί μεταβαίνοντας συνεχώς ανάμεσα σε δύο καταστάσεις (π.χ. μπαταρία και RF Switch) παράγοντας έτσι μαγνητικό πεδίο που αποτελείται από παλμοσειρές στο πεδίο του χρόνου. Σε κάθε περίπτωση, το προκύπτον μαγνητικό πεδίο μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή που προέρχεται από τον εξοπλισμό του αεροσκάφους. Για την περαιτέρω μελέτη τέτοιων φαινομένων, αρκεί να εξετασθεί ένα σήμα το οποίο να περιλαμβάνει τη μετάβαση ανάμεσα στις καταστάσεις λειτουργίας μιας συσκευής κατά την ενεργοποίηση και την απενεργοποίησή της [32].

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιασθεί μια μεθοδολογία, η οποία έχει ως σκοπό τη μοντελοποίηση των χαμηλόσυχνων μεταβατικών μαγνητικών

πεδίων βασιζόμενη σε επίγειες μετρήσεις μιας συσκευής. Η ανάλυση η οποία αφορά την μοντελοποίηση των μαγνητικών πεδίων, που αντιστοιχούν σε σταθερή λειτουργία, δεν είναι κατάλληλη για τα μεταβατικά φαινόμενα και ως εκ τούτου χρειάζεται μια διαφορετική προσέγγιση. Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει ως στόχο τον προσδιορισμό ενός ή παραπάνω παλμών, των οποίων το φάσμα μπορεί να προσομοιώσει τη μεταβατική μαγνητική συμπεριφορά μιας συσκευής στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων, καθώς τα όργανα που φέρει το διαστημόπλοιο στοχεύουν στη μέτρηση διακυμάνσεων του μαγνητικού πεδίου μέχρι μερικές δεκάδες KHz. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται μετρήσεις συσκευών σχεδιασμένων για πραγματικές διαστημικές αποστολές ώστε να αξιολογηθεί και να εκτιμηθεί η ικανότητα της προτεινόμενης μεθόδου να αναπαράγει τη μεταβατική μαγνητική υπογραφή κάθε συσκευής. Τέλος, η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί και για υψηλότερες συχνότητες που σχετίζονται με ηλεκτρονικά ισχύος [28].

## 5.2 Περιγραφή της μεθόδου

Ένα μεταβατικό φαινόμενο, το οποίο συνήθως συμβαίνει όταν μία συσκευή εκκινεί ή τερματίζει τη λειτουργίας της, μπορεί να προσεγγισθεί με τη χρήση παλμών. Συγκεκριμένα, το φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου επιχειρείται να ταυτιστεί με το φάσμα που προέρχεται από έναν ή και παραπάνω τραπεζοειδείς παλμούς. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξαχθεί ένα μοντέλο κατάλληλο για τη μεταβατική μαγνητική συμπεριφορά μιας συσκευής. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των προβλεπόμενων παλμών, τα οποία στη γενική περίπτωση είναι το εύρος του παλμού  $\tau$ , ο χρόνος ανόδου  $\tau_r$ , ο χρόνος καθόδου  $\tau_f$ , το πλάτος του  $A$  και η χρονική στιγμή που αυτός συμβαίνει  $\tau_p$ . Χωρίς απώλεια της γενικότητας, θεωρείται πως οι χρόνοι ανόδου και καθόδου του προβλεπόμενου παλμού είναι ίσοι. Είναι γνωστό πως όταν αυτοί οι χρόνοι δεν είναι ίσοι, τότε επηρεάζεται το προκύπτον φάσμα. Εντούτοις, η υπόθεση αυτή είναι κατάλληλη για τις συσκευές που πρόκειται να μελετηθούν στην παρούσα εργασία. Συνεπώς, στην περίπτωση όπου ισχύει  $\tau_r = \tau_f$ , οι παράμετροι του παλμού που χρειάζεται να προσδιορισθούν μειώνονται στους 4.

Σε πολλές περιπτώσεις, είναι σημαντικό να εκτιμηθούν οι μέγιστες φασματικές μαγνητικές εκπομπές μιας συσκευής σε μεταβατική λειτουργία. Έναν κατάλληλο τρόπο αποτελεί ο καθορισμός των φασματικών ορίων, τα οποία περικλείουν το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με την Εξ. 29. Είναι σύνηθες το μεταβατικό σήμα στο πεδίο του χρόνου να αποτελείται από μερικούς επικαλυπτόμενους παλμούς ή οι μετρήσεις μαγνητικού πεδίου να διεξάγονται απευθείας στο πεδίο της συχνότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δύσκολο να προσδιορισθεί το κατάλληλο πλήθος παλμών, των οποίων τα άνω φασματικά όρια θα περικλείσουν με τον βέλτιστο τρόπο τις μεταβατικές

μαγνητικές εκπομπές. Γι' αυτόν τον λόγο, στην παρούσα ανάλυση θα εκτιμηθούν τα φασματικά όρια που προκύπτουν από έναν μόνο παλμό, καθώς θεωρείται επαρκής για τις περιπτώσεις που θα εξετασθούν παρακάτω. Το προκύπτον μοντέλο περιέχει το εύρος του παλμού  $\tau$  και τον χρόνο ανόδου  $\tau_r$  [32].

Σύμφωνα με την προτεινόμενη τεχνική, η μοντελοποίηση του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου  $B_{measured}$  γίνεται στο πεδίο της συχνότητας. Στην περίπτωση που οι μετρήσεις έχουν γίνει στο πεδίο του χρόνου, τότε εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier, ο οποίος εγγενώς υποθέτει πως το σήμα είναι περιοδικό με περίοδο ίση με το χρονικό παράθυρο της μέτρησης. Στη συνέχεια, η διαδικασία μοντελοποίησης χρησιμοποιεί τις τιμές φάσματος για να παράγει ένα μοντέλο που αποτελείται από τα χαρακτηριστικά των παλμών που επιλέγονται ώστε να προσεγγιστεί το μεταβατικό φαινόμενο. Τα χαρακτηριστικά των παλμών εκτιμώνται από τη βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων PSO, χρησιμοποιώντας μετρήσεις κοντινού πεδίου [20]. Αντιστοίχως, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και άλλες στοχαστικές μέθοδοι για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των παλμών [17]. Αυτές οι τεχνικές είναι κατάλληλες για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων και γι' αυτόν τον λόγο προτιμώνται για τις διαδικασίες μοντελοποίησης της παρούσας εργασίας.

Στην περίπτωση μοντελοποίησης με παλμούς, τα σωματίδια που χρησιμοποιεί η PSO χαρακτηρίζονται από διάνυσμα θέσης  $\mathbf{D}_i$  που αποτελείται από τα στοιχεία  $(\tau_i, \tau_{ri}, A_i, t_{pi})$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  τα οποία είναι τα χαρακτηριστικά των  $N$  παλμών που επιλέγονται για το εκάστοτε πρόβλημα μοντελοποίησης. Όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 4.2, αρχικά το διάνυσμα θέσης έχει τυχαίες τιμές. Όσο ο αλγόριθμος εξελίσσεται, το διάνυσμα θέσης επικαιροποιείται σύμφωνα με τη βέλτιστη λύση του κάθε σωματιδίου (personal best), αλλά και τη βέλτιστη λύση που προκύπτει από όλο το πλήθος σωματιδίων (global best). Τελικά, ο αλγόριθμος θα συγκλίνει στη βέλτιστη καθολική λύση  $gbest$ . Αντιστοίχως, στην περίπτωση μοντελοποίησης των φασματικών ορίων του μαγνητικού πεδίου, το διάνυσμα θέσης  $\mathbf{D}_i$  αποτελείται από τα στοιχεία  $(\tau, \tau_r)$ , τα οποία αναφέρονται στα χαρακτηριστικά ενός παλμού. Η λύση  $B_{modeled}$  προκύπτει χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Εξ. 26 και Εξ. 29 για τη μοντελοποίηση με παλμούς και τη μοντελοποίηση των φασματικών ορίων αντίστοιχα [32].

Η αντικειμενική συνάρτηση, την οποία η PSO επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει, είναι η  $F$ :

$$F = \sum_{i=1}^M (B_{modeled}(i) - B_{measured}(i))^2, \quad \text{Εξ. 48}$$

όπου το  $i$  αναφέρεται στα δείγματα της συχνότητας ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) που αντιστοιχούν στις τιμές του μετρούμενου και το μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου. Ο αλγόριθμος σταματά, όταν η  $F$  ελαχιστοποιηθεί υποδεικνύοντας ότι το φάσμα που προέρχεται από τον προβλεπόμενο παλμό (ή παλμούς) μπορεί να αντιπροσωπεύσει τις μετρήσεις μαγνητικού πεδίου της συσκευής στο εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων.

Στην περίπτωση μοντελοποίησης των φασματικών ορίων, ο αλγόριθμος είναι με τέτοιο τρόπο υλοποιημένος ώστε να απορρίπτει πιθανές λύσεις που δεν δημιουργούν αποτελεσματικά ένα άνω φασματικό όριο. Αυτό συμβαίνει καθώς είναι απαραίτητο να ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$B_{modeled}(i) - B_{measured}(i) > 0, \quad \text{Εξ. 49}$$

Επιπλέον, και σε αυτή την εφαρμογή του αλγορίθμου PSO χρησιμοποιείται το σφάλμα RMS για την αξιολόγηση του προκύπτοντος μοντέλου. Το RMS υπολογίζεται μεταξύ του προβλεπόμενου και του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου, με τον μέσο όρο να περιλαμβάνει όλα τα δείγματα συχνότητας  $M$ :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (B_{modeled}(i) - B_{measured}(i))^2}, \quad \text{Εξ. 50}$$

Επίσης, υπολογίζεται η συνάρτηση  $GoF$  για την αξιολόγηση της εκτιμώμενης λύσης, η οποία αντιστοιχεί στη σχετική απόκλιση μεταξύ του προβλεπόμενου και του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου στο πεδίο της συχνότητας:

$$GoF = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (B_{modeled}(i) - B_{measured}(i))^2}{\sum_{i=1}^M (B_{measured}(i))^2}}, \quad \text{Εξ. 51}$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως το κριτήριο  $GoF$  δεν επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση μοντελοποίησης των φασματικών ορίων. Συγκεκριμένα, στόχος δεν είναι οι τιμές των φασματικών ορίων να προσεγγίσουν τις μετρούμενες τιμές του μαγνητικού πεδίου, αλλά η περίκλιση του τελευταίου. Συνεπώς, η σύγκριση με το μετρούμενο πεδίο είναι πιθανό να δώσει υψηλές τιμές του  $GoF$ , οι οποίες δεν είναι αντιπροσωπευτικές του επιθυμητού αποτελέσματος και άρα δεν πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης διαδικασίας.

Οι παράμετροι των παραπάνω μοντέλων παλμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι διακυμάνσεις στη συχνότητα των μαγνητικών μετρήσεων. Εντούτοις, κάθε μέτρηση έχει διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά καθώς περιστρέφεται το τραπέζι πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένος ο εξοπλισμός. Γι' αυτό τον λόγο, χρειάζεται να προσδιοριστεί επιπλέον ένα μοντέλο μαγνητικών δίπολων (MDM) με συγκεκριμένες θέσεις και μαγνητικές ροπές για το κάθε μαγνητικό δίπολο χρησιμοποιώντας τις DC τιμές του μαγνητικού πεδίου από όλα τα σημεία μέτρησης ώστε να προσδιοριστεί η χωρική κατανομή των συνιστωσών του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου.

### **5.3 Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης**

Στην παρούσα ενότητα, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται σε μετρήσεις πραγματικού διαστημικού εξοπλισμού. Η διάταξη που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις αυτής της ενότητας παρουσιάζεται στην υποενότητα 1.5.1. Κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων, οι συσκευές ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται χειροκίνητα σε μη ίσους χρόνους, παράγοντας έτσι μη περιοδικά μαγνητικά πεδία. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιούνται, ομοίως με την περίπτωση της σταθερής λειτουργίας, δύο μαγνητόμετρα τριών αξόνων, τα οποία καταγράφουν τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής  $B_x(t)$ ,  $B_y(t)$ ,  $B_z(t)$  στο πεδίο του χρόνου, υλοποιώντας έτσι τη διάταξη των δύο μαγνητομέτρων (gradiometer configuration). Τα μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται είναι τύπου Fluxgate και τύπου Search Coils, με χαρακτηριστικά όμοια με αυτά των προηγούμενων μετρήσεων.

Αρχικά, τα δύο μαγνητόμετρα μετρούν το μαγνητικό πεδίο  $B_{1x}(t)$ ,  $B_{1y}(t)$ ,  $B_{1z}(t)$  και  $B_{2x}(t)$ ,  $B_{2y}(t)$ ,  $B_{2z}(t)$  που παράγεται από την υπό εξέταση συσκευή. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται ορισμένες τεχνικές, οι οποίες στοχεύουν στην αποθρομβοποίηση και περαιτέρω επεξεργασία των μετρούμενων πεδίων στο πεδίο του χρόνου. Η διαφορά των μαγνητικών πεδίων μεταξύ των δύο μαγνητομέτρων είναι μία από τις μεθόδους αποθρομβοποίησης που δύναται να εφαρμοσθεί [6], ενώ άλλες τεχνικές περιλαμβάνουν το φιλτράρισμα των εκπομπών λόγω του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στις συχνότητες 50 Hz και στις αρμονικές (100 Hz, 150 Hz κ.α.), την αφαίρεση της DC συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου και την τεχνική αποθρομβοποίησης με τη βοήθεια των μετασχηματισμών wavelet [29]. Η ανάλυση με wavelet είναι κατάλληλη για σήματα που εμφανίζουν υψηλής συχνότητας θόρυβο σε σήματα χαμηλής συχνότητας ώστε να τα αποθρομβοποιήσει. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθρομβοποίηση των μεβατατικών σημάτων στο πεδίο του χρόνου.

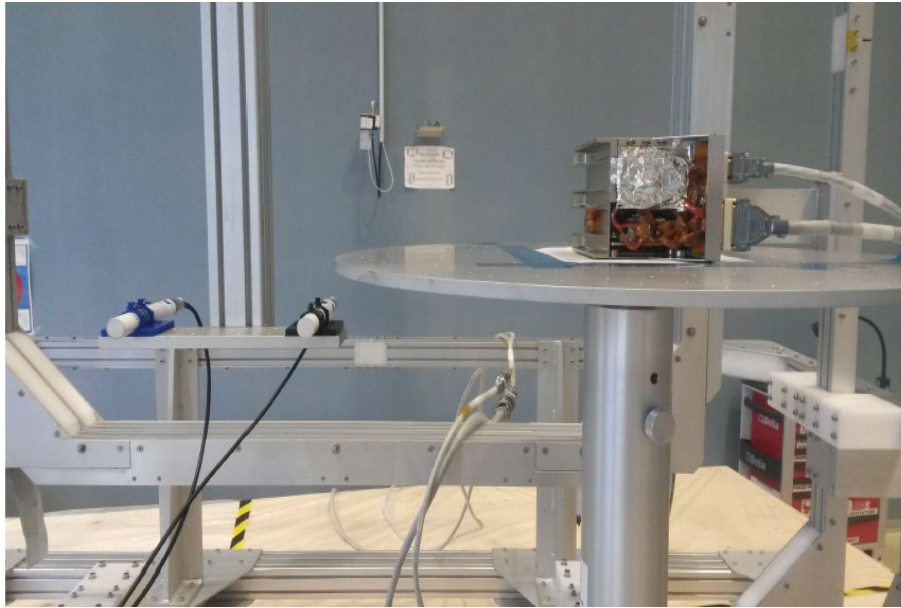
Επιπλέον, η περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων εξασφαλίζει την απομόνωση ενός μόνο μεταβατικού φαινομένου κατάλληλο για μελέτη. Το μεταβατικό φαινόμενο περιλαμβάνει ένα άνοιγμα-κλείσιμο της εξεταζόμενης συσκευής ώστε να μελετηθεί η μαγνητική υπογραφή της. Ακολούθως, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier (FFT) ώστε να υπολογισθεί το φάσμα του μαγνητικού πεδίου, υποθέτοντας πως το απομονωμένο μεταβατικό φαινόμενο επεκτείνεται περιοδικά λόγω του μετασχηματισμού αυτού. Οι προκύπτουσες τιμές φάσματος χρησιμοποιούνται για να εξαχθεί ένα μοντέλο που να περιγράφει το μεταβατικό φαινόμενο που εξετάζεται κάθε φορά με βάση τις εξισώσεις που αφορούν το φάσμα τραπεζοειδούς παλμοσειράς. Τέλος, σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, οι DC τιμές του μαγνητικού πεδίου από όλες τις γωνίες περιστροφής της εξεταζόμενης συσκευής, χρησιμοποιούνται ώστε να εκτιμηθεί ένας μικρός αριθμός μαγνητικών δίπολων, τα οποία μπορούν να μιμηθούν την χωρική κατανομή του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου που ακτινοβολείται από το EUT.

### **5.3.1 Μοντελοποίηση με χρήση τραπεζοειδών παλμών**

#### **5.3.1.1 Επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Rechargeable battery)**

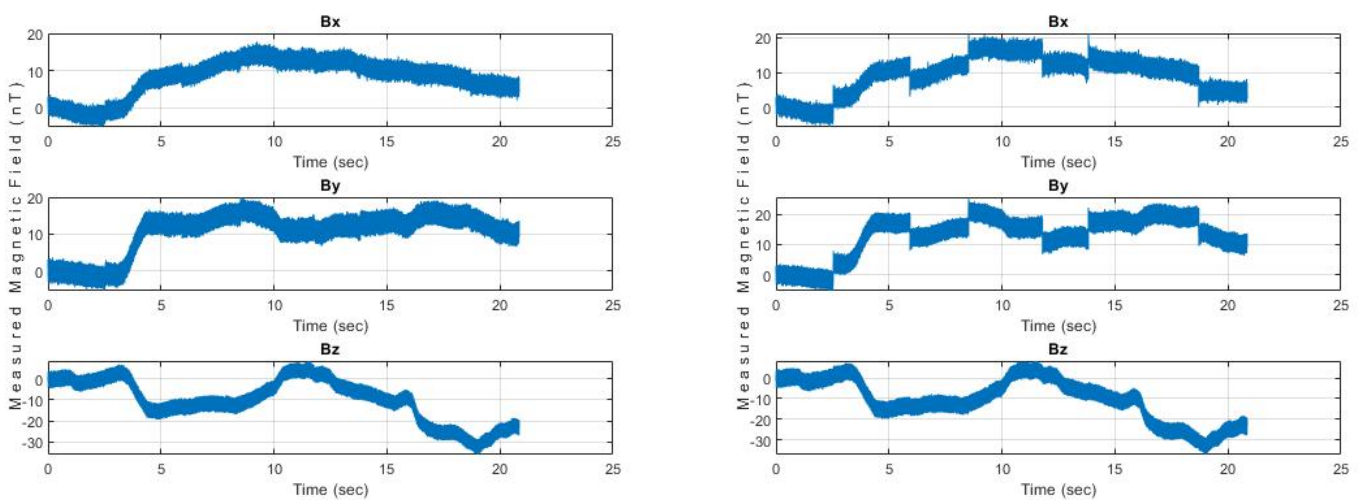
Αρχικά, η συσκευή που μελετάται είναι η Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία (Rechargeable Battery) της αποστολής Exomars και χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή μετρήσεων και την εφαρμογή της μεθόδου. Τα μαγνητόμετρα, που χρησιμοποιούνται είναι τύπου Fluxgate και πραγματοποιούν μετρήσεις μαγνητικού πεδίου στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων, όταν η υπό μέτρηση συσκευή βρίσκεται σε μεταβατική λειτουργία. Σύμφωνα με τη διάταξη των μετρήσεων της Εικόνας 38, το κοντινό μαγνητόμετρο βρίσκεται σε απόσταση 67 cm από το κέντρο του τραπεζιού, στο οποίο είναι τοποθετημένη η συσκευή για την πραγματοποίηση μετρήσεων, ενώ το δεύτερο μαγνητόμετρο βρίσκεται σε απόσταση 91 cm αντίστοιχα. Τα επίπεδα, στα οποία βρίσκεται ο μετρητικός εξοπλισμός, είναι στα 5 cm και τα -10 cm [32].





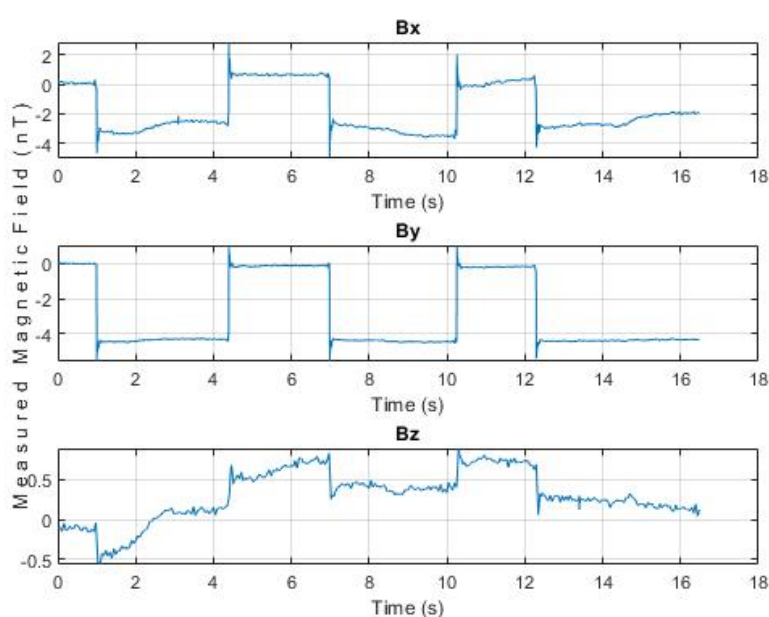
*Εικόνα 38: Διάταξη για την πραγματοποίηση μετρήσεων AC μαγνητικού πεδίου της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας με Fluxgate Magnetometers (εργαστήριο Thales Alenia).*

Τα μαγνητόμετρα μετρούν το παραγόμενο μεταβατικό μαγνητικό πεδίο για χρονικό διάστημα 20 sec. Στη συνέχεια, αφαιρείται η DC συνιστώσα των μετρούμενων σημάτων και στα δύο μαγνητόμετρα και έτσι αυξάνεται η ανάλυση των προκύπτοντων μαγνητικών πεδίων, τα οποία απεικονίζονται στην Εικόνα 39 ενδεικτικά για γωνία περιστροφής  $0^\circ$  της εξεταζόμενης συσκευής.



*Εικόνα 39: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας σε μεταβατική κατάσταση με Fluxgate Magnetometer-κοντινό (δεξιά) και μακρινό μαγνητόμετρο (αριστερά).*

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, υπολογίζεται η διαφορά των μετρούμενων μαγνητικών πεδίων στα δύο μαγνητόμετρα. Ακολούθως, το σήμα υποβάλλεται σε φιλτράρισμα των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή τα 50 Hz και των αρμονικών του, καθώς και σε αποθορυβοποίηση με τη βοήθεια των μετασχηματισμών wavelet ώστε να απομονωθεί το μεταβατικό φαινόμενο και να αφαιρεθούν τυχόν ανεπιθύμητες διακυμάνσεις. Επιπλέον, όλα τα προκύπτοντα σήματα μετατοπίζονται στο πεδίο του χρόνου με κατάλληλο τρόπο ώστε να επιτευχθεί ο συγχρονισμός τους. Το αποθορυβοποιημένο σήμα στο πεδίο του χρόνου παρουσιάζεται στην Εικόνα 40.



*Εικόνα 40: Μεταβατικό μαγνητικό πεδίο της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας έπειτα από τις τεχνικές επεξεργασίας και αποθορυβοποίησης.*

Είναι εμφανές πως το προκύπτον μαγνητικό πεδίο στο πεδίο του χρόνου είναι ένα σήμα που αποτελείται από αρκετές μεταβάσεις, δηλαδή διαδοχικές ενεργοποιήσεις της συσκευής. Εντούτοις, αρκεί ένας μόνο παλμός για να μελετηθεί και να προσεγγισθεί το μεταβατικό φαινόμενο. Ως εκ τούτου, το σήμα επεξεργάζεται ώστε να απομονωθεί ο ένας παλμός που απαιτείται σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο και ακολούθως υπολογίζεται το σήμα στο πεδίο της συχνότητας. Το τμήμα του φάσματος μέχρι τα 80 Hz επιχειρείται να ταυτιστεί με το φάσμα ενός τραπεζοειδή παλμού, καθώς παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την εκτίμηση των βασικών χαρακτηριστικών του παλμού. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι παράμετροι του προσδιορισμένου μοντέλου ενδεικτικά για την  $y$ -συνιστώσα του

μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο μέτρησης. Επίσης, στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται τα κριτήρια αξιολόγησης του εκτιμώμενου μοντέλου.

*Πίνακας 10: Παράμετροι μοντέλου με παλμούς για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.*

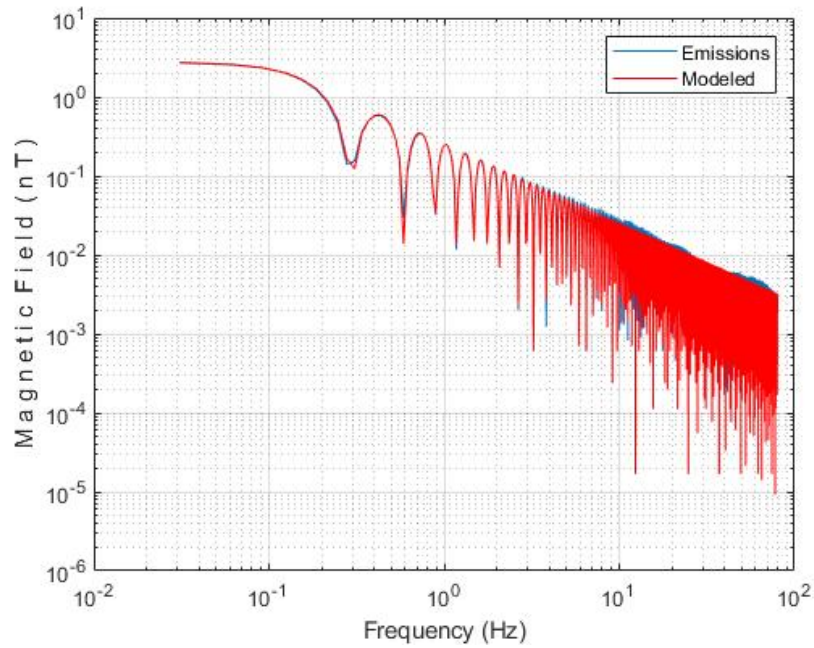
<b>Παλμός</b>	<b>1</b>
<b>Εύρος παλμού <math>\tau</math> (sec)</b>	3.3939
<b>Χρόνος ανόδου <math>\tau_r</math> (sec)</b>	0.0017
<b>Πλάτος <math>A</math> (nT)</b>	-4.3668
<b>Χρονική στιγμή συμβάντος <math>\tau_p</math> (sec)</b>	2.5950

*Πίνακας 11: Κριτήρια αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου με παλμούς για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.*

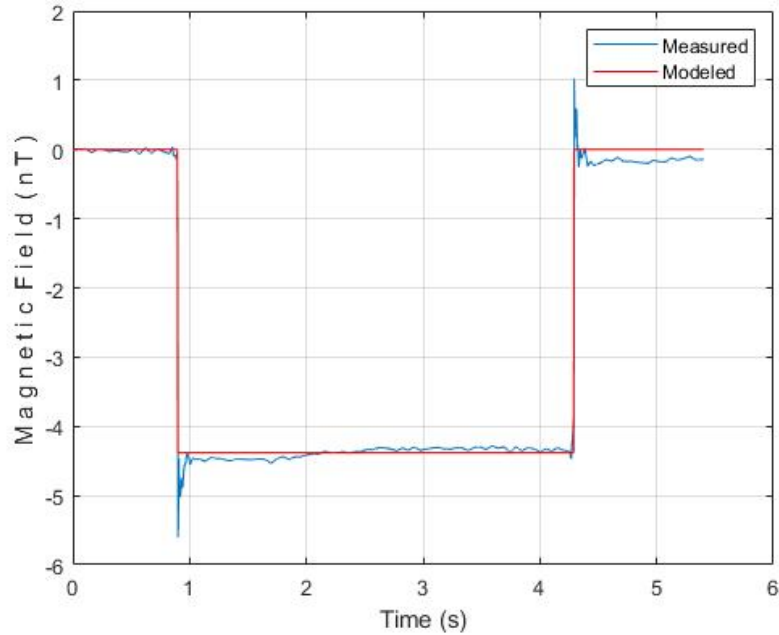
<b>RMS (nT)</b>	<b>GoF (%)</b>
0.0021	1.86

Οι προβλεπόμενες παράμετροι του μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να υπολογιστεί το μοντελοποιημένο φάσμα του μαγνητικού πεδίου και να ανακατασκευαστεί το σήμα στο πεδίο του χρόνου. Στην Εικόνα 41 συγκρίνονται το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο και το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από τον παλμό του προβλεπόμενου μοντέλου, το οποίο προσεγγίζει τη μεταβατική μαγνητική συμπεριφορά της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας.

Επιπλέον, το μετρούμενο και το ανακατασκευασμένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο του χρόνου απεικονίζονται στην Εικόνα 42. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το ανακατασκευασμένο μαγνητικό πεδίο στον χρόνο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του προβλεπόμενου μοντέλου που παράχθηκε από τη μοντελοποίηση στο πεδίο της συχνότητας.



*Εικόνα 41: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας που προκύπτει από τη μοντελοποίηση με τραπεζοειδή παλμό για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.*



*Εικόνα 42: Μετρούμενο και ανακατασκευασμένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο του χρόνου που προκύπτει από τη μοντελοποίηση με τραπεζοειδή παλμό για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.*

Όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 41, το μοντέλο το οποίο προσδιορίστηκε είναι ικανό να αναπαράγει το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας στο χαμηλό εύρος ζώνης που εξετάζεται, δηλαδή μέχρι τα 80 Hz περίπου. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο είναι δυνατή η πλήρης ανακατασκευή του μεταβατικού μαγνητικού πεδίου στο πεδίο του χρόνου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 42. Αυτό είναι συμβατό με το γεγονός ότι οι τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11 είναι αρκετά χαμηλές υποδεικνύοντας πως τα χαρακτηριστικά του προβλεπόμενου τραπεζοειδή παλμού παρουσιάζουν πολύ μικρή απόκλιση από τα αντίστοιχα του πραγματικού παλμού, ο οποίος αποτελεί το μεταβατικό φαινόμενο στο πεδίο του χρόνου. Αξίζει να σημειωθεί πως η υπόθεση για ίσους χρόνους ανόδου και καθόδου του προβλεπόμενου τραπεζοειδή παλμού είναι ορθή και ταιριάζει στην περίπτωση της Επαναφορτιζόμενης μπαταρίας, όπως επιβεβαιώνεται και από την Εικόνα 42. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η διαδικασία της μοντελοποίησης με τη χρήση τραπεζοειδών παλμών δεν λαμβάνει υπόψη τις έντονες διακυμάνσεις που βρίσκονται κοντά στις μεταβάσεις του σήματος (φαινόμενο κωδωνισμού), οι οποίες είναι εμφανείς στο πεδίο του χρόνου στην Εικόνα 42.

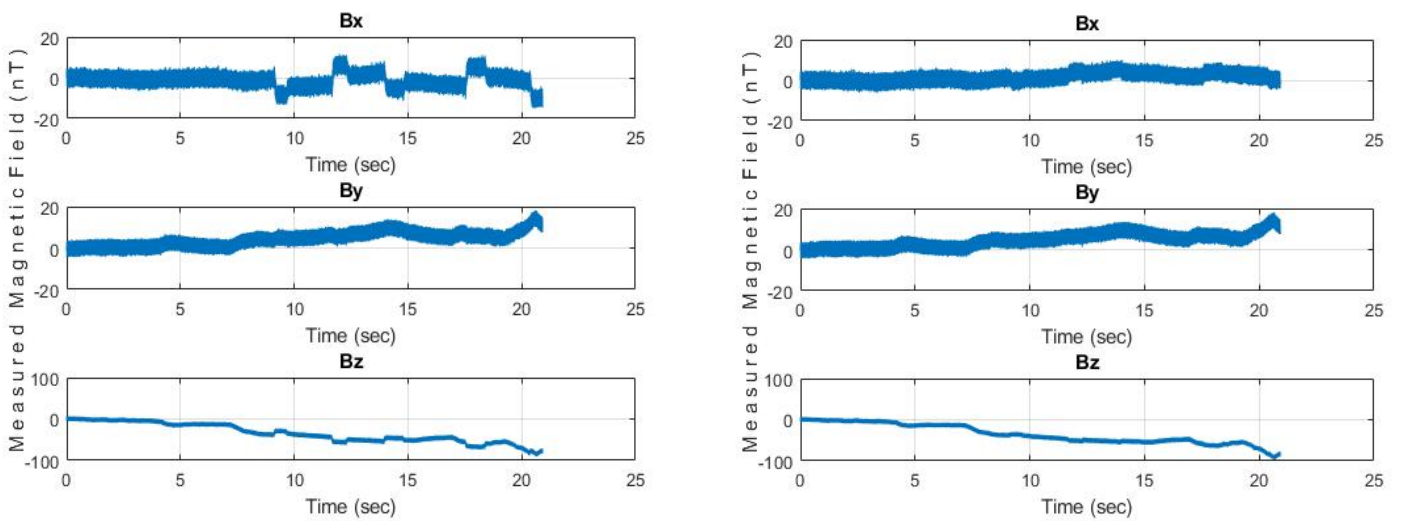
### **5.3.1.2 Διακόπτης ραδιοσυχνοτήτων (RF switch)**

Στη συνέχεια, τα μαγνητόμετρα τύπου Fluxgate εκτελούν μετρήσεις κοντινού μαγνητικού πεδίου το οποίο παράγεται από έναν Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων (RF Switch). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο Διακόπτης βρίσκεται συνεχώς σε μεταβατική λειτουργία και δεν διαθέτει κατάσταση συνεχούς λειτουργίας. Στην Εικόνα 43 απεικονίζεται η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα, οι δύο αισθητήρες βρίσκονται σε αποστάσεις 64.5 cm και 88.5 cm αντίστοιχα και ύψη 13 cm και -7.5 cm από το κέντρο του τραπεζιού πάνω στο οποίο βρίσκεται η προς μελέτη συσκευή [32].

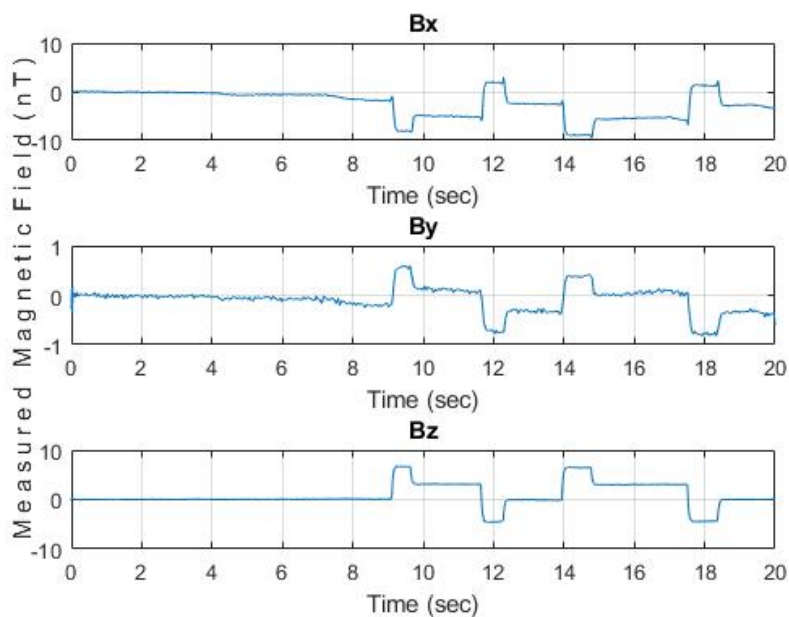
Τα μαγνητόμετρα καταγράφουν το μεταβατικό μαγνητικό πεδίο της συσκευής για χρονική διάρκεια ίση με 20 sec. Ακολούθως, αφαιρείται η DC συνιστώσα και τα μαγνητικά πεδία που προκύπτουν φαίνονται στην Εικόνα 44. Σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και στην περίπτωση της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας, στη συνέχεια εφαρμόζονται τεχνικές αποθορυβοποίησης του σήματος. Αυτές περιλαμβάνουν τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων μαγνητικών πεδίων στα δύο μαγνητόμετρα, το φιλτράρισμα των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή τα 50 Hz και τις αρμονικές καθώς και την αποθορυβοποίηση με τη βοήθεια των wavelet. Το σήμα που προκύπτει έπειτα από αυτή τη διαδικασία απεικονίζεται στην Εικόνα 45.



*Εικόνα 43: Διάταξη για την πραγματοποίηση μετρήσεων AC μαγνητικού πεδίου του Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων με Fluxgate Magnetometers (εργαστήριο Thales Alenia).*



*Εικόνα 44: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο του Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας με Fluxgate Magnetometer -κοντινό (αριστερά) και μακρινό μαγνητόμετρο (δεξιά).*



Εικόνα 45: Μεταβατικό μαγνητικό πεδίο του Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων έπειτα από τις τεχνικές αποθορυβοποίησης.

Όπως είναι εμφανές, το προκύπτον σήμα αποτελείται από δύο κύκλους λειτουργίας που περιλαμβάνουν αρκετές όμοιες μεταβάσεις που αντιστοιχούν σε διαδοχικές εκκινήσεις και τερματισμούς της λειτουργίας της συσκευής. Η προτεινόμενη τεχνική υποστηρίζει την επιλογή μιας περιόδου του αποθορυβοποιημένου σήματος, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της μοντελοποίησης. Στόχος της μοντελοποίησης αυτής είναι να προσδιοριστούν δύο τραπεζοειδείς παλμοί, των οποίων το φάσμα προσεγγίζει το μετρούμενο φάσμα του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων. Οι εκτιμώμενες παράμετροι των δύο παλμών, που αποτελούν το προβλεπόμενο μοντέλο για τη μεταβατική μαγνητική υπογραφή της συσκευής καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης του μοντέλου αυτού παρουσιάζονται στον Πίνακα 12 και Πίνακα 13, αντίστοιχα.

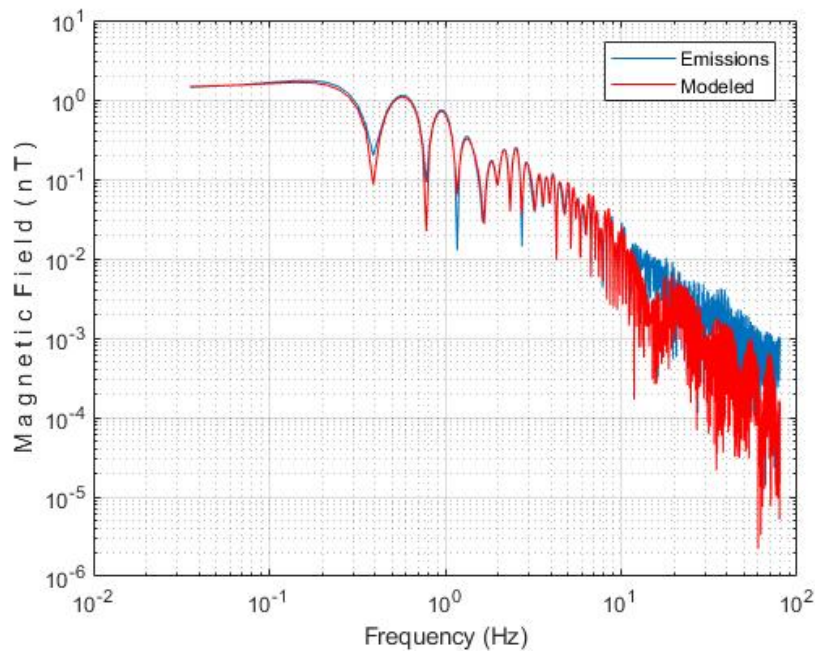
Πίνακας 12: Παράμετροι μοντέλου με παλμούς για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.

Παλμός	1	2
Εύρος παλμού $\tau$ (sec)	2.5303	2.6435
Χρόνος ανόδου $\tau_r$ (sec)	0.0641	0.0789
Πλάτος $A$ (nT)	6.6904	-3.8581
Χρονική στιγμή συμβάντος $\tau_p$ (sec)	2.0988	2.6893

Πίνακας 13: Κριτήρια αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου με παλμούς για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.

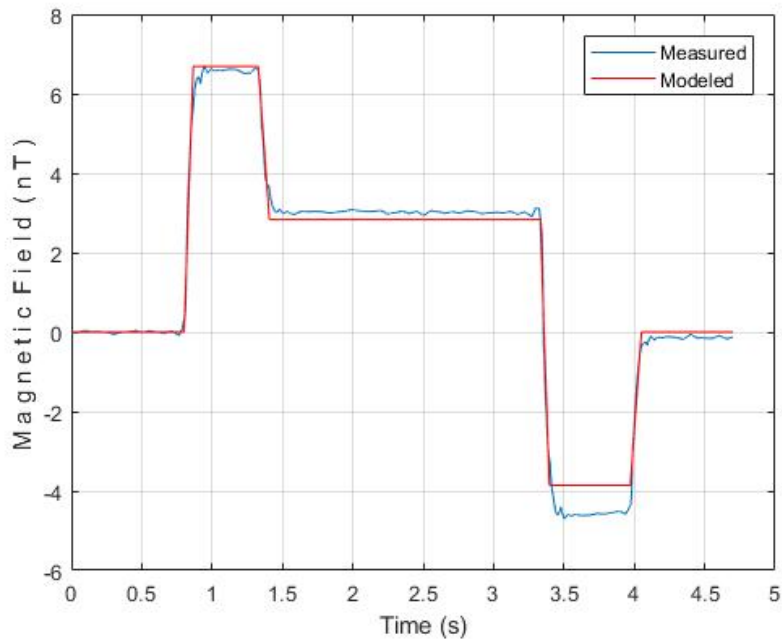
RMS (nT)	GoF (%)
0.0079	6.5617

Οι προβλεπόμενες παράμετροι των δύο τραπεζοειδών παλμών χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από το μοντέλο τόσο στο πεδίο της συχνότητας όσο και του χρόνου, όπως φαίνεται στις Εικόνα 46 και Εικόνα 47 αντίστοιχα, όπου συγκρίνονται με το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο της υπό εξέταση συσκευής.



Εικόνα 46: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας που προκύπτει από τη μοντελοποίηση με δύο τραπεζοειδείς παλμούς για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.





*Εικόνα 47: Μετρούμενο και ανακατασκευασμένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο του χρόνου που προκύπτει από τη μοντελοποίηση με δύο τραπεζοειδείς παλμούς για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.*

Σύμφωνα με την Εικόνα 46, το μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο φαίνεται να προσεγγίζει ικανοποιητικά το μετρούμενο μέχρι τα 10 Hz, ενώ ξεκινά να αποκλίνει για υψηλότερες συχνότητες μέχρι τα 80 Hz. Εντούτοις, τα επαρκώς χαμηλά κριτήρια αξιολόγησης του μοντέλου του Πίνακα 13 επιβεβαιώνουν πως το προβλεπόμενο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαράγει το φάσμα του μεταβατικού μαγνητικού πεδίου στο χαμηλό εύρος ζώνης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Πίνακα 12, φαίνεται πως οι δύο προβλεπόμενοι παλμοί έχουν παρόμοιο εύρος  $\tau$  και χρόνο ανόδου  $\tau_r$  και αντίθετες τιμές πλάτους  $A$ , όπως είναι αναμενόμενο από τη μαγνητική συμπεριφορά της συσκευής στο πεδίο του χρόνου, η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 47. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες οι δύο παλμοί συμβαίνουν είναι καθοριστικές για το άθροισμα τους τόσο στον χρόνο όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Τα αποτελέσματα στην Εικόνα 46 και Εικόνα 47 επιβεβαιώνουν την επαλληλία των παλμών στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας και συνεπώς η προτεινόμενη τεχνική είναι κατάλληλη για την πρόβλεψη παραπάνω από έναν παλμούς.

### **5.3.2 Μοντελοποίηση φασματικών ορίων**

Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι σημαντικός ο προσδιορισμός ενός μοντέλου που να περικλείει το φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου ώστε να εκτιμηθούν οι μέγιστες μαγνητικές εκπομπές μιας συσκευής. Όπως

αναλύθηκε και παραπάνω, αυτό μπορεί να γίνει με την εκτίμηση των κατάλληλων φασματικών ορίων. Τα φασματικά όρια που προκύπτουν από έναν παλμό θεωρούνται κατάλληλα για τις περιπτώσεις που μελετώνται. Το αντίστοιχο μοντέλο περιλαμβάνει δύο χαρακτηριστικά του παλμού, το εύρος  $\tau$  και τον χρόνο ανόδου  $\tau_r$  του τραπεζοειδή παλμού.

### 5.3.2.1 Επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Rechargeable battery)

Για τη μοντελοποίηση των φασματικών ορίων με τη διαδικασία της PSO, χρησιμοποιείται το φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου μέχρι τα 5 KHz της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας όπως αυτό προέκυψε από την επεξεργασία του σήματος στην ενότητα 5.3.1.1. Οι παράμετροι του προκύπτοντος μοντέλου καθώς και το κριτήριο αξιολόγησης του παρουσιάζονται στον Πίνακα 14 και Πίνακα 15, αντίστοιχα.

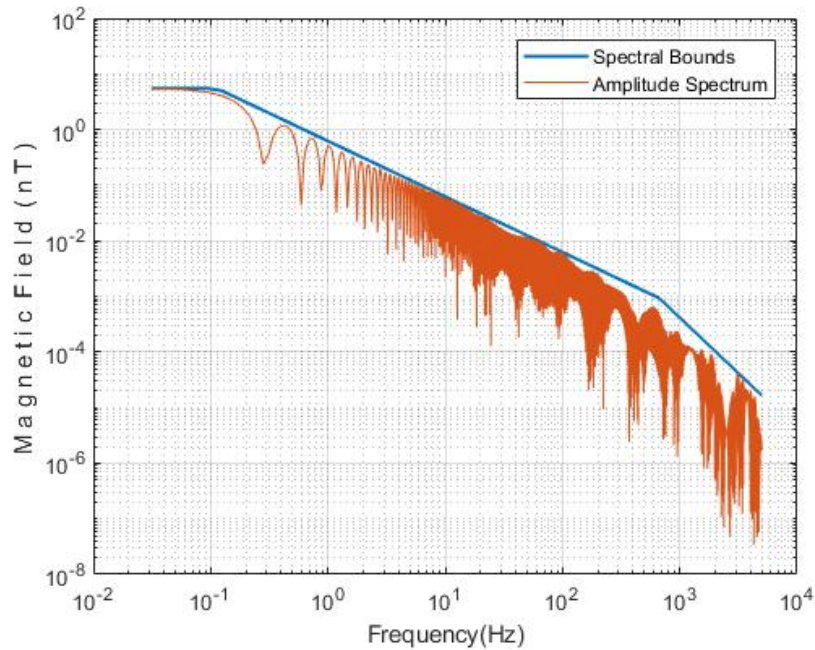
*Πίνακας 14: Παράμετροι μοντέλου φασματικών ορίων για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.*

Παλμός	Εύρος παλμού $\tau$ (sec)	Χρόνος ανόδου $\tau_r$ (sec)
1	2.84	0.0005

*Πίνακας 15: Κριτήριο αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου φασματικών ορίων για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.*

RMS (nT)
0.0118

Στην Εικόνα 48 απεικονίζονται το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας και τα προβλεπόμενα όρια, όπως αυτά διαμορφώνονται από το εκτιμώμενο μοντέλο.



*Εικόνα 48: Φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και τα εκτιμώμενα φασματικά όρια για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.*

Όπως είναι εμφανές και στην παραπάνω εικόνα, το παραγόμενο μοντέλο είναι ικανό να περικλείσει αρκετά ικανοποιητικά το φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και ουσιαστικά να προσδιορίσει τις μέγιστες μαγνητικές εκπομπές της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας. Επιπλέον, είναι φανερό πως οι παράμετροι του προβλεπόμενου μοντέλου βρίσκονται αρκετά κοντά στις τιμές του εύρους  $\tau$  και του χρόνου ανόδου  $\tau_r$  του παλμού που προέκυψε από τη μοντελοποίηση με τη χρήση τραπεζοειδών παλμών, υποδεικνύοντας τη σύγκλιση των δύο τεχνικών μοντελοποίησης.

### **5.3.2.2 Διακόπτης ραδιοσυχνοτήτων (RF switch)**

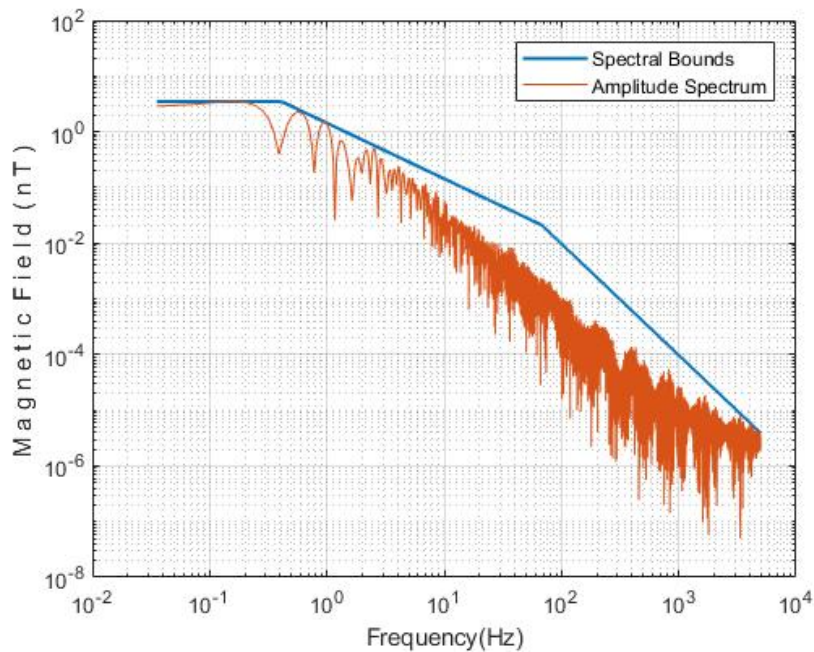
Η ίδια διαδικασία μοντελοποίησης των φασματικών ορίων ακολουθείται και στην περίπτωση του Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων. Το εκτιμώμενο μοντέλο φασματικών ορίων και το αντίστοιχο κριτήριο αξιολόγησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 16 και Πίνακα 17 αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, στην Εικόνα 49 απεικονίζεται το φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και τα εκτιμώμενα φασματικά όρια.

Πίνακας 16: Παράμετροι μοντέλου φασματικών ορίων για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.

Παλμός	Εύρος παλμού $\tau$ (sec)	Χρόνος ανόδου $\tau_r$ (sec)
1	0.7739	0.0047

Πίνακας 17: Κριτήριο αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου φασματικών ορίων για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.

RMS (nT)
0.0213



Εικόνα 49: Φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και τα εκτιμώμενα φασματικά όρια για τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων.

Είναι εμφανές πως τα εκτιμώμενα άνω φασματικά όρια ξεκινούν να αποκλίνουν για τις μαγνητικές εκπομπές πάνω από τα 10 Hz. Η απόκλιση αυτή προκύπτει από την υπόθεση πως τα φασματικά όρια προσδιορίζονται με τη χρήση ενός τραπεζοειδούς παλμού κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης, ενώ το μετρούμενο σήμα στον χρόνο αποτελείται από παραπάνω παλμούς. Εντούτοις, οι εκτιμώμενες παράμετροι του μοντέλου δημιουργούν φασματικά όρια που είναι ικανά να περικλείσουν επαρκώς το

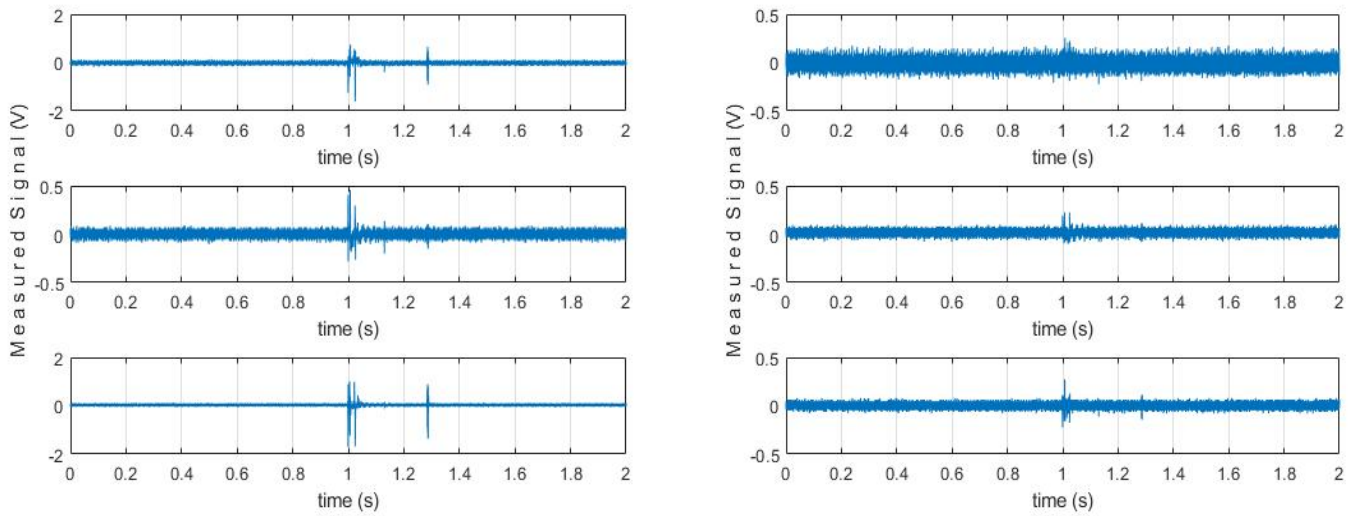
μετρούμενο μεταβατικό πεδίο και να παρέχουν μια εκτίμηση των μέγιστων μαγνητικών εκπομπών της συσκευής που μελετάται σύμφωνα με την Εικόνα 49. Επιπλέον, χρειάζεται να αναφερθεί πως καθώς οι δύο τρόποι μοντελοποίησης (με τραπεζοειδή παλμό και με φασματικά όρια) του μεταβατικού μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τον Διακόπτη Ραδιοσυχνοτήτων χρησιμοποιούν διαφορετικό πλήθος τραπεζοειδών παλμών, δεν είναι εφικτή η σύγκριση των παραμέτρων των εκάστοτε εκτιμώμενων μοντέλων. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι του μοντέλου των φασματικών ορίων δεν είναι δυνατό να αντιστοιχούν στα πραγματικά χαρακτηριστικά του μεταβατικού φαινομένου καθώς αυτό στην πραγματικότητα αποτελείται από δύο παλμούς στο πεδίο του χρόνου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 47, πληροφορία που λήφθηκε υπόψιν στη διαδικασία μοντελοποίησης με τη χρήση τραπεζοειδών παλμών.

### **5.3.2.3 Μονάδα διατήρησης και διανομής ισχύος (PCDU)**

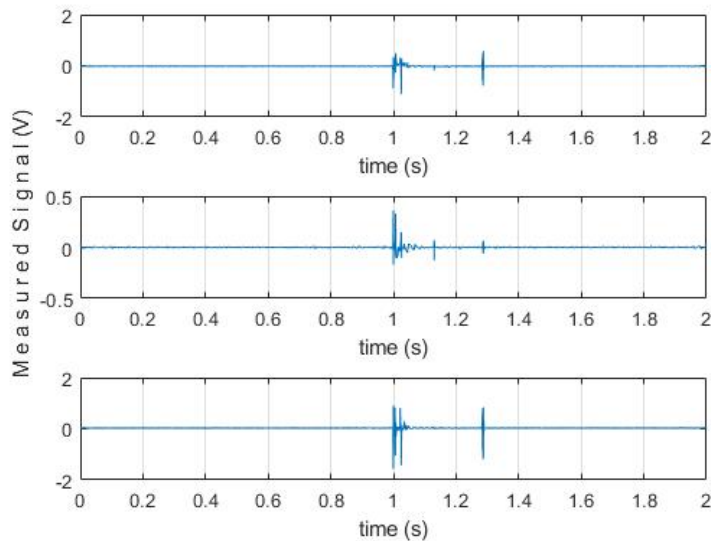
Τέλος, η συσκευή που μελετάται είναι το PCDU όταν βρίσκεται σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Οι μετρήσεις του κοντινού μαγνητικού πεδίου πραγματοποιούνται από δύο μαγνητόμετρα τύπου Search Coil (SCM) με συχνότητα δειγματοληψίας 500 KHz, καθώς η εξεταζόμενη συσκευή περιστρέφεται. Οι αισθητήρες βρίσκονται σε αποστάσεις 55.6 cm και 71.6 cm αντίστοιχα και σε επίπεδα στα 10 cm και -10 cm από το επίπεδο του τραπεζιού.

Η μέτρηση πραγματοποιείται σε χρονικό παράθυρο διάρκειας περίπου 10 sec. Παρ' όλα αυτά, ο χρόνος του σήματος περιορίζεται στα 2 sec, καθώς το διάστημα αυτό περιλαμβάνει ολόκληρο το μεταβατικό φαινόμενο. Επιπλέον, τα μαγνητόμετρα τύπου SCM μετρούν το σήμα σε Volts, τα οποία ύστερα μπορούν να μετατραπούν σε μονάδες μέτρησης μαγνητικού πεδίου μέσω διαφορετικών για το κάθε μαγνητόμετρο συναρτήσεων μεταφοράς. Στην Εικόνα 50 απεικονίζεται το σήμα όπως αυτό μετράται στους δύο αισθητήρες για περιστροφή της συσκευής κατά 0°.

Στη συνέχεια, εφαρμόζονται ορισμένες τεχνικές αποθρομβοποίησης ώστε να αφαιρεθούν ανεπιθύμητα στοιχεία του λαμβανόμενου σήματος. Συγκεκριμένα, το σήμα υποβάλλεται σε φιλτράρισμα των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή τα 50 Hz και τις αντίστοιχες αρμονικές και έπειτα χρησιμοποιούνται τα wavelets για περαιτέρω αποθρομβοποίηση. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί πως δεν είναι εφικτή η διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων, όπως επεξηγήθηκε στην παράγραφο 1.5.3 για την περίπτωση των SCM μαγνητομέτρων. Στην Εικόνα 51 απεικονίζεται το σήμα που μετρήθηκε στο κοντινό μαγνητόμετρο έπειτα από τις τεχνικές αποθρομβοποίησης.



*Εικόνα 50: Μετρούμενο σήμα του PCDU σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας με SCM -κοντινό (αριστερά) και μακρινό μαγνητόμετρο (δεξιά).*



*Εικόνα 51: Μετρούμενο σήμα του PCDU σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας με SCM έπειτα από τις τεχνικές αποθρομβολοποίησης.*

Όπως είναι εμφανές, το μεταβατικό φαινόμενο δεν έχει την ίδια μορφή όταν αυτό καταγράφεται με τους δύο διαθέσιμους όργανα μέτρησης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορετική συχνότητα δειγματοληψίας και το διαφορετικό εύρος ζώνης στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις με τα δύο είδη μαγνητομέτρων. Συγκεκριμένα, τα μαγνητόμετρα Fluxgate μετρούν μαγνητικό πεδίο στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων, δηλαδή από DC έως περίπου

τα 5 KHz, ενώ η ευαισθησία των SCM κυμαίνεται από το 1 Hz έως περίπου τα 250 KHz. Συνεπώς η DC συνιστώσα που φαίνεται στις μετρήσεις των Fluxgate, δεν θα εντοπίζεται στις μετρήσεις στην Εικόνα 51. Επιπλέον, στην εικόνα αυτή είναι εμφανές πως οι μεταβάσεις του σήματος είναι πιο απότομες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα SCM μετρούν σε αρκετά υψηλότερες συχνότητες από τα FGM μαγνητόμετρα.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο ASD του μετρούμενου σήματος που απαιτείται ώστε να εφαρμοστεί η κατάλληλη συνάρτηση μεταφοράς για κάθε συνιστώσα του μαγνητόμετρου που μελετάται σύμφωνα με την Εξ. 1. Το σήμα, που προκύπτει μετά την εφαρμογή της συνάρτησης μεταφοράς, αποτελεί το φάσμα του μαγνητικού πεδίου της υπό μέτρηση συσκευής και αφού υποστεί περαιτέρω αποθορυβοποίηση στο πεδίο της συχνότητας, πλέον χρησιμοποιείται ως είσοδος στη διαδικασία μοντελοποίησης της μεταβατικής μαγνητικής συμπεριφοράς του PCDU. Επειδή οι παλμοί του μεταβατικού φαινομένου δεν είναι ξεκάθαροι τόσο σε μορφή όσο και σε πλήθος, η κατάλληλη μέθοδος μοντελοποίησης στην περίπτωση μέτρησης με τους αισθητήρες SCM είναι ο προσδιορισμός των φασματικών ορίων. Το εκτιμώμενο μοντέλο φασματικών που περικλείει το σήμα σε όλο το εύρος ζώνης που μελετάται και το αντίστοιχο κριτήριο αξιολόγησης ενδεικτικά για τη x- συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 18 και Πίνακα 19 αντίστοιχα. Επιπλέον, το φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και τα εκτιμώμενα φασματικά όρια απεικονίζονται στην Εικόνα 52.

*Πίνακας 18: Παράμετροι μοντέλου φασματικών ορίων για το PCDU.*

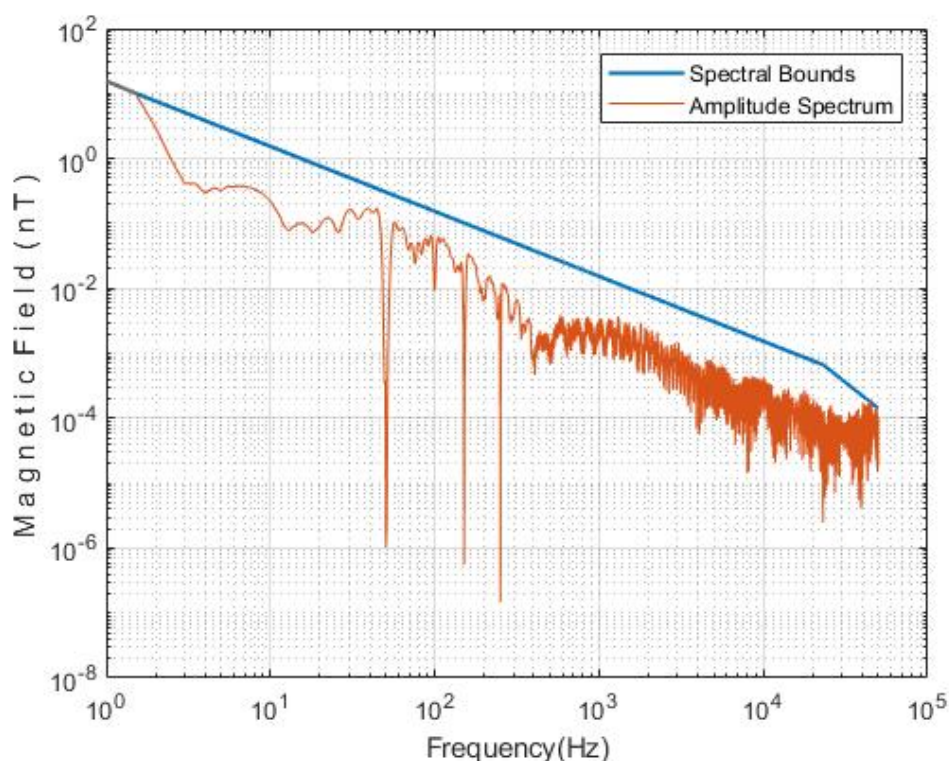
<b>Pulses</b>	<b>Pulse Duration <math>\tau</math> (sec)</b>	<b>Rise Time <math>\tau_r</math> (sec)</b>
1	0.3238	0.0001

*Πίνακας 19: Κριτήριο αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου φασματικών ορίων για το PCDU.*

<b>RMS (nT)</b>
0.0424

Σύμφωνα με τον Πίνακα 18, ο χρόνος ανόδου του εκτιμώμενου παλμού είναι περίπου 0,1 ms, που αντιστοιχεί σε χρονικά απότομο τραπεζοειδή παλμό, δηλαδή σχεδόν τετραγωνικό. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με το μετρούμενο σήμα στην Εικόνα 51. Επιπλέον, η διάρκεια του εκτιμώμενου παλμού είναι αρκετά μικρή, αλλά η πραγματική φαίνεται να είναι ακόμα μικρότερη. Εντούτοις, τα φασματικά όρια που προκύπτουν από το μοντέλο που

υπολογίστηκε περικλείουν επαρκώς το μεταβατικό μαγνητικό πεδίο και αποτελούν μια εκτίμηση των μέγιστων μαγνητικών εκπομπών του PCDU, όπως φαίνεται από το κριτήριο αξιολόγησης του Πίνακα 19 και την Εικόνα 52. Τέλος, το σήμα έχει ακριβείς τιμές μέχρι τα 51 KHz, όπου είναι το όριο της συνάρτησης μεταφοράς του μαγνητομέτρου SCM. Αν λοιπόν το σήμα εκτεινόταν μέχρι εκεί, τότε τα φασματικά όρια θα περικλείαν ακόμα πιο αποτελεσματικά το φάσμα, σε αντίθεση με την Εικόνα 52 όπου το φάσμα μετά τα 51 KHz παρουσιάζεται ανασηκωμένο και συνεπώς επηρεάζει την ποιότητα των εκτιμώμενων φασματικών ορίων.



Εικόνα 52: Φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και τα εκτιμώμενα φασματικά όρια για το PCDU-x συνιστώσα.

### 5.3.3 Μοντελοποίηση με μαγνητικά δίπολα

Τέλος, για να μοντελοποιηθεί η χωρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου γύρω από τη συσκευή είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί ένα μοντέλο μαγνητικών δίπολων. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται οι DC τιμές του μαγνητικού πεδίου σε όλα τα σημεία μέτρησης, όπως έχουν προκύψει από την επεξεργασία που παρουσιάστηκε και μοντελοποιούνται με ένα ή δύο μαγνητικά δίπολα. Οι παράμετροι του μοντέλου, που μπορούν να εκτιμηθούν με τη στοχαστική μέθοδο PSO, είναι η θέση  $x, y, z$  και η μαγνητική ροπή  $m_x, m_y, m_z$  του κάθε μαγνητικού δίπολου. Το εκτιμώμενο μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει τη DC μαγνητική συμπεριφορά της συσκευής.



### 5.3.3.1 Επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Rechargeable battery)

Αφού καταγραφούν οι μαγνητικές εκπομπές της εξεταζόμενης συσκευής καθώς η συσκευή περιστρέφεται κατά τη διάρκεια της μεταβατικής της λειτουργίας, το μαγνητικό πεδίο υφίσταται διάφορες τεχνικές αποθρομβοποίησης και επεξεργασίας, όπως αυτές περιγράφηκαν συνολικά στην ενότητα 5.3.1.1. Τελικά, υπολογίζεται το φάσμα του μαγνητικού πεδίου το οποίο και χρησιμοποιείται στην προτεινόμενη μέθοδο μοντελοποίησης.

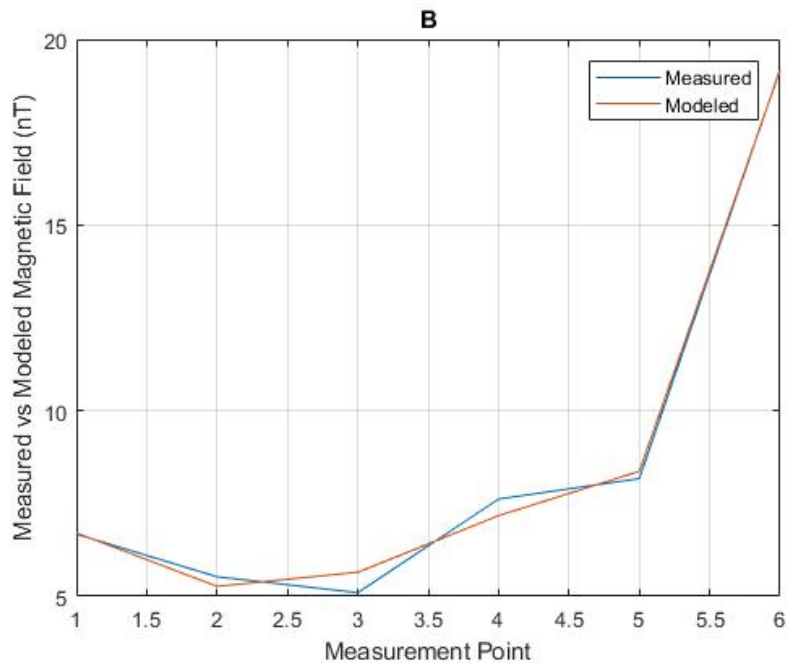
Οι DC τιμές του μέτρου του επεξεργασμένου μαγνητικού πεδίου της Επαναφορτιζόμενης μπαταρίας σε όλα τα σημεία μέτρησης του πάνω κύκλου (6 μετρήσεις οι οποίες έχουν προκύψει από τις διαφορές των δύο πεδίων που μετρήθηκαν ταυτόχρονα από τα δύο FGM μαγνητόμετρα) επιλέγονται να μοντελοποιηθούν με ένα μαγνητικό δίπολο ώστε να περιγραφεί η χωρική κατανομή του εκπεμπόμενου μαγνητικού πεδίου. Η επιλογή των μετρήσεων του πάνω κύκλου καθορίζεται και περιορίζεται από την παρουσία του αγωγίου επιπέδου γείωσης, όπως εξηγείται στα κεφάλαια 4 και 7. Οι παράμετροι του προκύπτοντος μοντέλου καθώς και τα αντίστοιχα κριτήρια αξιολόγησης αυτής της λύσης είναι καταγεγραμμένα στον Πίνακα 20 και Πίνακα 21. Επιπλέον, στην Εικόνα 53 παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου στα 6 σημεία παρατήρησης για τη DC συνιστώσα κατά τη διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας.

Πίνακας 20: Παράμετροι μοντέλου για τη μεταβατική λειτουργία της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας.

Dipole	1
x (cm)	6.5364
y (cm)	13.2022
z (cm)	0.5277
mx (mAm <sup>2</sup> )	4.2675
my (mAm <sup>2</sup> )	4.7819
mz (mAm <sup>2</sup> )	98.5011

Πίνακας 21: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενου μοντέλου για την Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία.

Field RMS (nT)	GoF (%)
0.3192	3.2086

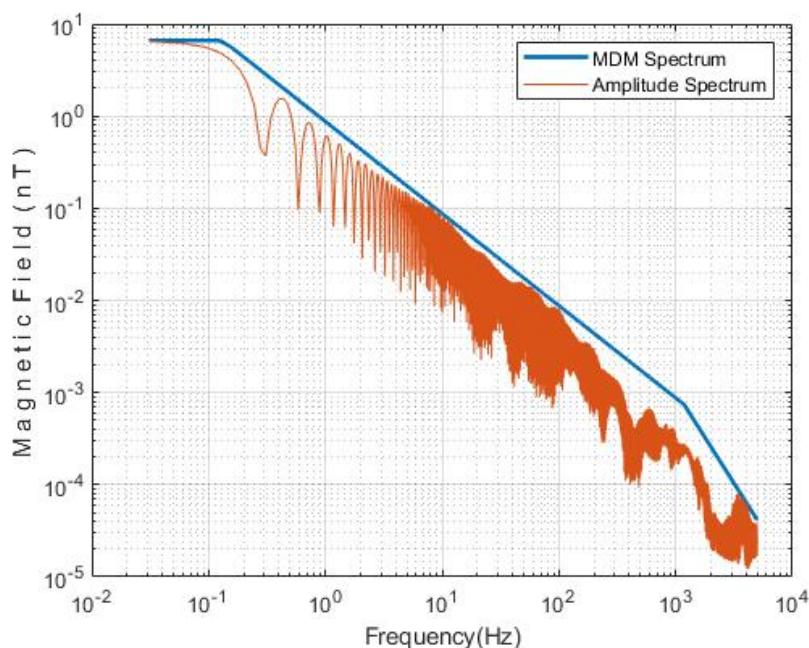


Εικόνα 53: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο (μέτρο) της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας σύμφωνα με την MDM τεχνική.

### 5.3.4 Συνδυασμός τεχνικών

Τελικά, το μοντέλο μαγνητικού δίπολου (MDM) μπορεί να συνδυασθεί με το αντίστοιχο μοντέλο φασματικών ορίων (συνδυασμός ουσιαστικά των εκτιμώμενων DC τιμών με τις φασματικές διακυμάνσεις αντίστοιχα) της εκάστοτε εξεταζόμενης συσκευής, η οποία βρίσκεται σε κατάσταση μεταβατικής λειτουργίας ώστε να εκτιμηθεί το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο στα σημεία μέτρησης. Ενδεικτικά, η περίπτωση της Επαναφορτιζόμενης Μπαταρίας απεικονίζεται στην Εικόνα 54 για γωνία περιστροφής  $0^\circ$ . Συγκεκριμένα, για την περίπτωση που παρουσιάζεται, έχει υπολογισθεί το άνω φασματικό όριο του μέτρου του μαγνητικού πεδίου για την κάθε γωνία μέτρησης. Οι παράμετροι του συγκεκριμένου μοντέλου φασματικών ορίων συνδυάζεται με το εκτιμώμενο διπολικό μοντέλο, καθώς και τα δύο έχουν εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τα μέτρα του μαγνητικού πεδίου για όλες τις γωνίες περιστροφής της εξεταζόμενης συσκευής.

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιβεβαιωθεί πως οι εκτιμώμενες παράμετροι των δύο μοντέλων (MDM και φασματικά όρια) είναι κατάλληλες για την περιγραφή της μαγνητικής συμπεριφοράς της εκάστοτε συσκευής στο πεδίο της συχνότητας για τις διάφορες γωνίες περιστροφής κατά τη διάρκεια των μαγνητικών μετρήσεων.



*Εικόνα 54: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο (μέτρο) που έχει προκύψει από το μοντέλο φασματικών ορίων και το μοντέλο μαγνητικού δίπολου.*

## 5.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκαν τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από συσκευές σε μεταβατική λειτουργία. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν τεχνικές επεξεργασίας και αποθορυβοποίησης των μετρούμενων σημάτων καθώς και δύο τρόποι μοντελοποίησης της μεταβατικής μαγνητικής συμπεριφοράς μιας συσκευής χρησιμοποιώντας τη στοχαστική μέθοδο PSO. Σε κάθε περίπτωση, μελετάται ένα μεταβατικό φαινόμενο που έχει απομονωθεί από το συνολικά μετρούμενο μαγνητικό πεδίο και περιλαμβάνει ένα άνοιγμα-κλείσιμο της εκάστοτε συσκευής. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε μετρήσεις πραγματικού διαστημικού εξοπλισμού και εξήχθησαν τα αντίστοιχα μοντέλα. Και οι δύο τρόποι μοντελοποίησης, με τραπεζοειδείς παλμούς και με φασματικά όρια, αποτελούν αξιόπιστους τρόπους για την παραγωγή μοντέλων των μαγνητικών εκπομπών μιας συσκευής, τα οποία είναι κατάλληλα για την πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς μιας συσκευής σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6. ΕΞΕΤΑΣΗ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΟΛΩΝ

#### 6.1 Εισαγωγή

Μέχρι πρόσφατα λαμβανόταν υπόψιν κυρίως η συνεισφορά της παραμένουσας μαγνήτισης σύμφωνα με καθιερωμένες τεχνικές [5] [31], καθώς το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο θεωρείτο ότι μπορούσε να αγνοηθεί. Ωστόσο, με την αυξανόμενη επιτυχία της μείωσης των μαγνητικών υλικών με παραμένουσα μαγνήτιση, τα υλικά που σχετίζονται με επαγόμενα μαγνητικά πεδία παίζουν όλο και σημαντικότερο ρόλο.

Στην περίπτωση των ιδιοτήτων επαγόμενης μαγνήτισης, μπορούν να γίνουν ορισμένες παραδοχές σχετικά με τη μαγνητική υστέρηση του υλικού [8]:

- Γραμμική απόκριση της εσωτερικής μαγνήτισης σε εξωτερικά πεδία
- Μη κορεσμός της μαγνήτισης
- Η υστέρηση είναι αμελητέα

Για επίπεδα μαγνητικού πεδίου μικρότερα από 100  $\mu\text{T}$ , οι δύο πρώτες παραδοχές πληρούνται συνήθως για μαλακά μαγνητικά υλικά που υπάρχουν σε μονάδες διαστημικού εξοπλισμού. Η τρίτη παραδοχή απαιτεί επίσης μαλακά μαγνητικά υλικά. Αν πληρούνται όλες οι παραδοχές, τότε η σχέση μεταξύ του εφαρμοζόμενου εξωτερικού πεδίου και του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου της συσκευής είναι γραμμική. Σε περίπτωση που η σχέση δεν είναι γραμμική, η απόκλιση θα συμβάλει στην αβεβαιότητα των προβλεπόμενων τιμών. Εκτός από αυτές τις υποθέσεις, θεωρείται ότι κυριαρχούν τα φαινόμενα πρώτης τάξης, δηλαδή αγνοείται η επιπρόσθετη μαγνήτιση από πεδία που προέρχονται από την επαγόμενη μαγνήτιση μιας συσκευής.

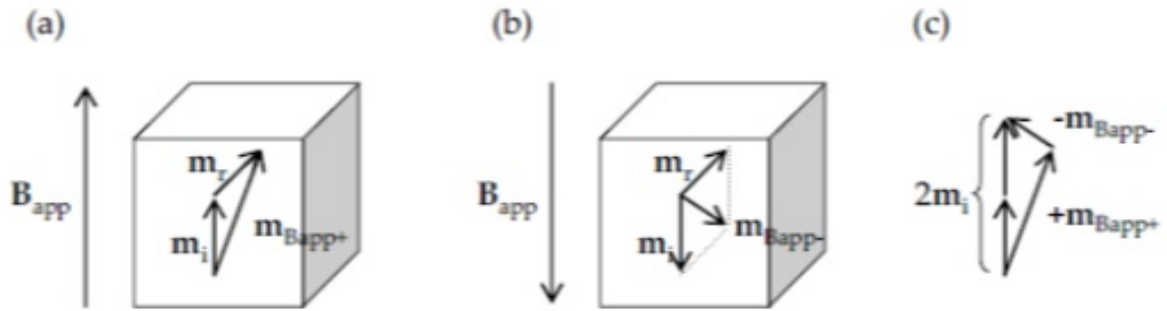
Συνεπώς, οι συσκευές που αποτελούν μαγνητικό εξοπλισμό χρειάζεται να υποβληθούν σε περαιτέρω μαγνητικές μετρήσεις, ώστε να καθοριστεί η συμπεριφορά τους υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

## 6.2 Μετρητική διάταξη & περιγραφή της μεθόδου

Μια απλή μέθοδος για τη μέτρηση των επαγόμενων μαγνητικών ροπών συνίσταται στη χρησιμοποίηση των υπαρχόντων εγκαταστάσεων MCF, οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση των παραμένουσων μαγνητικών ροπών. Τα πηνία μιας εγκατάστασης MCF, που είναι συνήθως υπεύθυνα για την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή ενός γνωστού μαγνητικού πεδίου στη δοκιμαζόμενη συσκευή [10].

Συνεπώς, η μετρητική διάταξη για τη μελέτη της επαγόμενης μαγνήτισης παραμένει η ίδια όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 1.5.1 με ορισμένες διαφορές κατά τη διεξαγωγή των μαγνητικών μετρήσεων. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται όταν η εξεταζόμενη συσκευή βρίσκεται απενεργοποιημένη. Ταυτόχρονα, κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο DC ή/και AC, το οποίο παράγεται από τα πηνία Helmholtz. Για το DC μαγνητικό πεδίο τα τυπικά επίπεδα είναι περίπου  $\pm 50$  nT και  $\pm 100$  nT, δηλαδή διαφορετικά επίπεδα με αντίθετα πρόσημα. Τα τυπικά επίπεδα για το εξωτερικό AC μαγνητικό πεδίο είναι 10  $\mu$ T από κορυφή σε κορυφή. Επίσης, η επαγόμενη AC μαγνητική υπογραφή της εξεταζόμενης συσκευής μελετάται για δύο διαφορετικές συχνότητες, 1 Hz και 100 Hz, του εξωτερικού πεδίου. Η συσκευή αρχικά τοποθετείται στο επίπεδο  $xy$  και τα δύο μαγνητόμετρα καταγράφουν το μαγνητικό πεδίο καθώς η συσκευή περιστρέφεται ανά  $60^\circ$ . Στη συνέχεια, η συσκευή αναστρέφεται ( $xz$  και  $yz$  επίπεδα) και η διαδικασία μέτρησης επαναλαμβάνεται ώστε να καταγραφεί η επαγόμενη μαγνητική ροπή διαδοχικά και για τους τρεις ορθογώνιους άξονες. Τέλος, απαιτείται η μέτρηση του AC μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος ώστε να εξαιρεθεί από τις αντίστοιχες μετρήσεις επαγόμενου μαγνητικού πεδίου της εξεταζόμενης συσκευής.

Στην περίπτωση της DC επαγόμενης μαγνήτισης, το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται κάθετα σε μία κατεύθυνση και η επαγόμενη μαγνητική ροπή στη συσκευή παραμένει σταθερή κατά την περιστροφή, καθώς είναι συνεχώς παράλληλη στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Για τον διαχωρισμό της παραμένουσας και της επαγόμενης μαγνητικής ροπής, απαιτούνται μετρήσεις με δύο μαγνητικά πεδία  $\mathbf{B}_{app}$  με αντίθετες κατευθύνσεις. Αυτό οδηγεί σε δύο διαφορετικές επαγόμενες μαγνητικές ροπές,  $(\mathbf{m}_{app+})$  και  $(\mathbf{m}_{app-})$  ανάλογα με τον προσανατολισμό του εφαρμοζόμενου πεδίου  $\mathbf{B}_{app}$ . Η διανυσματική ανάλυση υποδεικνύει πως η διαφορά ανάμεσα στις ροπές  $(\mathbf{m}_{app+})$  και  $(\mathbf{m}_{app-})$  δίνει το διπλάσιο της επαγόμενης μαγνητικής ροπής, ενώ η παραμένουσα μαγνητική ροπή ακυρώνεται, σύμφωνα με την Εικόνα 55.



Εικόνα 55: Στάδια μέτρησης DC επαγόμενης μαγνητικής ροπής.

Συνεπώς, η επαγόμενη μαγνητική ροπή μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$m_i = \frac{(m_{B_{app}+}) - (m_{B_{app}-})}{2} \quad \text{Εξ. 52}$$

Για κάθε άξονα της συσκευής, η τιμή της επαγόμενης μαγνητικής ροπής εξαρτάται από το πλάτος του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Αν εφαρμοσθούν δύο διαφορετικά επίπεδα εξωτερικού μαγνητικού πεδίου παράλληλα και αντιπαράλληλα, τότε θα προκύψουν δύο τιμές μαγνητικής ροπής, που θα είναι όμοιες αν η καμπύλη μαγνήτισης είναι γραμμική για το εύρος τιμών του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Αν η επαγόμενη μαγνήτιση διαφέρει αρκετά από την γραμμική καμπύλη, τότε δύο εξηγήσεις είναι πιθανές. Είτε η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ανεπαρκής, είτε η καμπύλη μαγνήτισης είναι όντως μη γραμμική για το εύρος τιμών του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητος ένας πιο ακριβής χαρακτηρισμός της μη γραμμικότητας, όπως η επανάληψη των μετρήσεων για παραπάνω από δύο επίπεδα εφαρμοζόμενου πεδίου.

Στην περίπτωση της AC επαγόμενης μαγνήτισης, χρειάζεται να εισαχθεί ο όρος της AC μαγνητικής ευαισθησίας, ή αλλιώς μαγνητική πολωσιμότητα, η οποία είναι η διπολική απόκριση ανά μονάδα όγκου από το αντικείμενο ενδιαφέροντος σε ένα εξωτερικό εφαρμοζόμενο πεδίο:

$$m_{AC} = V \cdot \chi_{AC} \cdot H_{app} \quad \text{Εξ. 53}$$

όπου  $V$  είναι ο όγκος της εξεταζόμενης συσκευής,  $\chi_{AC}$  η AC μαγνητική ευαισθησία και  $\mathbf{H}_{app}$  το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται. Επιπλέον, καθώς το φαινόμενο αυτό οφείλεται στα δινορεύματα που αναπτύσσονται πάνω στις αγωγίμες επιφάνειες της συσκευής, η συσκευή χρειάζεται να είναι απενεργοποιημένη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο στη συσκευή αναμένεται να εμφανίζεται στην ίδια συχνότητα με αυτή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}_{app}$  και πιθανώς σε αρμονικές της συχνότητας λειτουργίας της πηγής. Ιδανικά, σε υψηλές συχνότητες το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο στη συσκευή θα τείνει να ανθίσταται στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με τον νόμο του Lenz.

Η επαγόμενη μαγνήτιση της συσκευής μπορεί να μοντελοποιηθεί στον τομέα της συχνότητας με μαγνητικά δίπολα που ταλαντώνονται στη συχνότητα του εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου στην περίπτωση της AC μαγνήτισης και χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες τιμές του σταθερού παραγόμενου μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση της DC επαγόμενης μαγνήτισης, με τη βοήθεια στοχαστικών μεθόδων. Για κάθε κατεύθυνση εφαρμογής του εξωτερικού πεδίου, ένα μοντέλο επαγόμενων μαγνητικών δίπολων μπορεί να δημιουργηθεί. Ακολουθώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία, η απόκριση της συσκευής στο εφαρμοζόμενο πεδίο σε μια αυθαίρετη κατεύθυνση μπορεί συνελώς να υπολογισθεί ως ο γραμμικός συνδυασμός των αποκρίσεων που αντιστοιχούν στους κύριους άξονες  $x, y, z$ .

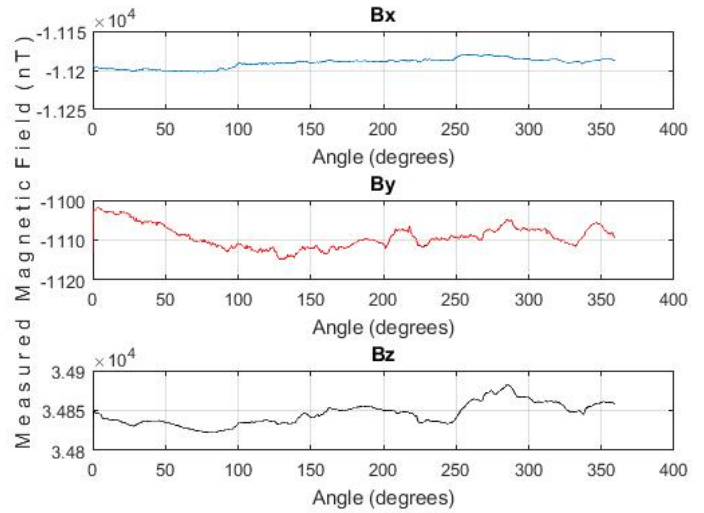
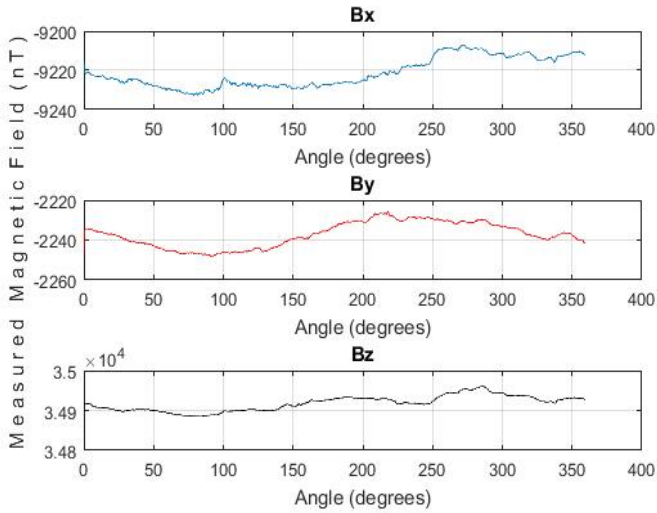
## **6.3 Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και μποτελέσματα μοντελοποίησης**

### **6.3.1 DC επαγόμενα μαγνητικά πεδία**

Τα πηνία της εγκατάστασης MCF δημιουργούν ένα εξωτερικό πεδίο (10  $\mu\text{T}$  και 90  $\mu\text{T}$ ), σε αντίθετη κατεύθυνση από το πεδίο της Γης, το οποίο εφαρμόζεται στην εξεταζόμενη συσκευή. Η συσκευή που μελετάται, η οποία είναι ένας διακόπτης ραδιοσυχνοτήτων (RF Switch), είναι τοποθετημένη στο τραπέζι στο  $xy$  επίπεδο και καθώς περιστρέφεται δύο μαγνητόμετρα τύπου FGM καταγράφουν τη DC επαγόμενη μαγνητική υπογραφή της. Στη συνέχεια, η συσκευή αναστρέφεται ( $xz$  και  $yz$  επίπεδα) ώστε να μελετηθεί η επαγόμενη μαγνήτιση και στα τρία επίπεδα.

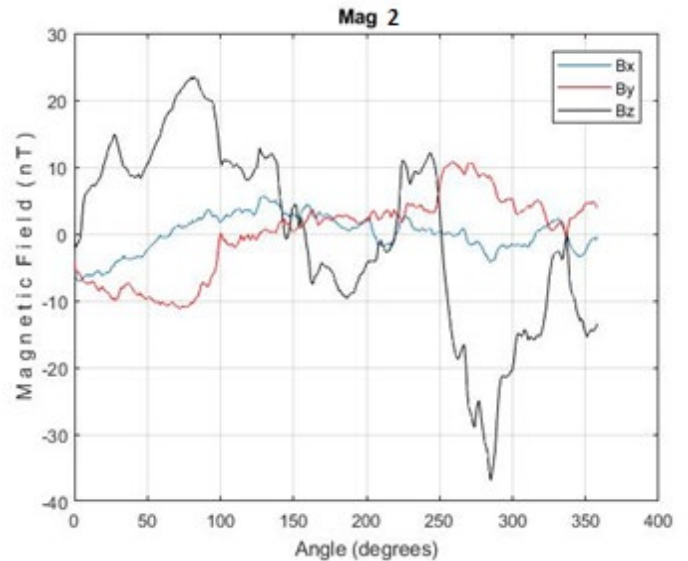
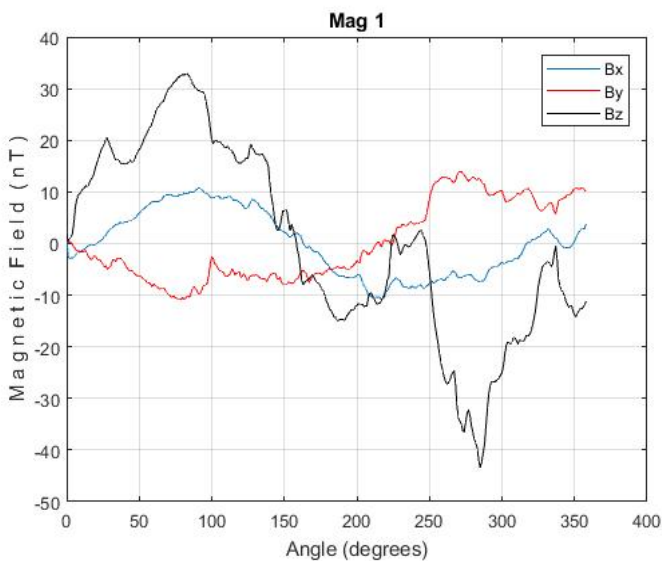
Τα μετρούμενα μαγνητικά πεδία μπορούν να απεικονισθούν συναρτήσει της γωνίας περιστροφής της συσκευής. Η DC επαγόμενη μαγνητική υπογραφή του RF Switch, ενδεικτικά όταν βρίσκεται στο επίπεδο  $xy$  και για εξωτερικό πεδίο πλάτους 10  $\mu\text{T}$ , απεικονίζεται στην Εικόνα 56 όπως αυτή καταγράφεται από τα δύο μαγνητόμετρα.





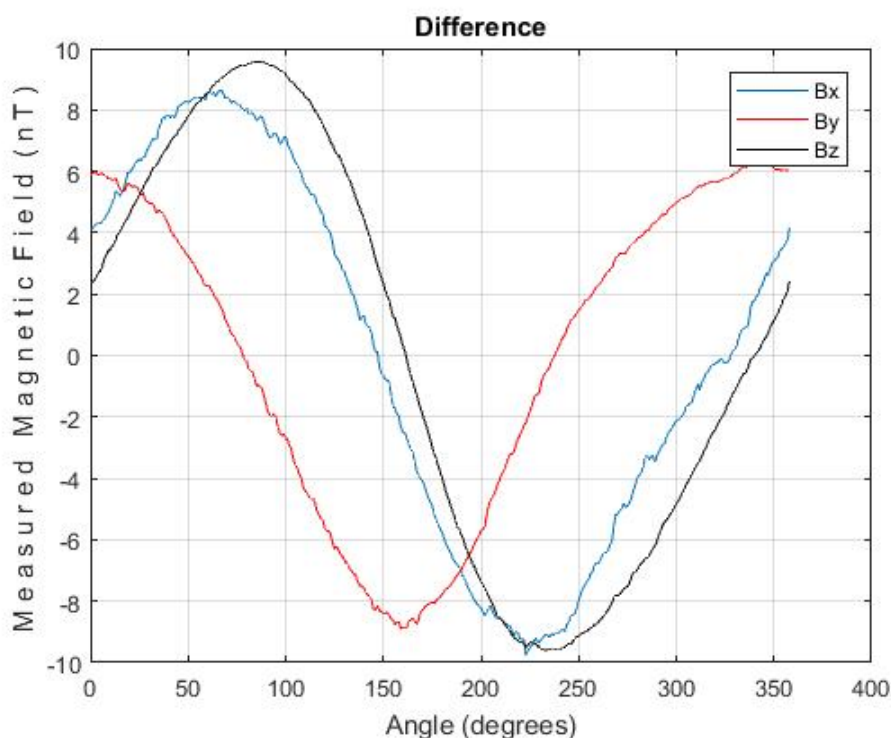
Εικόνα 56: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο καθώς το RF Switch περιστρέφεται.

Στη συνέχεια, το σήμα επεξεργάζεται και αποθρομβολοιείται. Συγκεκριμένα, αρχικά απομακρύνεται η DC συνιστώσα από κάθε μετρούμενη συνιστώσα αφαιρώντας τη μέση τιμή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, καθώς το εξωτερικό εφαρμοζόμενο πεδίο διαφέρει ανάμεσα στους δύο αισθητήρες αλλά είναι ομοιόμορφο κατά την περιστροφή της συσκευής. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο αφαιρείται και το DC μαγνητικό πεδίο της Γης. Το μαγνητικό πεδίο, όπως προκύπτει από την αφαίρεση της DC συνιστώσας, απεικονίζεται στην Εικόνα 57 για τα δύο μαγνητόμετρα.



Εικόνα 57: Το μαγνητικό πεδίο όπως προκύπτει έπειτα από αφαίρεση της DC συνιστώσας για τα δύο μαγνητόμετρα.

Έπειτα, υπολογίζονται οι διαφορές ανάμεσα στα ταυτόχρονα μετρούμενα μαγνητικά πεδία από τα δύο μαγνητόμετρα επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο αφαίρεση των μεταβολών του χαμηλόσυχνου μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος το οποίο είναι ομοιόμορφο στα δύο μαγνητόμετρα. Το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει μετά την επεξεργασία που περιγράφηκε απεικονίζεται στην Εικόνα 58 συναρτήσει της γωνίας περιστροφής της συσκευής.



Εικόνα 58: Μαγνητικό πεδίο έπειτα από επεξεργασία και αποθρομβολοποίηση.

Τέλος, οι τιμές του μαγνητικού πεδίου για όλες τις συνιστώσες και όλες τις γωνίες περιστροφής χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενός μοντέλου που αποτελείται από δύο μαγνητικά δίπολα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για τα τρία επίπεδα  $xy, yz$  και  $xz$  όταν εφαρμόζονται διαφορετικά επίπεδα εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Οι παράμετροι των μοντέλων και τα αντίστοιχα κριτήρια αξιολόγησης και για τα τρία επίπεδα καταγράφονται στον Πίνακα 22 και Πίνακα 23, για την περίπτωση που το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι  $10 \mu T$ .

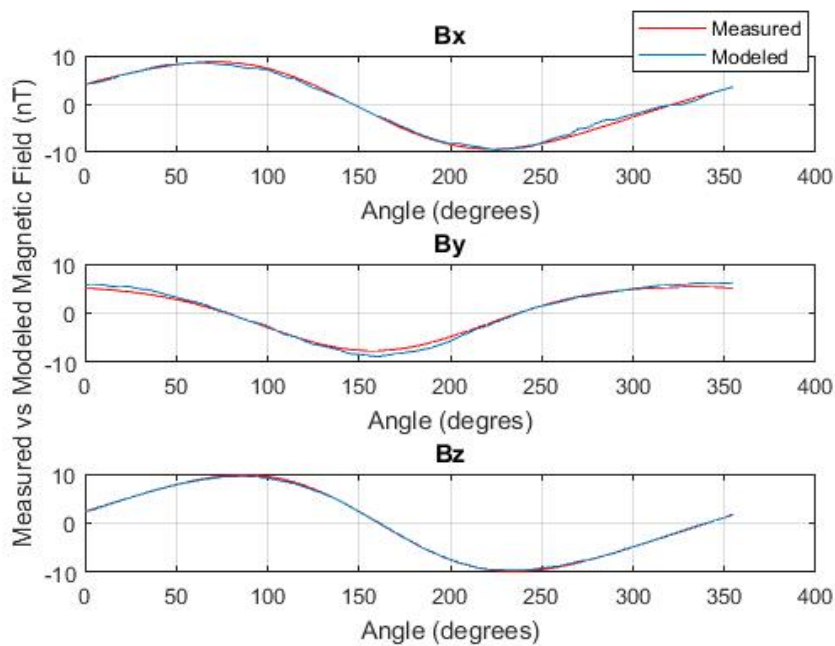
Οι τιμές του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου συγκρίνονται για όλες τις συνιστώσες στην Εικόνα 59, Εικόνα 60 και Εικόνα 61 στην περίπτωση που τα επίπεδα που μελετώνται είναι  $xy, yz$  και  $xz$ , αντίστοιχα, και το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο είναι  $10 \mu T$ .

Πίνακας 22: Παράμετροι μοντέλων μαγνητικών δίπολων για την DC επαγόμενη μαγνήτιση του RF Switch για κάθε επίπεδο.

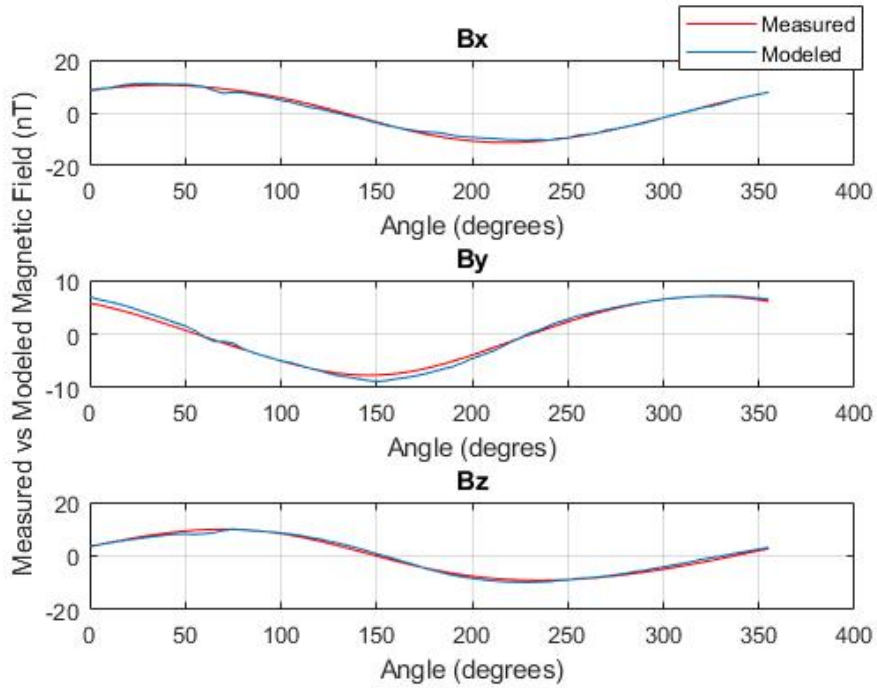
Plane	xy		xz		yz	
	1	2	1	2	1	2
<b>Dipole</b>						
<b>x (cm)</b>	-2.1144	-1.3447	0.005	0.3985	0	0.3961
<b>y (cm)</b>	0.5677	-2.0465	-1.7518	-2.058	-0.3991	-2.5391
<b>z (cm)</b>	0.0057	0.0498	0.0141	2.3489	0.0012	0.0084
<b>mx (mAm<sup>2</sup>)</b>	1.4925	0.5661	5.6984	-2.7625	4.5039	-1.7259
<b>my (mAm<sup>2</sup>)</b>	-1.6482	-2.0348	-13.9437	10.6293	-3.2417	-0.6322
<b>mz (mAm<sup>2</sup>)</b>	11.1562	-11.1335	0.1227	0.1071	12.6182	-12.4542

Πίνακας 23: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενων μοντέλων για την DC επαγόμενη μαγνήτιση του RF Switch για κάθε επίπεδο.

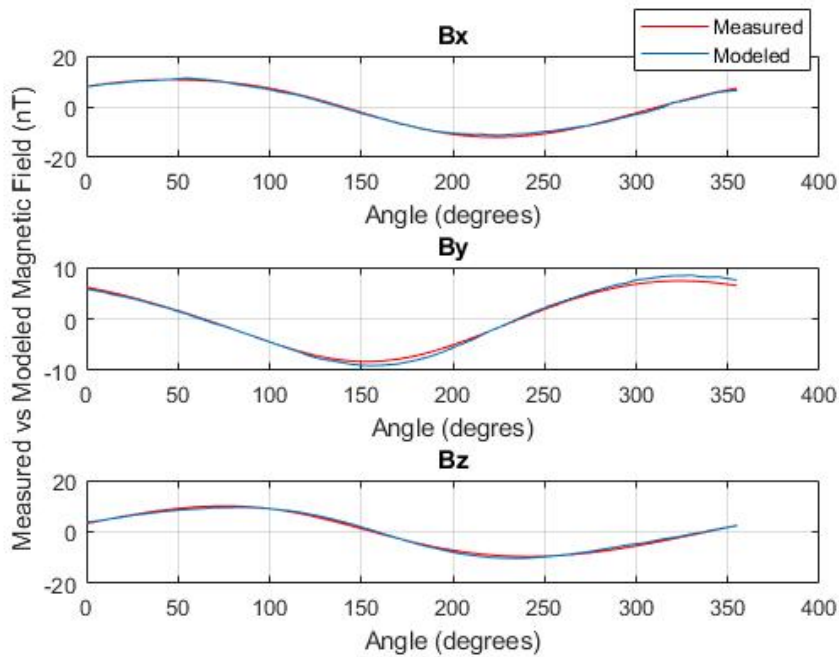
Plane	Field RMS (nT)	Error Percent (%)
xy	0.4371	7.3271
xz	0.6631	10.0507
yz	0.5267	7.5815



Εικόνα 59: Μοντελοποιημένο και μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο-xy επίπεδο-10  $\mu T$  εξωτερικό πεδίο.



Εικόνα 60: Μοντελοποιημένο και μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο- $xz$  επίπεδο- $10 \mu T$  εξωτερικό πεδίο.

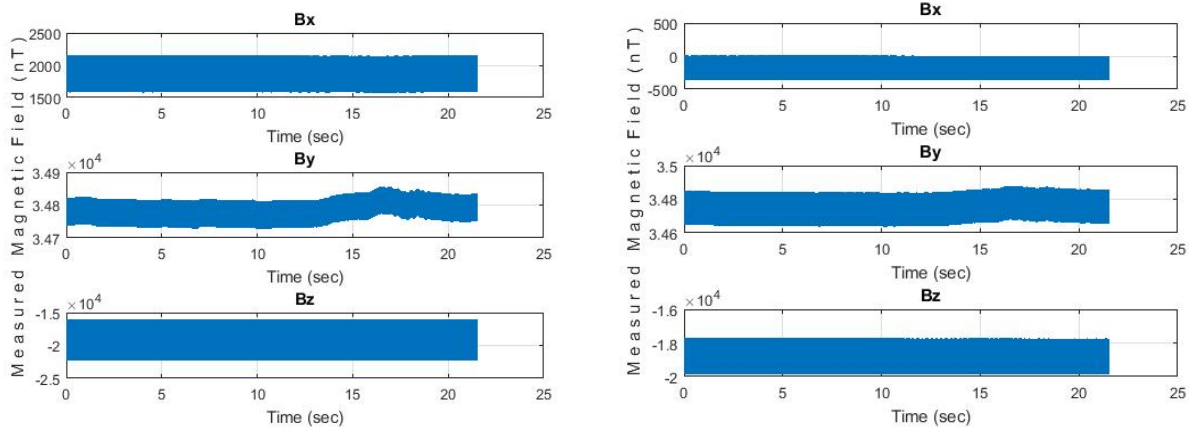


Εικόνα 61: Μοντελοποιημένο και μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο- $yz$  επίπεδο- $10 \mu T$  εξωτερικό πεδίο.

### 6.3.2 AC επαγόμενα μαγνητικά πεδία

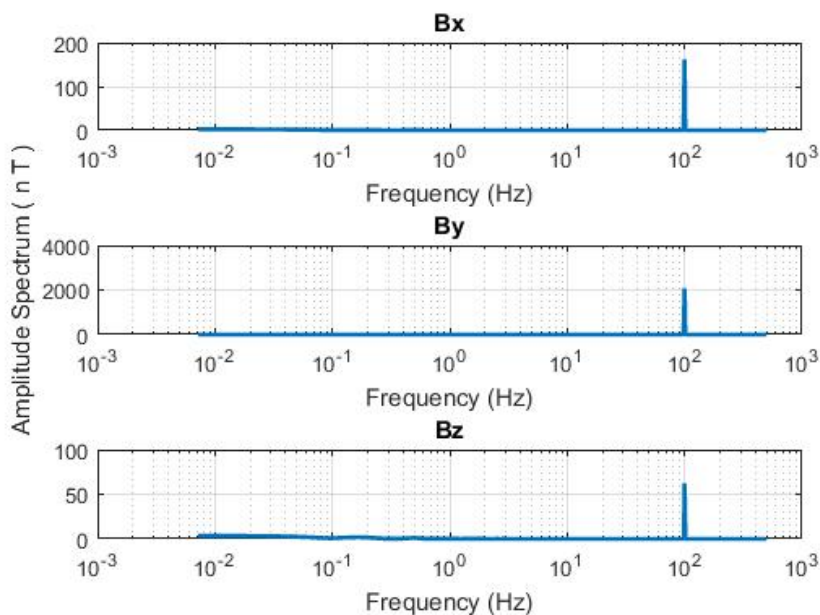
Οι μαγνητικές μετρήσεις για την μελέτη της AC επαγόμενης μαγνήτισης πραγματοποιούνται με όμοιο τρόπο με τη μελέτη της περίπτωσης της DC μαγνήτισης. Συγκεκριμένα, το χρονικά μεταβαλλόμενο εξωτερικό πεδίο έχει συχνότητα 1 και 100 Hz και εφαρμόζεται σε αντίθετη κατεύθυνση από το πεδίο της Γης. Η συσκευή που μελετάται είναι το RF Switch και οι μετρήσεις εκτελούνται κατά την περιστροφή του. Χρειάζεται να σημειωθεί πως η συσκευή είναι ενεργοποιημένη κατά τη διάρκεια των μαγνητικών μετρήσεων.

Το χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, που προκύπτει από την AC επαγόμενη μαγνήτιση του RF Switch στο επίπεδο  $xy$ , απεικονίζεται στην Εικόνα 62 για την περίπτωση που το εξωτερικό πεδίο έχει συχνότητα 100 Hz ενδεικτικά για γωνία περιστροφής της συσκευής κατά  $0^\circ$ .



Εικόνα 62: Μετρούμενο μαγνητικό πεδίο υπό την επίδραση εξωτερικού AC μαγνητικού πεδίου.

Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο υφίσταται τεχνικές επεξεργασίας και αποθρομβοποίησης. Συγκεκριμένα, αρχικά αφαιρείται η DC συνιστώσα των μαγνητικών πεδίων και υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ των μαγνητικών πεδίων που καταγράφονται ταυτόχρονα από τα δύο μαγνητόμετρα. Έπειτα, το προκύπτον σήμα υποβάλλεται σε φιλτράρισμα των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό δίκτυο (50 Hz και αρμονικές) και υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Fourier. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για τον υπολογισμό του FFT είναι απαραίτητη η χρήση του κατάλληλου παραθύρου. Για την προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται το παράθυρο Hann και το προκύπτον φάσμα του μαγνητικού πεδίου απεικονίζεται στην Εικόνα 63 και για τις τρεις συνιστώσες.

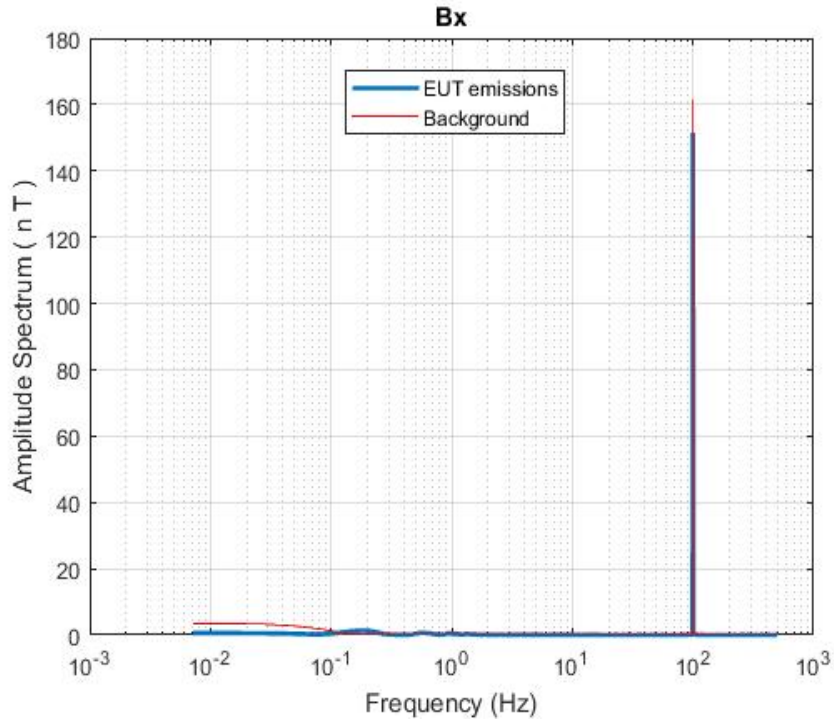


*Εικόνα 63: AC επαγόμενο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας έλπειτα από επεξεργασία.*

Καθώς οι εκπομπές που σχετίζονται με την AC επαγόμενη μαγνήτιση της συσκευής αναμένεται να εμφανισθούν στην ίδια συχνότητα με το αντίστοιχο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, δηλαδή στα 100 Hz, η επαγόμενη μαγνήτιση της εξεταζόμενης συσκευής μπορεί να μοντελοποιηθεί στο πεδίο της συχνότητας με μαγνητικά δίπολα με συχνότητα ταλάντωσης ίση με τη συχνότητα του εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου χρησιμοποιώντας στοχαστικές μεθόδους. Στην Εικόνα 64 απεικονίζεται το φάσμα του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου σε σύγκριση με το φάσμα του μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος, το οποίο περιλαμβάνει και το εξωτερικό εφαρμοζόμενο πεδίο. Όπως είναι εμφανές, η διαφορά μεταξύ των δύο μαγνητικών πεδίων στα 100 Hz οφείλεται στην επαγόμενη μαγνήτιση του RF Switch.

Οι τιμές της διαφοράς μεταξύ του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και του μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της μοντελοποίησης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι τιμές της διαφοράς των δύο αυτών μαγνητικών πεδίων στις 6 γωνίες περιστροφής του RF Switch όταν τα μαγνητόμετρα είναι τοποθετημένα πάνω από το επίπεδο του περιστρεφόμενου τραπέζιου. Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνεται υπόψιν και η επίδραση του αγωγίμου επιπέδου (περιστρεφόμενο τραπέζι) που είναι παρόν κατά τη διαδικασία των μαγνητικών μετρήσεων. Οι παράμετροι των εκτιμώμενων μοντέλων καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης τους παρατίθενται στον Πίνακα 24 και Πίνακα 25 για την περίπτωση που το εξωτερικό πεδίο έχει συχνότητα 100 Hz και για τα τρία επίπεδα που λαμβάνονται μετρήσεις των εκπομπών της εξεταζόμενης συσκευής. Οι τιμές

του μέτρου του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου στην Εικόνα 65, Εικόνα 66 και Εικόνα 67 για τα τρία επίπεδα  $xy$ ,  $yz$  και  $xz$ , αντίστοιχα, που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.



Εικόνα 64: AC επαγόμενο μαγνητικό πεδίο σε σύγκριση με το μαγνητικό πεδίο περιβάλλοντος -  $x$ - συνιστώσα.

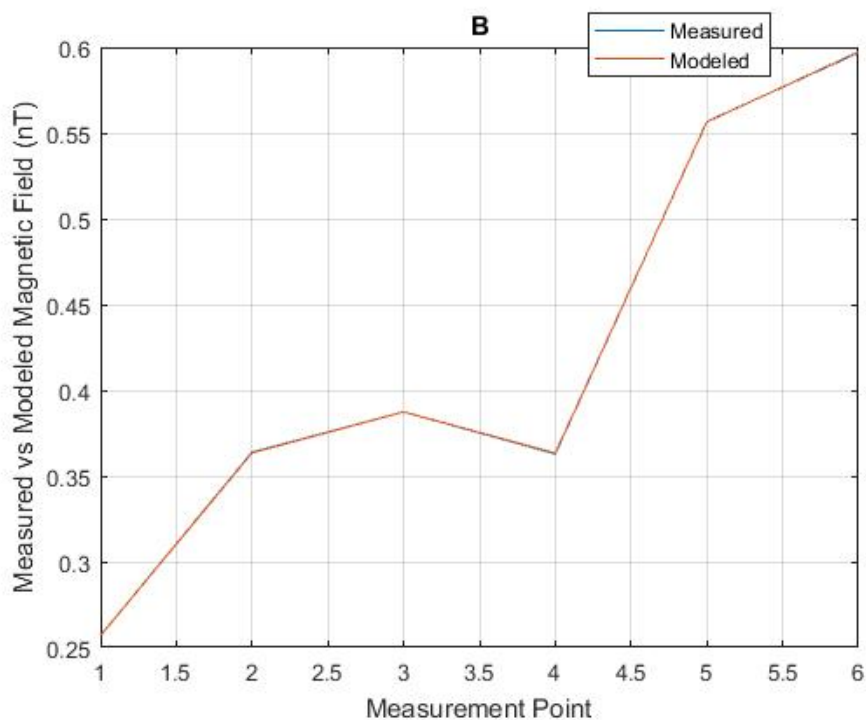
Πίνακας 24: Παράμετροι μοντέλων μαγνητικών δίπολων για την AC επαγόμενη μαγνήτιση του RF Switch.

Plane	$xy$	$xz$		$yz$
Dipole	1	1	2	1
x (cm)	1.5161	3.5448	0.5823	0.4119
y (cm)	-5	-1.5571	4.9251	-4.7472
z (cm)	0.2754	0.8314	0.5673	7
$m_x$ (mAm <sup>2</sup> )	0.0559	2.4662	-0.6898	0.1344
$m_y$ (mAm <sup>2</sup> )	-0.0313	-1.6233	2.5662	0.0348
$m_z$ (mAm <sup>2</sup> )	2.6419	0.254	0.1503	-0.0338

Πίνακας 25: Κριτήρια αξιολόγησης εκτιμώμενων μοντέλων για κάθε επίπεδο.

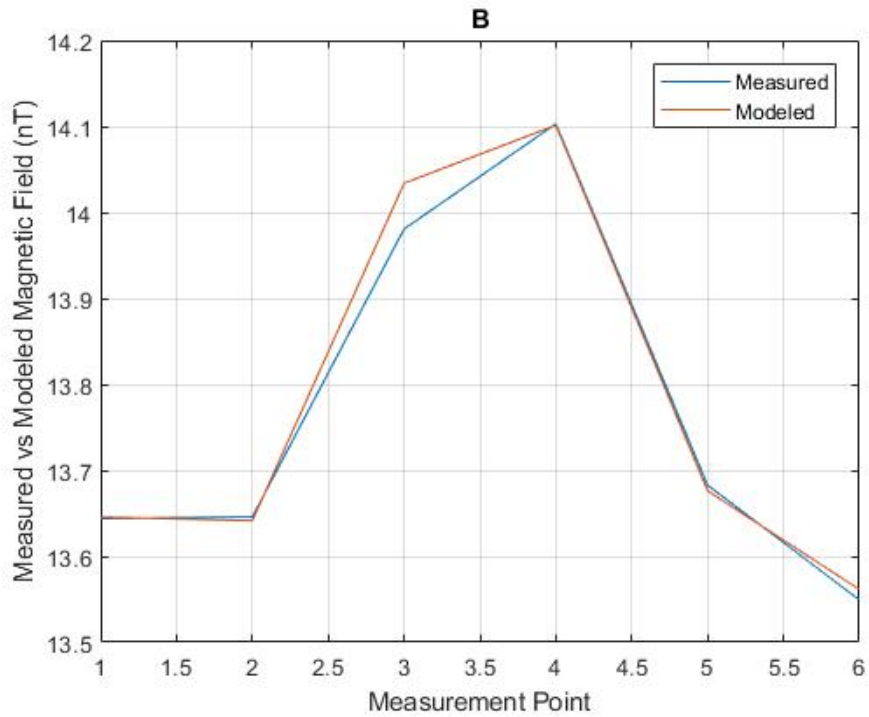
Plane	Field RMS (nT)	Error Percent (%)
<i>xy</i>	0.0107	2.4494
<i>xz</i>	0.0225	0.1636
<i>yz</i>	0.0014	0.1445

Όπως είναι εμφανές τόσο από τις σχετικές εικόνες όσο και από τον Πίνακα 25 η διαδικασία της μοντελοποίησης έχει παράξει διπολικά μοντέλα που είναι ικανά να προσεγγίσουν την AC επαγόμενη μαγνήτιση με μεγάλη ακρίβεια.

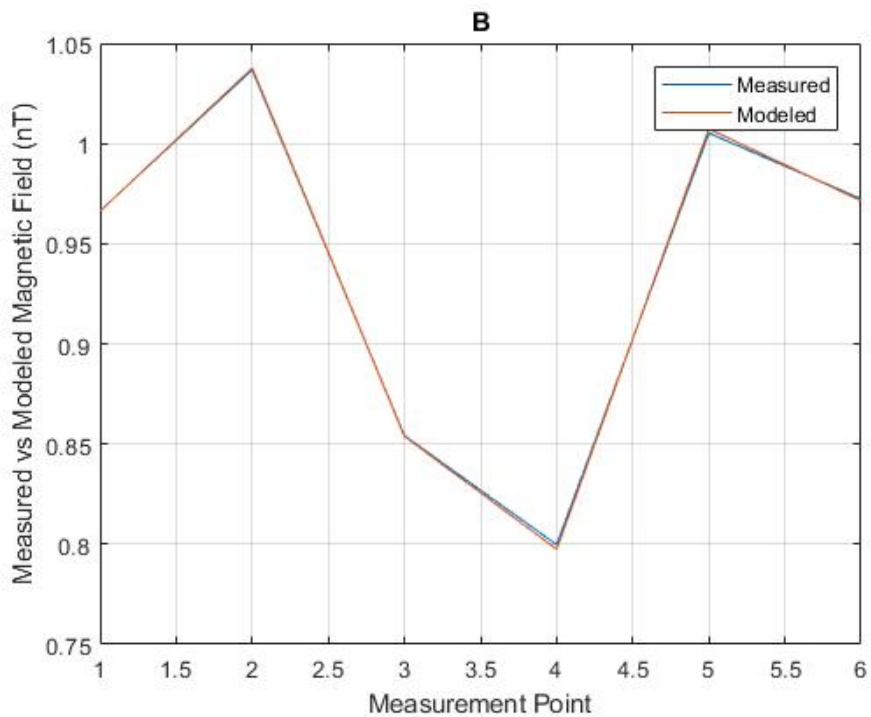


Εικόνα 65: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό στα 6 διπλά σημεία μέτρησης για το *xy* επίπεδο και για εξωτερικό πεδίο συχνότητας 100 Hz .





Εικόνα 66: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό στα 6 διπλά σημεία μέτρησης για το  $xz$  επίπεδο και για εξωτερικό πεδίο συχνότητας 100 Hz .



Εικόνα 67: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό στα 6 διπλά σημεία μέτρησης για το  $yz$  επίπεδο και για εξωτερικό πεδίο συχνότητας 100 Hz .

## 6.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το φαινόμενο της επαγόμενης μαγνήτισης καθώς μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στις μαγνητικές εκπομπές ενός συστήματος συσκευών. Όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σε μία συσκευή, τότε είναι δυνατόν να ελαχθεί σε αυτή μία μαγνητική ροπή, η οποία με τη σειρά της είναι ικανή να παράγει εκ νέου μαγνητικό πεδίο. Για την προσέγγιση αυτού του φαινομένου, προτείνεται αρχικά μια μεθοδολογία ειδικών μαγνητικών μετρήσεων, όπου εφαρμόζεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με προεπιλεγμένα χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά επεξεργάζονται και χρησιμοποιούνται ώστε να παραχθούν κατάλληλα διπολικά μοντέλα ικανά να αναπαράγουν τις μαγνητικές εκπομπές της εξεταζόμενης συσκευής που οφείλονται στην επαγόμενη μαγνήτιση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### 7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΓΩΓΙΜΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ & ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

#### 7.1 Εισαγωγή

Ένα κρίσιμο ζήτημα πολλών διαστημικών αποστολών είναι η συμμόρφωση με τις αυστηρές απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής καθαρότητας που πρωτίστως περιλαμβάνει μετρήσεις του κοντινού ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που παράγονται από μια εξεταζόμενη συσκευή [7]. Στα αρχικά στάδια σχεδιασμού μιας αποστολής διεξάγονται δοκιμές ώστε να εξεταστεί η μαγνητική υπογραφή του διαστημικού εξοπλισμού για σκοπούς ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται σε ειδικές εγκαταστάσεις EMC, οι οποίες συνήθως περιλαμβάνουν αγωγίμες επιφάνειες, όπως είναι το επίπεδο γείωσης.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα των μετρήσεων αυτών χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε αλγορίθμους που έχουν ως στόχο την ανάπτυξη ενός μοντέλου που είναι ικανό να αναπαράγει με ακρίβεια τις μαγνητικές εκπομπές μιας συσκευής [6]. Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4, μια από τις καθιερωμένες τεχνικές είναι η MDM, που στοχεύει στον προσδιορισμό ενός μικρού αριθμού μαγνητικών δίπολων, τα οποία μπορούν να αναπαράγουν το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο. Εντούτοις, τα παραγόμενα μοντέλα είναι βασισμένα σε μετρήσεις κοντινού πεδίου και είναι αναπόφευκτα συνδεδεμένα με την εγκατάσταση όπου πραγματοποιούνται οι δοκιμές.

Τα μοντέλα, που παράγονται για κάθε συσκευή, στη συνέχεια συνδυάζονται ώστε να εκτιμηθεί η μαγνητική συμπεριφορά ολόκληρου του διαστημοπλοίου. Συνεπώς, είναι απαραίτητο τα προκύπτοντα μοντέλα να μην είναι συνδεδεμένα με την εγκατάσταση στην οποία μετρήθηκε και χαρακτηρίστηκε κάθε συσκευή. Αυτό συνεπάγεται πως η παρουσία τυχόν αγωγίμων επιφανειών και επιπέδων γείωσης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πρέπει τελικά να έχουν αποσυσχετιστεί από το εκάστοτε διπολικό μοντέλο. Στο παρόν κεφάλαιο, χρησιμοποιείται η θεωρία των ειδώλων ώστε να ληφθεί υπόψιν η συνεισφορά του επιπέδου γείωσης που είναι παρόν κατά τη διάρκεια των μαγνητικών μετρήσεων στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων και έτσι να αποσυσχετιστεί η διάταξη από τα εκτιμώμενα μοντέλα.

## 7.2 Περιγραφή της μεθόδου

Σύμφωνα με τη θεωρία των ειδώλων, το αγώγιμο επίπεδο γείωσης μπορεί να αντικατασταθεί από τα απαραίτητα είδωλα κάθε διπολικής μαγνητικής πηγής, η οποία υποβάλλεται σε μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Η προτεινόμενη προσέγγιση λαμβάνει υπόψιν τα είδωλα ώστε να αποσυνδέσει τελικά τα εκτιμώμενα διπολικά μοντέλα από τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.

Όπως παρουσιάστηκε και στην υποενότητα 4.2, κάθε συχνότητα που αντιστοιχεί σε μαγνητικές εκπομπές ενός EUT σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας, μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν ένα μεμονωμένο αντίστροφο πρόβλημα και να λυθεί ανεξάρτητα για να υπολογιστεί ένα ισοδύναμο μοντέλο [17]. Οι παράμετροι για κάθε δίπολο του μοντέλου περιλαμβάνουν τη θέση  $x, y, z$  και τη ροπή του  $m_x, m_y, m_z$ .

Στην περίπτωση όμως που ένα αγώγιμο επίπεδο είναι παρόν κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, τότε χρειάζονται να προσδιορισθούν 12 παράμετροι για να χαρακτηριστεί πλήρως μια διπολική πηγή και το είδωλο της, των οποίων τα παραγόμενα μαγνητικά πεδία αντιστοιχούν στις μετρούμενες μαγνητικές εκπομπές της συσκευής που εξετάζεται [30]. Κατ' αρχήν, η γεωμετρία της μετρητικής διάταξης επιτρέπει τη μείωση των χωρικών παραμέτρων και των μεταβλητών των μαγνητικών ροπών σύμφωνα με την Εξ. 36. Χωρίς απώλεια της γενικότητας, σε περιπτώσεις που το επίπεδο γείωσης βρίσκεται στο επίπεδο  $xy$ , η θέση του ειδώλου θα είναι  $x, y, -z$  και η μαγνητική του ροπή  $m_x, m_y, -m_z$ . Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψιν τη θεωρία των ειδώλων στη διαδικασία μοντελοποίησης, οι παράμετροι του μοντέλου που χρειάζεται να προσδιορισθούν με τη βοήθεια των στοχαστικών αλγορίθμων είναι πλέον 6. Έτσι, χρησιμοποιώντας τις φασματικές τιμές του μαγνητικού πεδίου είναι δυνατό να προσδιορισθεί ένα μοντέλο για την αρχική μαγνητική πηγή αποσυσχετίζοντας τη συμβολή του επιπέδου γείωσης.

## 7.3 Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης

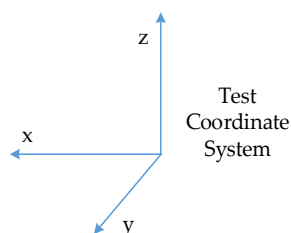
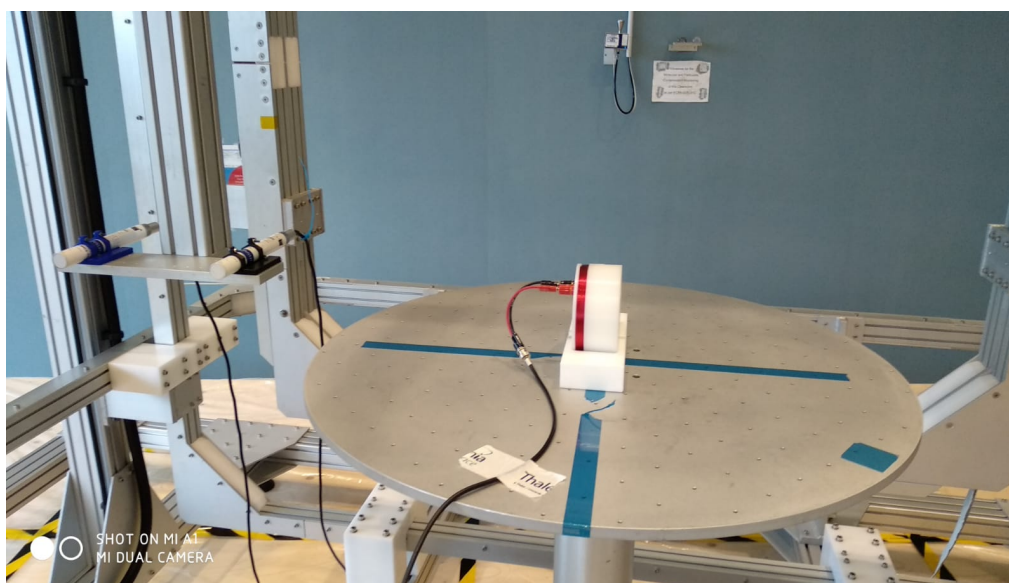
Η προτεινόμενη μεθοδολογία επαληθεύεται με πραγματικές μετρήσεις γνωστής πηγής, η οποία είναι ένας βρόχος ρεύματος (μαγνητικό δίπολο), η οποία παράγει μαγνητικό πεδίο χαμηλής συχνότητας. Τα προκύπτοντα μοντέλα επιβεβαιώνουν τελικά την αποτελεσματικότητα της μεθόδου να εκτιμήσει τις παραμέτρους της αρχικής πηγής [30].

### 7.3.1 Μετρητική διάταξη & συσκευή υπό εξέταση

Ένας βρόχος ρεύματος χρησιμοποιείται ως μαγνητική πηγή υπό εξέταση ώστε να καταγραφεί η μαγνητική του υπογραφή. Η μαγνητική πηγή που χρησιμοποιείται έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Εύρος ζώνης από 30 Hz έως 100 KHz
- Αριθμός σπειρών: 20
- Διάμετρος: 12 cm

Για την εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιούνται δύο μαγνητόμετρα τύπου Fluxgate για την ταυτόχρονη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις και η μετρητική διάταξη είναι όμοια με αυτή που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.5.1, τοποθετώντας όμως τα μαγνητόμετρα μόνο σε επίπεδο πάνω από το τραπέζι. Οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε αποστάσεις 56 cm και 82 cm αντίστοιχα από το κέντρο του τραπέζιου και σε ύψος 10 cm, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 68. Καθώς η μαγνητική πηγή περιστρέφεται ανά  $60^\circ$ , τα σημεία μέτρησης σχηματίζουν έναν κύκλο πάνω από το τραπέζι και συνεπώς καταγράφονται 6 διπλές τιμές μαγνητικού πεδίου και στους τρεις άξονες.



Εικόνα 68: Μαγνητική πηγή σε εγκατάσταση MCF κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (εργαστήριο Thales Alenia).

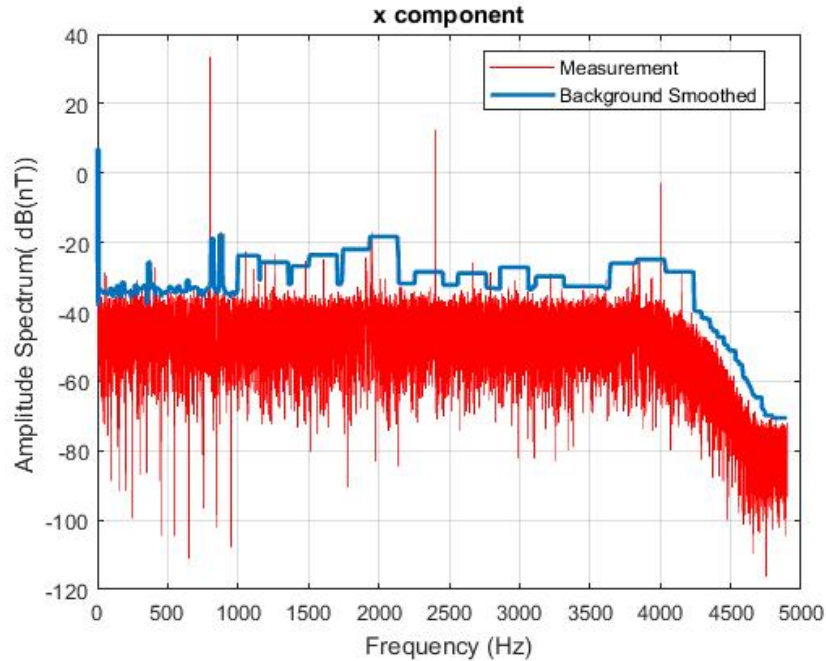
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 68, το κέντρο της βροχοκεραίας βρίσκεται περίπου στο κέντρο του τραπεζιού (με μικρή απόκλιση στον άξονα  $x$ ) και σε ύψος περίπου 9 cm, λαμβάνοντας υπόψιν τις διαστάσεις του κυκλικού βρόχου και το γεγονός ότι είναι τοποθετημένη πάνω σε μια μικρή βάση. Επιπλέον, η κατεύθυνση της μαγνητικής πηγής είναι προς τα μαγνητόμετρα (άξονας  $x$ ), υποδεικνύοντας πως η ροπή του μαγνητικού δίπολου είναι προσανατολισμένη στον άξονα  $x$ . Τελικά, καθώς όλες οι συχνότητες λειτουργίας προέρχονται από την ίδια συσκευή, αναμένεται πως οι θέσεις όλων των εκτιμώμενων μοντέλων θα είναι όμοιες.

### **7.3.2 Αποτελέσματα μοντελοποίησης**

Η διαδικασία των μετρήσεων και της επεξεργασίας του μετρούμενου σήματος είναι όμοια με αυτή που εφαρμόστηκε στην υποενότητα 4.3. Αρχικά, τα μαγνητόμετρα καταγράφουν το μαγνητικό πεδίο όταν ο βρόχος ρεύματος δεν είναι ενεργός ώστε να εκτιμηθεί το επίπεδο του θορύβου περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, τα μαγνητόμετρα μετρούν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη μαγνητική πηγή όταν βρίσκεται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας. Το μαγνητικό πεδίο που μετράται στο πεδίο του χρόνου (όταν η συσκευή βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας και μη) στα διάφορα σημεία παρατήρησης υποβάλλεται σε τεχνικές αποθορυβοποίησης (διαφορά των δύο ταυτόχρονα μετρούμενων πεδίων, αφαίρεση της DC συνιστώσας και φιλτράρισμα των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας) και στη συνέχεια υπολογίζεται το φάσμα του. Το προκύπτον φάσμα συγκρίνεται με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου (όπως υπολογίζεται στην παράγραφο 4.3.1) ώστε να ανιχνευθούν οι συχνότητες που αντιστοιχούν στις μαγνητικές εκπομπές της συσκευής που εξετάζεται. Τέλος, η κάθε συχνότητα εξετάζεται σαν μεμονωμένο αντίστροφο DC πρόβλημα κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις διαφορετικές κυματομορφές ρεύματος που τροφοδοτούν την εξεταζόμενη μαγνητική πηγή [30].

#### **7.3.2.1 Τριγωνική παλμοσειρά**

Αρχικά, το σήμα ρεύματος που χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει τον βρόχο είναι μια τριγωνική παλμοσειρά με θεμελιώδη συχνότητα 800 Hz. Το φάσμα του αποθορυβοποιημένου σήματος, που προκύπτει έπειτα από επεξεργασία του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου, όταν η εξεταζόμενη συσκευή βρίσκεται σε λειτουργία, συγκρίνεται με το εξομαλυμένο προφίλ του θορύβου στο πεδίο της συχνότητας στην Εικόνα 69 ενδεικτικά για την  $x$ -συνιστώσα στο σημείο μέτρησης με γωνία περιστροφής ίση με  $0^\circ$ .



Εικόνα 69: Τριγωνική παλμοσειρά σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου.

Όπως είναι εμφανές, οι εκπομπές στη θεμελιώδη συχνότητα των 800 Hz της τριγωνικής παλμοσειράς και στις περιττές αρμονικές της (3<sup>η</sup> αρμονική στα 2400 Hz και 5<sup>η</sup> στα 4000 Hz) υπερβαίνουν σημαντικά το αντίστοιχο προφίλ θορύβου και μπορούν να χαρακτηριστούν σαν συμβολές στο φάσμα που οφείλονται στη λειτουργία του βρόχου ρεύματος. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου σε αυτές τις συχνότητες (για κάθε εντοπισμένη συχνότητα υπάρχουν 6 διπλές τιμές των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου  $B_x, B_y, B_z$  καθώς η εξεταζόμενη συσκευή περιστρέφεται) μπορούν στη συνέχεια να προσαρμοστούν στο φάσμα που προκύπτει από ένα ισοδύναμο μαγνητικό διπολικό μοντέλο.

Για λόγους επαλήθευσης της προτεινόμενης προσέγγισης πραγματοποιούνται δύο σενάρια μοντελοποίησης. Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, προσδιορίζεται ένα μαγνητικό διπολικό μοντέλο, που αποτελείται από ένα μαγνητικό δίπολο, χωρίς να εφαρμόζεται η θεωρία των ειδώλων. Το δεύτερο σενάριο μοντελοποίησης λαμβάνει υπόψιν την αγωγίμη επιφάνεια που είναι παρούσα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων περιλαμβάνοντας τη συνεισφορά του ειδώλου της εκτιμώμενης μαγνητικής πηγής ώστε να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά της τελευταίας. Οι παράμετροι που υπολογίζονται για τα δύο διαφορετικά μοντέλα για την θεμελιώδη συχνότητα των 800 Hz και τις αρμονικές της (2400 Hz και 4000 Hz) συγκρίνονται στον Πίνακα 26. Στην περίπτωση που η θεωρία των ειδώλων λαμβάνεται υπόψιν, τα κριτήρια αξιολόγησης του παραγόμενου μοντέλου παρατίθενται στον Πίνακα 27.

Πίνακας 26: Μοντέλα ανά συχνότητα για τους δύο τρόπους μοντελοποίησης - τριγωνική παλμοσειρά.

Frequency (KHz)	Dipole Modeling			Dipole Modeling including Image Theory		
	0.8	2.4	4	0.8	2.4	4
<b>x (cm)</b>	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6
<b>y (cm)</b>	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	0
<b>z (cm)</b>	2.5	1.2	0	8.5	8.8	8.6
<b>m<sub>x</sub> (mAm<sup>2</sup>)</b>	56.65	5.55	1	31.23	3.0	0.53
<b>m<sub>y</sub> (mAm<sup>2</sup>)</b>	-3.62	-0.35	-0.07	-2.05	-0.19	-0.04
<b>m<sub>z</sub> (mAm<sup>2</sup>)</b>	2.05	0.22	0.04	0.25	0.02	0

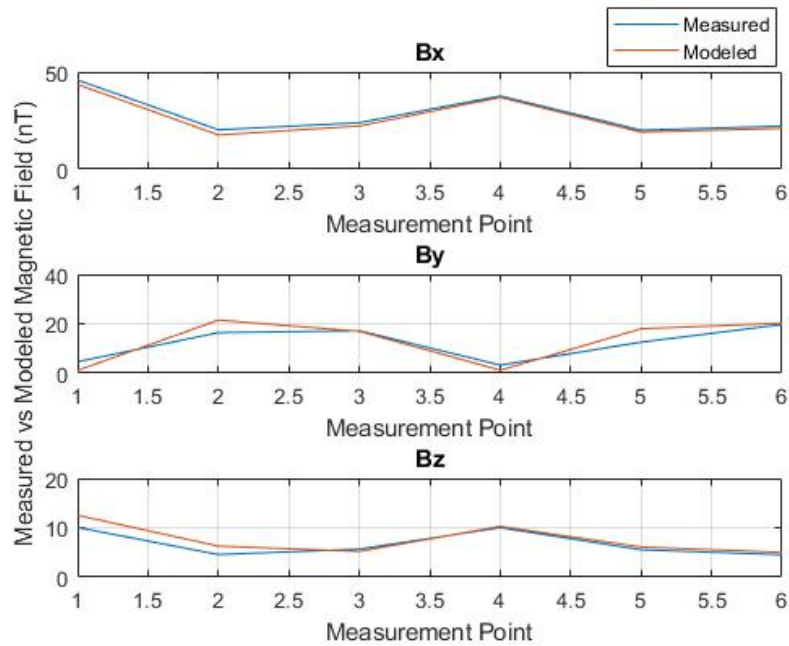
Πίνακας 27: Κριτήρια αξιολόγησης για τα μοντέλα ανά συχνότητα λαμβάνοντας υπόψιν τη θεωρία των ειδώλων - τριγωνική παλμοσειρά.

Frequency (KHz)	Field RMS (nT)	GoF (%)
<b>0.8</b>	2.3584	12.0975
<b>2.4</b>	0.1701	9.1579
<b>4</b>	0.0369	11.2652

Οι συνιστώσες του μετρούμενου και το μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου για τη θεμελιώδη συχνότητα των 800 Hz όταν εφαρμόζεται η θεωρία των ειδώλων απεικονίζονται στην Εικόνα 70.

Οι χαμηλές τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης των προκύπτοντων μοντέλων (Πίνακας 27) υποδηλώνουν πως το μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο προσεγγίζει ικανοποιητικά το μετρούμενο, όταν η συνεισφορά του επιπέδου γείωσης λαμβάνεται υπόψιν, όπως επιβεβαιώνεται και από την Εικόνα 70. Χρειάζεται να σημειωθεί πως τα κριτήρια αξιολόγησης, που προκύπτουν όταν δεν εφαρμόζεται η θεωρία των ειδώλων, είναι αντίστοιχα των κριτηρίων του Πίνακα 27, υποδεικνύοντας μια εξίσου καλή προσαρμογή μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι σημαντικό να εξεταστούν οι εκτιμώμενες θέσεις των προκύπτοντων μοντέλων.

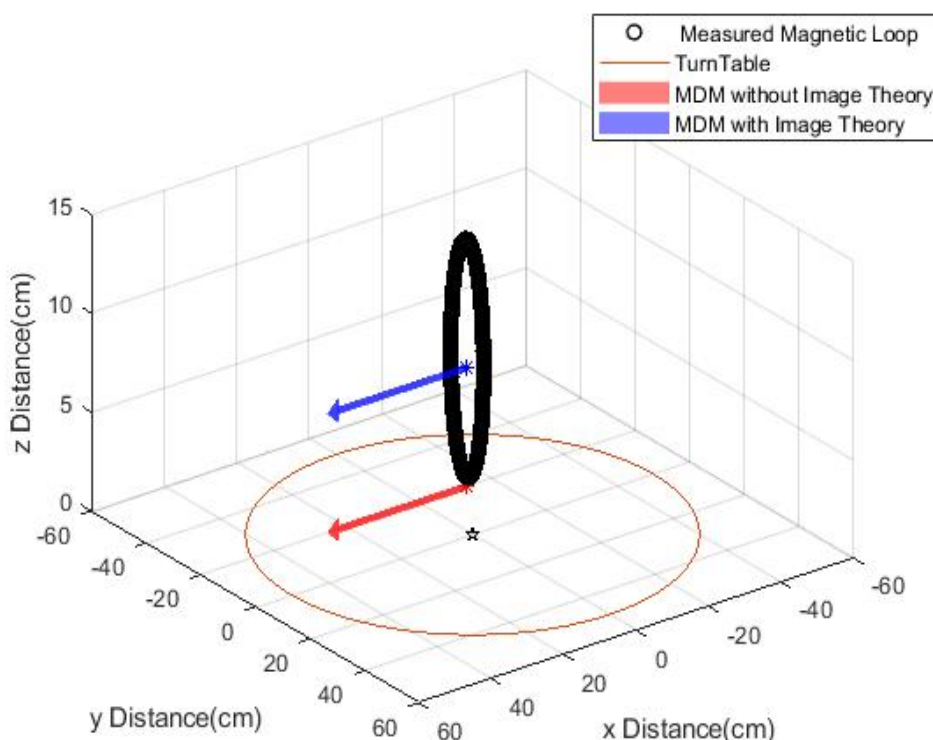




Εικόνα 70: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο για τα 800 Hz λαμβάνοντας υπόψιν τη θεωρία των ειδώλων.

Στο πρώτο σενάριο μοντελοποίησης, η εκτίμηση της θέσης της διπολικής πηγής στον  $z$  άξονα, ο οποίος αντιστοιχεί στον άξονα κάθετο στο επίπεδο γείωσης, δεν βρίσκεται σε συμφωνία με τα πραγματικά χαρακτηριστικά του βρόχου ρεύματος καθώς η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των δύο μεγεθών (πραγματικού και εκτιμώμενου) είναι περίπου 9 cm. Επιπλέον, η πρόβλεψη της  $z$  θέσης αποκλίνει σημαντικά ανάμεσα στα μοντέλα για τη θεμελιώδη συχνότητα και τις αρμονικές της, με μέγιστη απόκλιση τα 2.5 cm. Εντούτοις, οι χωρικές παράμετροι των μοντέλων που προκύπτουν, όταν εφαρμόζεται η θεωρία των ειδώλων, βρίσκονται πολύ κοντά στην πραγματική θέση της μαγνητικής πηγής κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με τη μέγιστη απόκλιση να είναι περίπου 5 mm. Επιπροσθέτως, η προτεινόμενη μέθοδος επαληθεύεται από τη συμφωνία των εκτιμώμενων χωρικών παραμέτρων ανάμεσα στα μοντέλα της θεμελιώδους συχνότητας και των αρμονικών της, καθώς οι μαγνητικές εκπομπές παράγονται από την ίδια μαγνητική πηγή. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως οι προκύπτουσες μαγνητικές ροπές των μοντέλων βρίσκονται σε συμφωνία με τις αναμενόμενες δεδομένου ότι η  $x$  συνιστώσα είναι κυρίαρχη για όλες τις συχνότητες λόγω της διάταξης των μετρήσεων και το πλάτος της κυμαίνεται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του φάσματος της τριγωνικής παλμοσειράς. Στην Εικόνα 71 απεικονίζονται τα δύο μαγνητικά δίπολα που προκύπτουν από την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος όταν δεν χρησιμοποιείται η θεωρία των ειδώλων (κόκκινο βέλος) και όταν λαμβάνεται υπόψιν το είδωλο της μαγνητικής πηγής (μπλε βέλος). Είναι εμφανές λοιπόν πως το εκτιμώμενο δίπολο που προέκυψε

λαμβάνοντας υπόψιν τη θεωρία των ειδώλων είναι κατάλληλο για την περιγραφή του εξεταζόμενου βρόχου ρεύματος.

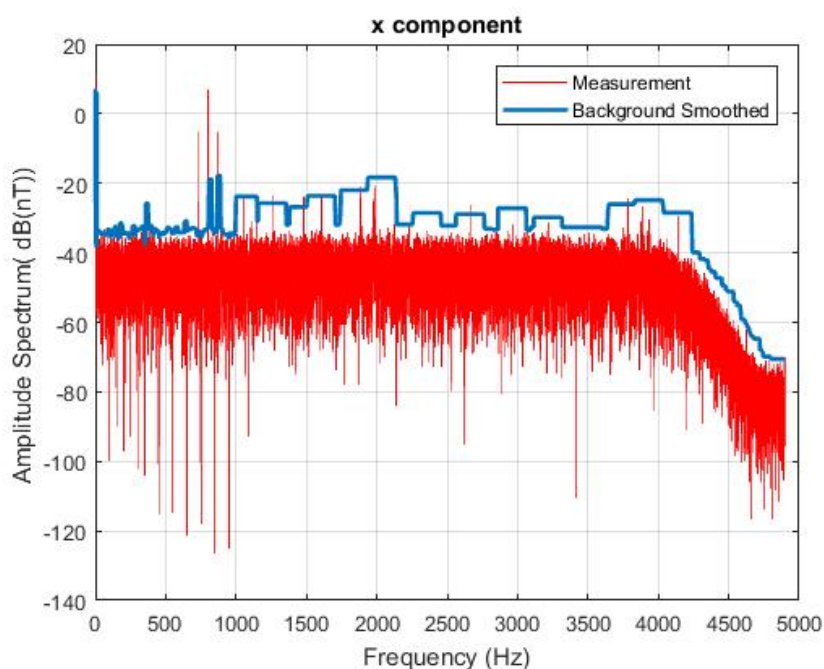


Εικόνα 71: Τα μαγνητικά δίπολα που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους μοντελοποίησης του βρόχου ρεύματος.

### 7.3.2.2 Διαμορφωμένο ημίτονο

Στη συνέχεια, ένα διαμορφωμένο ημιτονοειδές σήμα με θεμελιώδη συχνότητα 800 Hz χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει τον βρόχο ρεύματος. Στην Εικόνα 72 απεικονίζεται το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο όταν η συσκευή βρίσκεται σε λειτουργία σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ του θορύβου για την  $x$ -συνιστώσα στο σημείο μέτρησης όπου ο βρόχος ρεύματος έχει περιστραφεί κατά  $0^\circ$ . Είναι εμφανές πως οι μαγνητικές εκπομπές στη συχνότητα των 800 Hz και στις πλευρικές συχνότητες των 727 Hz και 873 Hz, που προκύπτουν λόγω AM διαμόρφωσης, υπερβαίνουν αρκετά το προφίλ θορύβου και συνεπώς αντιστοιχούν στις μαγνητικές εκπομπές του εξεταζόμενου βρόχου. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου σε αυτές τις συχνότητες χρησιμοποιούνται για να εξαχθεί ένα κατάλληλο μοντέλο για την κάθε συχνότητα για την εξεταζόμενη συσκευή λαμβάνοντας υπόψιν και την επίδραση του αγωγίμου επιπέδου που είναι παρόν στη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Τα παραγόμενα μοντέλα για τις τρεις συχνότητες που ανιχνεύθηκαν καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης για το κάθε μοντέλο παρατίθενται στον Πίνακα 28 και Πίνακα 29 αντίστοιχα. Επιπλέον, στην Εικόνα 73 απεικονίζονται το μετρούμενο και το μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο στα 6 διπλά σημεία μέτρησης.



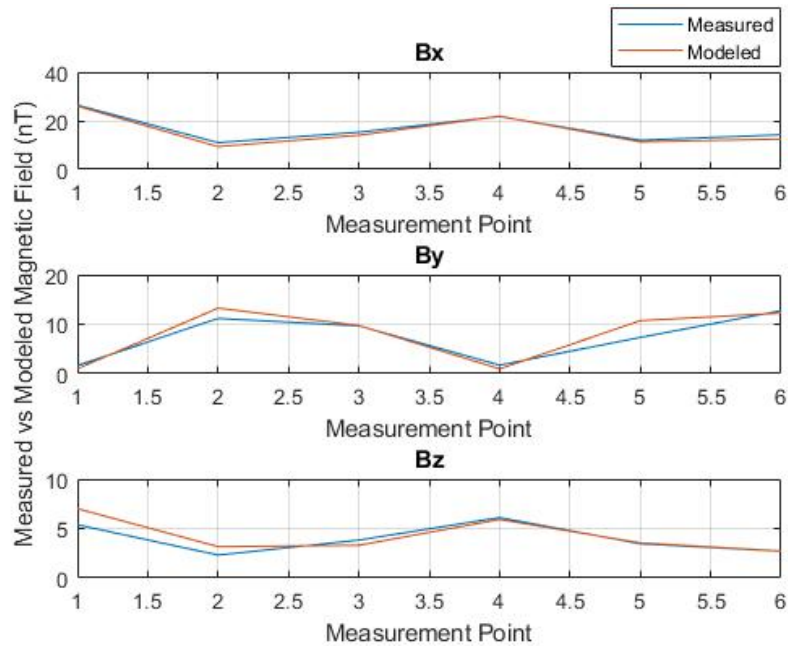
Εικόνα 72: Διαμορφωμένο ημίτονο σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου.

Πίνακας 28: Μοντέλα ανά συχνότητα - διαμορφωμένο ημίτονο.

Frequency (Hz)	727	800	873
<b>Dipole</b>	1	1	1
<b>x (cm)</b>	1.8978	1.8765	1.8162
<b>y (cm)</b>	-0.1767	-0.1726	-0.1537
<b>z (cm)</b>	9.8891	9.9538	9.9605
<b>mx (mAm<sup>2</sup>)</b>	4.7751	19.0625	4.7485
<b>my (mAm<sup>2</sup>)</b>	-0.2035	-0.8084	-0.1994
<b>mz (mAm<sup>2</sup>)</b>	0.3119	1.2504	0.3253

Πίνακας 29: Κριτήρια αξιολόγησης για τα μοντέλα ανά συχνότητα- διαμορφωμένο ημίτονο.

Frequency (Hz)	Field RMS (nT)	GoF (%)
<b>800</b>	0.3202	11.0208
<b>2400</b>	1.2631	10.9043
<b>4000</b>	0.3151	10.9271

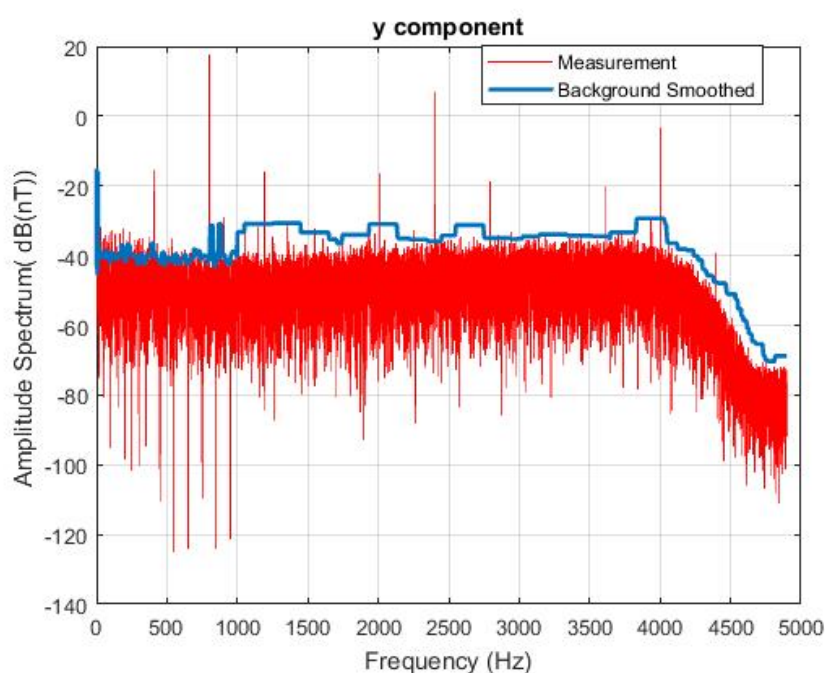


Εικόνα 73: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο για τα 800 Hz.

Οι χαμηλές τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης των μοντέλων καθώς και η Εικόνα 73 επιβεβαιώνουν πως τα παραγόμενα μοντέλα μπορούν να αναπαραστήσουν τις μαγνητικές εκπομπές σε κάθε συχνότητα ενδιαφέροντος. Επιπλέον, τα εκτιμώμενα μοντέλα για την θεμελιώδη και τις πλευρικές συχνότητες συμφωνούν ως προς τις χωρικές παραμέτρους και μεταξύ τους αλλά και με την πραγματική θέση του βρόχου ρεύματος. Τέλος, για όλα τα μοντέλα η  $x$ -συνιστώσα της μαγνητικής ροπής είναι επικρατούσα κάτι το οποίο συμφωνεί με τα χαρακτηριστικά της μετρητικής διάταξης και τον τρόπο που είναι τοποθετημένη η μαγνητική πηγή στο περιστρεφόμενο τραπέζι.

### 7.3.2.3 Διαμορφωμένη τετραγωνική παλμοσειρά

Τέλος, ο βρόχος ρεύματος τροφοδοτείται με μια διαμορφωμένη τετραγωνική παλμοσειρά. Το φάσμα του μαγνητικού πεδίου της τετραγωνικής παλμοσειράς συγκρίνεται με το αντίστοιχο εξομαλυμένο προφίλ θορύβου ενδεικτικά για τη  $y$  - συνιστώσα στην Εικόνα 74 όταν ο βρόχος ρεύματος έχει περιστραφεί κατά  $0^\circ$ . Είναι εμφανές πως η θεμελιώδης συχνότητα του παλμού στα 800 Hz καθώς και οι περιττές αρμονικές της (3<sup>η</sup> στα 2400 Hz και 5<sup>η</sup> στα 4000 Hz) αντιστοιχούν σε μαγνητικές εκπομπές που υπερβαίνουν κατά πολύ το προφίλ θορύβου και μπορούν να θεωρηθούν ως εκπομπές της εξεταζόμενης μαγνητικής πηγής. Επιπλέον, πιθανές εκπομπές της βροχοκεραίας εντοπίζονται στις συχνότητες των 407, 1193, 2007, 2793 και 3607 Hz με χαμηλότερα πλάτη. Παρατηρείται πως αυτές οι συχνότητες βρίσκονται  $\pm 393$  Hz εκατέρωθεν της θεμελιώδους συχνότητας της παλμοσειράς και των αρμονικών της. Είναι λοιπόν ασφαλής η υπόθεση πως οι προαναφερθείσες συχνότητες προκύπτουν από τη διαμόρφωση της παλμοσειράς με ένα ημιτονοειδές σήμα με συχνότητα ταλάντωσης 393 Hz.



Εικόνα 74: Διαμορφωμένη παλμοσειρά σε σύγκριση με το εξομαλυμένο προφίλ θορύβου.

Τα παραγόμενα μοντέλα για όλες τις ανιχνευμένες συχνότητες παρατίθενται στον Πίνακα 30 και τα αντίστοιχα κριτήρια αξιολόγησης κάθε μοντέλου στον Πίνακα 31 λαμβάνοντας υπόψιν στη διαδικασία μοντελοποίησης το αγωγίμο επίπεδο γείωσης που βρίσκεται στη μετρητική διάταξη. Το σφάλμα RMS, που υπολογίζεται ανάμεσα στο μετρούμενο μαγνητικό πεδίο και σε αυτό που

προκύπτει από το εκτιμώμενο μοντέλο, καθώς και το ποσοστιαίο σφάλμα υποδεικνύουν μια καλή συμφωνία μεταξύ του μοντελοποιημένου και του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 75 για τις τρεις συνιστώσες του πεδίου στη θεμελιώδη συχνότητα των 800 Hz.

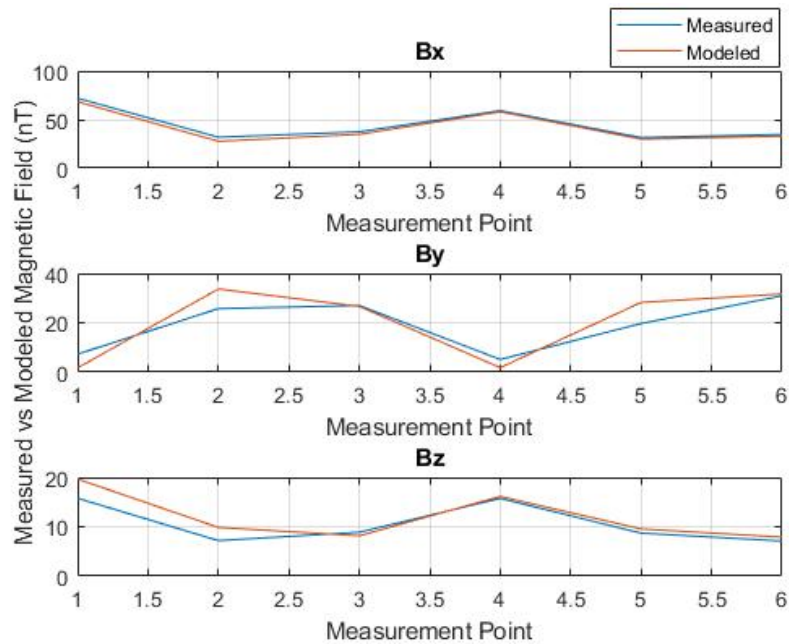
Η συμφωνία μεταξύ όλων των μοντέλων σε σχέση με τις χωρικές παραμέτρους ( $x, y, z$ ) των εκτιμώμενων μοντέλων είναι μια ισχυρή ένδειξη της εγκυρότητας του αλγορίθμου. Επιπλέον, οι θέσεις των προσδιορισμένων μαγνητικών δίπολων βρίσκονται πολύ κοντά στην πραγματική θέση της βροχοκεραίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας των μετρήσεων. Τέλος, είναι εμφανές πως η  $x$  – συνιστώσα της μαγνητικής ροπής όλων των μοντέλων είναι επικρατούσα, το οποίο επιβεβαιώνεται από τη μετρητική διάταξη, και το πλάτος της μεταβάλλεται σύμφωνα με τα φασματικά χαρακτηριστικά της τετραγωνικής παλμοσειράς.

Πίνακας 30: Μοντέλα ανά συχνότητα-τετραγωνική παλμοσειρά.

Frequency (Hz)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	mx (mAm <sup>2</sup> )	my (mAm <sup>2</sup> )	mz (mAm <sup>2</sup> )
<b>800 (main frequency)</b>	1.4813	-0.1503	8.4999	49.0152	-3.2362	0.3551
<b>2400</b>	1.4931	-0.1344	8.775	14.0967	-0.9241	0.153
<b>4000</b>	1.4553	-1.0422	9.2676	4.1275	-0.4214	0.0917
<b>407</b>	1.3197	-0.8377	10	1.4467	-0.1582	0.0345
<b>1193</b>	1.2375	-0.8370	10	1.3723	-0.1521	0.02
<b>2007</b>	1.2663	-0.8366	10	1.3480	-0.1490	0.0371
<b>2793</b>	1.2864	-0.8329	10	1.0407	-0.1215	0.0295
<b>3607</b>	1.3409	-0.7982	10	-0.9014	0.1073	-0.03

Πίνακας 31: Κριτήρια αξιολόγησης για τα μοντέλα ανά συχνότητα-τετραγωνική παλμοσειρά.

Frequency (Hz)	Field RMS (nT)	GoF (%)
<b>800</b>	3.7071	12.1169
<b>2400</b>	0.8087	9.2595
<b>4000</b>	0.2758	10.8137
<b>407</b>	0.0956	10.8314
<b>1193</b>	0.0894	10.6751
<b>2007</b>	0.0745	9.0764
<b>2793</b>	0.0518	8.1801
<b>3607</b>	0.0472	8.5957



Εικόνα 75: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο για τα 800 Hz.

## 7.4 Συμπεράσματα

Για την επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκαν τρία χαρακτηριστικά σήματα (τριγωνική παλμοσειρά, διαμορφωμένο ημίτονο και τετραγωνική παλμοσειρά) για να τροφοδοτήσουν την εξεταζόμενη βροχοκεραία. Η μεθοδολογία λαμβάνει υπόψιν τη συνεισφορά του επιπέδου γείωσης που είναι παρόν στις μετρήσεις χαμηλής συχνότητας μαγνητικού πεδίου εφαρμόζοντας τη θεωρία των ειδώλων. Συγκεκριμένα, για την εξαγωγή του διπολικού μοντέλου λαμβάνεται υπόψιν και το είδωλο του εκτιμώμενου δίπολου. Και στις τρεις περιπτώσεις των περιοδικών σημάτων τροφοδότησης, οι θέσεις των παραγόμενων μοντέλων για τις διαφορετικές συχνότητες συμφωνούν μεταξύ τους αλλά και με την πραγματική θέση της μαγνητικής πηγής. Επιπλέον, η συμπεριφορά της μαγνητικής ροπής ( $m_x, m_y, m_z$ ) κάθε μοντέλου είναι αντίστοιχη της πραγματικής και ανάλογη της κυματομορφής του τροφοδοτούμενου σήματος. Η επαλήθευση της προτεινόμενης προσέγγισης με μετρήσεις κοντινού μαγνητικού πεδίου γνωστής εκ των προτέρων μαγνητικής πηγής επιβεβαιώνει την ικανότητα της στην αποτελεσματική αποσυσχέτιση των εκτιμώμενων μοντέλων από την εγκατάσταση και στην εξαγωγή ενός αξιόπιστου μοντέλου για την αναπαράσταση της μαγνητικής συμπεριφοράς μιας συσκευής.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

#### 8.1 Συμπεράσματα

Πολλές διαστημικές αποστολές έχουν ως στόχο τη μέτρηση των μαγνητικών πεδίων της Γης, άλλων πλανητών καθώς και του Ήλιου. Ο υπολογισμός και η μελέτη των μαγνητικών πεδίων αυτών των ουράνιων σωμάτων μπορούν να προσφέρουν πολλές πληροφορίες για τη σύσταση, την επιφάνεια και την ενδεχόμενη ατμόσφαιρά τους. Για τον σκοπό αυτό τα διαστημόπλοια φέρουν ειδικό ευαίσθητο στις παρεμβολές μετρητικό εξοπλισμό. Είναι λοιπόν απαραίτητο οι θέσεις, στις οποίες είναι τοποθετημένος αυτός ο εξοπλισμός, να είναι μαγνητικά καθαρές. Είναι σημαντικό συνεπώς να μελετηθούν οι συσκευές που βρίσκονται μέσα στο διαστημόπλοιο καθώς εκπέμπουν ένα σύνθετο μαγνητικό πεδίο που είναι ικανό να παρεμβάλλει στις μετρήσεις του μετρητικού εξοπλισμού.

Πολλές διαστημικές αποστολές στοχεύουν στη μελέτη δυναμικών φαινομένων και συνεπώς στη μέτρηση της επαγόμενης δύναμης που αναπτύσσεται πάνω σε δύο εξεταζόμενες μάζες που βρίσκονται μέσα στο διαστημόπλοιο. Εντούτοις, μέσα στο διαστημικό σκάφος βρίσκονται πολλές συσκευές, των οποίων η λειτουργία μπορεί να παρεμβάλλει σε αυτές τις μετρήσεις της αποστολής. Συγκεκριμένα, τα μαγνητικά πεδία, που παράγονται κατά τη λειτουργία του εξοπλισμού, μπορούν να αλληλοεπιδράσουν τόσο μεταξύ τους όσο και με τα διαπλανητικά μαγνητικά πεδία στη θέση όπου βρίσκεται ο μετρητικός εξοπλισμός ή/και στη θέση των εξεταζόμενων μαζών. Έτσι, η διαμόρφωση πλάτους που ουσιαστικά συμβαίνει μπορεί να δημιουργήσει συνιστώσες μαγνητικής δύναμης σε αρκετά χαμηλότερες συχνότητες από αυτές που έχουν τα σήματα η οποία επηρεάζει τις εξεταζόμενες μάζες. Στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας μελετάται το φαινόμενο της παραγωγής χαμηλόσυχων συνιστωσών μαγνητικής δύναμης που οφείλεται στη σύζευξη των μαγνητικών πεδίων μέσα στο διαστημόπλοιο. Για τη μελέτη αυτή θεωρούνται ορισμένα μαγνητικά δίπολα τροφοδοτούμενα με ρεύματα υψηλής συχνότητας. Μέσω των κατάλληλα διαμορφωμένων προσομοιώσεων εξετάζεται η συνεισφορά της μαγνητικής δύναμης στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων.

Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο, που παράγεται από τις συσκευές τις οποίες φέρει το διαστημόπλοιο, είναι δυνατό να παρεμβάλει στις μετρήσεις που πρόκειται να εκτελέσει η αποστολή. Για τη μελέτη και τον χαρακτηρισμό αυτών των συσκευών είναι απαραίτητη η εκτέλεση επίγειων μετρήσεων των παραγόμενων μαγνητικών εκπομπών. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται συνήθως στις ειδικές εγκαταστάσεις MCF, όπου τοποθετείται η εξεταζόμενη συσκευή και τα μαγνητόμετρα της διάταξης καταγράφουν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται καθώς η συσκευή περιστρέφεται και ταυτόχρονα βρίσκεται ενεργή. Οι καθιερωμένες τεχνικές λοιπόν για τα στατικά πεδία ελεγκτούνται ώστε να καλύψουν τις απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας που τίθενται για τα μεταβαλλόμενα AC μαγνητικά πεδία. Συγκεκριμένα, για τον χαρακτηρισμό της συσκευής και την εξαγωγή ενός κατάλληλου μοντέλου όταν η συσκευή βρίσκεται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας χρησιμοποιείται η τεχνική MDM, όπως αναπτύσσεται εκτενώς στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, όταν το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο επεξεργαστεί κατάλληλα, είναι δυνατό να ανιχνευθούν οι συχνότητες λειτουργίας της συσκευής και οι τιμές του φάσματος χρησιμοποιούνται στη διαδικασία μοντελοποίησης. Έτσι το εκτιμώμενο μοντέλο είναι ικανό να αναπαραστήσει το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο στα σημεία παρατήρησης.

Στο τρίτο μέρος της εργασίας μελετώνται τα μεταβατικά μαγνητικά πεδία που παράγονται κατά την εκκίνηση και τον τερματισμό της λειτουργίας του διαστημικού εξοπλισμού. Για την προσομοίωση του μεταβατικού φαινομένου που παράγει μια μαγνητική πηγή χρησιμοποιείται η προσέγγιση με τραπεζοειδείς παλμούς στο πεδίο της συχνότητας. Έτσι, εξάγεται ένα μοντέλο που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των προβλεπόμενων παλμών και είναι ικανό να αναπαράγει τις μαγνητικές μετρήσεις της συσκευής. Επιπλέον, εκτιμώνται οι μέγιστες φασματικές μαγνητικές εκπομπές μιας συσκευής προσδιορίζοντας ένα κατάλληλο μοντέλο άνω φασματικών ορίων. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει τον πλήρη χαρακτηρισμό του μεταβατικού φαινομένου και περαιτέρω την προσέγγιση του μαγνητικού πεδίου στις θέσεις παρατήρησης σε συνδυασμό με την τεχνική MDM.

Το τέταρτο μέρος της εργασίας μελετά τη DC και AC επαγόμενη μαγνήτιση μιας συσκευής που συμβαίνει όταν εφαρμόζεται σε αυτή ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να αντιστοιχεί στις εκπομπές μιας άλλης συσκευής σε ένα σύστημα εξοπλισμού. Αυτό το φαινόμενο υποδεικνύει πως στο συνολικό μαγνητικό πεδίο που παράγει το διαστημόπλοιο, συνεισφέρει και το πεδίο που παράγεται εξαιτίας της επαγόμενης μαγνήτισης των συσκευών. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται η τεχνική MDM ώστε να υπολογιστούν κατάλληλα μοντέλα ικανά να περιγράψουν τη μαγνήτιση που επάγεται πάνω σε μία συσκευή.

Τέλος, οι μαγνητικές μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ειδικές εγκαταστάσεις που συνήθως περιέχουν αγωγίμες επιφάνειες, όπως είναι το επίπεδο γείωσης.

Συνεπώς τα ισοδύναμα διπολικά μοντέλα που παράγονται κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης είναι συνδεδεμένα με τα χαρακτηριστικά της διάταξης. Στο τελευταίο μέρος της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται η θεωρία των ειδώλων ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του επιπέδου γείωσης και τα εκτιμώμενα μοντέλα να είναι τελικά αποσυσχετισμένα από τα χαρακτηριστικά της διάταξης.

## **8.2 Μελλοντική Εργασία**

Καθώς οι διαστημικές αποστολές πληθαίνουν και οι στόχοι που θέτουν είναι όλο και πιο σημαντικοί, η μαγνητική καθαρότητα αποκτά πιο αυστηρά όρια. Είναι συνεπώς απαραίτητη η ανάπτυξη, επαλήθευση και εφαρμογή νέων μεθόδων και τεχνικών για την επίτευξη των επικαιροποιημένων απαιτήσεων. Στόχος αυτής της διατριβής ήταν να προτείνει ορισμένες νέες μεθοδολογίες ώστε να προσεγγισθεί η μαγνητική συμπεριφορά πραγματικών συσκευών διαστημικού εξοπλισμού. Οι τεχνικές αυτές χρειάζεται να αξιολογηθούν, να συνδυασθούν και να επεκταθούν ώστε να γίνει προσέγγιση του συνολικού μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τον εξοπλισμό του διαστημοπλοίου. Σε επίπεδο λοιπόν συστήματος, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των καλωδίων που διασυνδέουν τις συσκευές και αυτών που μεταφέρουν δεδομένα. Η εκτίμηση ενός κατάλληλου μοντέλου για την μαγνητική συμπεριφορά των καλωδίων είναι λοιπόν απαραίτητη. Επιπλέον, το φαινόμενο της επαγόμενης μαγνήτισης χρειάζεται περαιτέρω μελέτη ώστε να υλοποιηθεί μια επαναληπτική διαδικασία, η οποία θα λαμβάνει υπόψη τα παραγόμενα πεδία και τις μαγνητικές ιδιότητες της κάθε συσκευής, ώστε να υπολογίζει τα μαγνητικά πεδία που παράγονται λόγω της επαγωγής μέσα στο διαστημόπλοιο. Ο συνδυασμός των ήδη υπάρχοντων τεχνικών και των προτεινόμενων, τόσο στα πλαίσια της παρούσας διατριβής όσο και της μελλοντικής εργασίας, είναι δυνατό να προσεγγίσουν την μαγνητική συμπεριφορά ολόκληρου του διαστημοπλοίου.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Clayton R. Paul, “*Introduction to Electromagnetic Compatibility*”, John Wiley and Sons, 1992.
- [2] Müller Daniel, Marsden Richard George , St. Cyr OC and Gilbert Holly Robin, “*Solar Orbiter. Exploring the Sun-Heliosphere Connection*”, Sol. Phys., 285, 25-70, 2013.
- [3] Diaz-Aguiló Marc, Mateos Ignacio, Ramos-Castro Juan, Lobo Alberto and García-Berro Enrique, “*Design of the magnetic diagnostics unit onboard LISA Pathfinder*”, Aerospace Science and Technology, Volume 26, No. 1, 53–59, 2013.
- [4] Sci.esa.int, “*CDF study report THOR Assessment of Mission to Explore Plasma Energisation in Space Turbulence*”, 2015.
- [5] Mehlem, K., “*Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites*”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 14, No. 5, 1064–1071, Sep. 1978.
- [6] ECSS Secretariat, “*ECSS-E-HB-20-07A, Space engineering – Electromagnetic compatibility Handbook*”, ESA-ESTEC Requirements and Standards Division, Noordwijk, The Netherlands, 2012.
- [7] Sci.esa.int., “*ESA THOR CDF study IFP Assessment of Mission to Explore Plasma Energisation in Space Turbulence*”, Available: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/doc.cfm?fobjectid=56564>, 2015.
- [8] Junge Axel, Filippo Marliani, “*Prediction of dc magnetic fields for magnetic cleanliness on spacecraft*”, In Electromagnetic Compatibility (EMC), 2011 IEEE International Symposium on, pages 834-839, IEEE, 2011.
- [9] Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), “*Sniffer User Guide*”, V. 1.0, 2017.
- [10] Diaz-Aguilo Marc, “*Magnetic diagnostics algorithms for LISA Pathfinder: system identification and data analysis*”, 2011.
- [11] Jackson John David, “*Classical Electrodynamics*”, John Wiley and Sons, 1999.
- [12] Fertin D., Trougnou L., “*LisaPF Test Masses Acceleration Noise due to Eddy Currents*”, Tech. Rep. S2-EST-TN-2016, ESTEC, 2007.

- [13] Heinzl Gerhard, Albrecht Rüdiger and Roland Schilling, “*Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows*”, 2002.
- [14] Adamczyk Bogdan, “*Foundations of Electromagnetic Compatibility: With Practical Applications*”, John Wiley & Sons, 2017.
- [15] Knoepfel Heinz. E., “*Magnetic Fields: A Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use*”, John Wiley & Sons, 2008.
- [16] Balanis Constantine A., “*Antenna Theory: Analysis & Design*”, John Wiley & Sons, Inc. Publication, 1997.
- [17] Carrubba Elisa, Junge Axel, Marliani Fillipo, Monorchio Agostino, “*Particle Swarm Optimization to solve Multiple Dipole Modelling problems in space applications*”, in Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on, pages 1-6, IEEE, 2012.
- [18] Mehlem K., Wiegand A. and Weikert S., “*New developments in magnetostatic cleanliness modeling*”, In Aerospace EMC, 2012, Proceedings ESA Workshop on, pp.1,6, IEEE, 2012.
- [19] Kapsalis Nikolaos C., Kakarakis Sarantis Dimitrios J. and Capsalis Christos N., “*Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms*”, Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 34, 111-122, 2012.
- [20] Kennedy James and Rusell Eberhart, “*Particle swarm optimization*”, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 4, 1942-1948, 1995.
- [21] Güttler C., Hillenmaier O., Auster U., “*Measurement of magnetic field emissions at low frequencies*”, In ESA Workshop on Aerospace EMC, Florence, Italy, Volume 30, 2009.
- [22] Anargyros T. Baklezos, Christos D. Nikolopoulos, Sotirios T. Spantideas, Elpida G. Chatzineofytou, Marco Nicoletto, Ilario Marziali, Demis Boschetti, Christos N. Capsalis, “*Steady State Emissions Modeling of Low Frequency Magnetic and Electric Fields Generated by GOCE CDMU*”, In 2019 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), pp. 1-6, IEEE, 2019.
- [23] Elpida G. Chatzineofytou, Adrianos G. Katsouris, Sotirios T. Spantideas and Christos N. Capsalis, “*Theoretical Study of High-Frequency Magnetic Fields’ Coupling and its Impact on Magnetic Force in Space Missions*”, IEEE Magnetic Letters, 2016.
- [24] Zacharias Panagiotis P., Chatzineofytou Elpida G., Spantideas Sotirios T. & Capsalis Christos N., “*Distance scaling method for accurate*

*prediction of slowly varying magnetic fields in satellite missions*”, Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 5, 281-288, 2016.

- [25] Nara Takaaki, Suzuki Satoshi, Shigeru Ando, “*A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients*”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, 3291–3293, 2006.
- [26] Song Hang, Jie Chen, Dongfang Zhou, Deting Hou, Jingyu Lin, “*An equivalent model of magnetic dipole for the slot coupling of shielding cavity*”, In Antenna Propagation and EM Theory, 2008, ISAPE 2008, 8th International Symposium on, 970–973, 2008.
- [27] Endo Hishashi, Takagi Toshiyuki, Yoshifuru Saito, “*A new current dipole model satisfying current continuity for inverse magnetic field source problems*”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 5, 1748–1751, 2005.
- [28] Balcells J., González D., Lamich M., Bedford D., “*EMI Generation Models for Switched Mode Power Supplies*”, Proceedings of the Fifth European Space Power Conference (ESPC): Tarragona, Spain, 21-25 September 1998 / organized by European Space Agency [ESA] ... [et al.]. Noordwijk, the Netherlands: ESA Publications Division, 1998. (ESA SP ; 416), p.421.
- [29] Graps Amara, “*An introduction to wavelets*”, IEEE computational science and engineering 2.2: 50-61, 1995.
- [30] Elpida G. Chatzineofytou , Sotirios T. Spantideas , Christos D. Nikolopoulos , Anargyros T. Baklezos , Ilario Marziali , Marco Nicoletto, Demis Boschetti, Christos N. Capsalis, “*Decoupling of Ground Plane Effect on Low Frequency Magnetic and Electric Field Measurements & Modeling*”, In 2019 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), pp. 1-6, IEEE, 2019
- [31] C. L. Parsons, “*Magnetic Testing of Spacecraft*”, in Proc. Magnetics Workshop, NASA JPL TM 33-216, pp. 83-105, 1965
- [32] Elpida G. Chatzineofytou, Sotirios T. Spantideas, Marco Nicoletto, Ilario Marziali and Christos N. Capsalis, “*Modeling of equipment’s transient behavior for purposes of low frequency magnetic cleanliness verification in space missions*”, IEEE Letters on EMC Practice and Applications, 2019
- [33] Junge Axel, Filippo Marliani., “*Verification of DC magnetic model predictions at spacecraft level.*”, In Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on, pp. 1-4, IEEE, 2012.