



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

Ανάπτυξη Μεθόδων Μαγνητικής
Καθαρότητας σε Διαστημικές
Αποστολές για Στατικά και Χαμηλής
Συχνότητας Μαγνητικά Πεδία.

Σωτήριος Θ. Σπαντιδέας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αθήνα, 2017



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

Ανάπτυξη Μεθόδων Μαγνητικής
Καθαρότητας σε Διαστημικές
Αποστολές για Στατικά και Χαμηλής
Συχνότητας Μαγνητικά Πεδία.

Σωτήριος Θ. Σπαντιδέας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συμβουλευτική επιτροπή: Χρήστος Καψάλης
Παναγιώτης Κωττής
Γεώργιος Φικιώρης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
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.

.....
Δήμητρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Τίγκελης
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

.....
Δημήτριος Βέργαδος
Αν. Καθηγητής Π.Α.Π.Ε.Ι.

Αθήνα, 2017

.....
Σωτήριος Θ. Σπαντιδέας

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

Copyright © Σωτήριος Θ. Σπαντιδέας, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικούς σκοπούς. 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.

Στους παλιόφιλους...

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, προσδιορίζονται και διερευνώνται ειδικά θέματα στο πλαίσιο των εφαρμογών της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και παρεμβολής. Συγκεκριμένα, ο στόχος είναι η ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων και τεχνικών για την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές που περιλαμβάνουν μονάδες ή όργανα ευαίσθητα σε μαγνητικά πεδία. Για το σκοπό αυτό, μελετώνται και αναπτύσσονται μέθοδοι για την πρόβλεψη πολλαπλών μαγνητικών διπόλων από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής υπό εξέταση. Οι μέθοδοι επαληθεύονται και επιβεβαιώνονται με προσομοιωμένες και πραγματικές μετρήσεις από πηγές με γνωστή μαγνητική συμπεριφορά. Ο σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η παραγωγή ισοδύναμων μαγνητικών μοντέλων για όλα τα υποσυστήματα του διαστημικού οχήματος και η εκτίμηση των κατανεμημένων μαγνητικών διπόλων και τετραπόλων που αντιπροσωπεύουν το μακρινό μαγνητικό τους πεδίο.

Αρχικά, δίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της μαγνητικής καθαρότητας, εστιάζοντας σε υπάρχουσες σύγχρονες μεθόδους πρόβλεψης μαγνητικών πηγών από μετρήσεις κοντινού πεδίου καθώς και στον εξοπλισμό, στις εγκαταστάσεις και στη μεθοδολογία που χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή των μαγνητικών μετρήσεων πάνω στη Γη. Έπειτα, περιγράφονται οι βασικές αρχές ηλεκτρομαγνητισμού και το μαθηματικό υπόβαθρο που στηρίζει την παρούσα ανάλυση, προσδιορίζοντας τους περιορισμούς στην προσέγγιση των πιθανών μαγνητικών πηγών με πολλαπλά μαγνητικά δίπολα. Η εξάρτηση του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου από τις παραμέτρους των μαγνητικών βρόχων που είναι τοποθετημένοι μέσα σε μια συσκευή μελετάται εκτενώς.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και η εφαρμογή της στο πρόβλημα πρόβλεψης πολλαπλών μαγνητικών διπόλων από μετρήσεις σταθερού μαγνητικού πεδίου. Η μελέτη διαφόρων διατάξεων μέτρησης πολλαπλών μαγνητομέτρων για τη λήψη ενός στιγμιότυπου της μαγνητικής υπογραφής μιας συσκευής υπό εξέταση διεξάγεται και παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4. Η μελέτη περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση του αριθμού των μαγνητομέτρων, καθώς και των θέσεων των αισθητήρων γύρω από τη συσκευή, προκειμένου να αυξηθεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων πρόβλεψης και να εξαλειφθεί η αβεβαιότητα των περιβαλλοντικών μεταβολών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης, ενισχύοντας έτσι σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων και των εκτιμώμενων μοντέλων. Στο κεφάλαιο 5, η κατασκευή μιας πρωτοτύπης Εγκατάστασης Πολλαπλών Μαγνητομέτρων (Multi Magnetometer Facility) αποτελούμενης από 12 μαγνητόμετρα τύπου Fluxgate, η οποία βασίζεται στην παραπάνω μελέτη, επαληθεύεται με πραγματικές μετρήσεις από πηγές με γνωστή μαγνητική υπογραφή.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται μια αποτελεσματική μέθοδος για την ακριβή πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς μιας συσκευής σε απομακρυσμένα σημεία, αποτρέποντας την υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου στη θέση των μαγνητομέτρων και επιτρέποντας τον προσδιορισμό μαγνητικά καθαρών σημείων κοντά στο διαστημικό σκάφος, όπου ο ευαίσθητος εξοπλισμός μέτρησης μπορεί να τοποθετηθεί με ασφάλεια. Η τεχνική αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την ακριβή πρόβλεψη της μαγνητικής υπογραφής σύνθετων συσκευών που αποτελούνται από πολλές μαγνητικές πηγές. Τέλος, στο κεφάλαιο 7 οι καθιερωμένες τεχνικές για τις μεθόδους μαγνητικής καθαρότητας σταθερών μαγνητικών πεδίων επεκτείνονται για να καλύψουν τις απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας αργά μεταβαλλόμενων πεδίων σε επίπεδο μονάδας και συστήματος. Επιπροσθέτως, στο κεφάλαιο 8 η μέθοδος επαληθεύεται με πραγματικές μετρήσεις μιας χαμηλόσυχνης πηγής με γνωστή μαγνητική συμπεριφορά (πηνίο τροφοδοτούμενο από ρεύμα).

Λέξεις κλειδιά: Μαγνητική Καθαρότητα, Μαγνητικό Δίπολο, Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων, Πολλαπλό Διπολικό Μοντέλο, Χαμηλόσυχνο Μαγνητικό Πεδίο.

Abstract

In the present PhD thesis, specific issues in the scientific field of electromagnetic compatibility and electromagnetic interference are identified and investigated. In particular, the aim is to develop various methods and techniques for achieving magnetic cleanliness in space missions that involve units or instruments susceptible to magnetic fields. For this purpose, methods are envisaged and developed for predicting multiple magnetic dipoles based on near field measurements of the magnetic signature of a unit under test. The methods are verified and validated both via simulated and real measurements by employing sources with well-known magnetic behavior. The focus of this analysis is to produce equivalent magnetic models for all subsystems of the spacecraft and estimate the distributed magnetic dipoles and quadrupoles that may represent the magnetic signature of the original unit or equipment.

Initially, existing methods of prediction of magnetic sources from near field measurements are described, as well as the sensitive equipment (magnetometers), the magnetic facilities and the test measurement methodology used to conduct these measurements on ground are presented and discussed. Moreover, the basic principles of electromagnetism and the mathematical background supporting this analysis are analyzed, identifying possible assumptions, limitations and approximations in the modeling approach of potential magnetic sources with multiple magnetic dipoles. The dependence of the generated magnetic field on the parameters of the magnetic loops placed within a unit is extensively covered.

In Chapter 3, the Particle Swarm Optimization stochastic method is presented and its implementation on the problem of multiple magnetic dipoles prediction from near field magnetic measurements is described. The study of the various multi-magnetometer configurations that obtain a snap-shot of the magnetic signature of a test equipment is conducted and presented in Chapter 4. The study includes the optimization of the number of magnetometers, as well as the location of these sensors around the equipment under test in order to increase the reproducibility of the test results of the prediction and reduce uncertainty due to environmental changes during the measurement process, thus significantly enhancing the accuracy of measurements and estimated models. In Chapter 5, the construction of an innovative Multi Magnetometer Facility consisting of 12 Fluxgate magnetometers, based on the above study, is verified by real measurements test results from sources with known magnetic behavior.

In Chapter 6, an efficient method for accurately predicting the magnetic behavior of a device at remote extrapolation points is presented, preventing the over-estimation

or under-estimation of the magnetic field at the location of the magnetometers and allowing the determination of magnetically clean points near the spacecraft where the sensitive measuring equipment may be safely installed. This technique is very useful for accurately predicting the magnetic signature of complex devices composed of multiple magnetic sources. Finally, in Chapter 7 standard techniques for DC magnetic cleanliness are extended to meet requirements slowly time varying magnetic fields at unit and system level. Additionally, in Chapter 8 the method is validated via real measurements of a dipole source with well-known magnetic behavior, i.e. a current-fed coil.

Key Words: Magnetic Cleanliness, Magnetic Dipole, Electromagnetic Compatibility, Particle Swarm Optimization, Multiple Magnetic Dipole Modeling, Low-Frequency Magnetic Fields.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί το πόνημα μίας προσπάθειας, η οποία δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί χωρίς την συνεισφορά και τη στήριξη σε επιστημονικό, αλλά και προσωπικό επίπεδο, σπουδαίων ανθρώπων.

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κύριο Χρήστο Καψάλη. Η ευρύτατη επιστημονική επάρκεια, η οξυδέρκεια και η αστείρευτη ευρηματικότητά του, τον κατατάσσουν στους κορυφαίους επιστήμονες του χώρου, ενώ ο μεταδοτικός του ενθουσιασμός αποτελεί κινητήριο δύναμη και πηγή έμπνευσης για εμένα και τους συνεργάτες του. Θα ήθελα λοιπόν να εκφράσω τη βαθιά εκτίμηση και ευγνωμοσύνη στο πρόσωπό του, καθώς είναι υπεύθυνος για την επιστημονική μου εξέλιξη.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής μου, τον κύριο Παναγιώτη Κωττή και τον κύριο Γεώργιο Φικιώρη, οι οποίοι με τις εύστοχες παρατηρήσεις τους συνεισέφεραν στην εκπόνηση της διδακτορικής μου εργασίας.

Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθώ στους συναδέλφους μου στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, με τους οποίους με συνδέει πλέον στενή φιλία. Θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την αρμονική συνεργασία και την αμέριστη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια της κοινής μας πορείας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω ειλικρινά την οικογένειά μου, τη σύντροφό μου και τους παλαιόφιλους συνοδοιπόρους στη ζωή μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vii
Ευχαριστίες	ix
Ευρετήριο εικόνων	xv
Ευρετήριο πινάκων	xix
Συνομογραφίες	xxi
Φυσικές σταθερές	xxiii
Σύμβολα	xxv
1 Εισαγωγή στη Μαγνητική Καθαρότητα	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Μαγνητικές μετρήσεις πάνω στη Γη	6
1.2.1 Μετρήσεις σε επίπεδο μονάδας	6
1.2.2 Μετρήσεις σε επίπεδο συστήματος	9
1.2.3 Μαγνήτιση και Απομαγνήτιση	15
1.2.4 Μετρήσεις στατικών και αργά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων	16
1.3 Μοντελοποίηση με Πολλαπλά Μαγνητικά Δίπολα	19
1.4 Μαγνητικός προϋπολογισμός σε επίπεδο συστήματος	20
1.5 Ερευνητικά θέματα στην παρούσα διδακτορική διατριβή	22
2 Βασικές αρχές ηλεκτρομαγνητισμού	25
2.1 Εισαγωγή	25
2.2 Νόμος Biot-Savart	25
2.3 Χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία	26
2.3.1 Διάνυσμα μαγνητικού δυναμικού	26
2.3.2 Λύση για το μαγνητικό πεδίο	27
2.4 Τετραγωνικός βρόχος ρεύματος τοποθετημένος στην αρχή των αξόνων	27

2.4.1	Η κοντινή (στατική) ζώνη	29
2.4.2	Η μακρινή ζώνη ακτινοβολίας	30
2.4.3	Η ενδιάμεση (επαγωγική) ζώνη	32
2.5	Πεδία ηλεκτρικού και μαγνητικού διπόλου	32
2.5.1	Πεδία ηλεκτρικού διπόλου	33
2.5.2	Πεδία μαγνητικού διπόλου	34
2.5.3	Γενικευμένα πεδία ηλεκτρικών και μαγνητικών διπόλων	35
2.5.4	Πεδίο μαγνητικού τετραπόλου	36
2.6	Στοιχειώδη προβλήματα μαγνητισμού	37
2.6.1	Εξάρτηση από τη συχνότητα του ρεύματος της πηγής	40
2.6.2	Εξάρτηση από το σχήμα της πηγής	41
2.6.3	Εξάρτηση από την επιφάνεια του βρόχου	42
2.6.4	Εξάρτηση από την παρουσία ρευμάτων κοινού τρόπου λειτουργίας	43
2.7	Συμπεράσματα	45
3	Μέθοδοι Μοντελοποίησης Πολλαπλών Διπόλων	47
3.1	Εισαγωγή	47
3.2	Μαθηματική Περιγραφή	48
3.3	Στοχαστικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης	49
3.4	Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων - Particle Swarm Optimization (PSO)	50
3.5	Εφαρμογή του αλγορίθμου στην πρόβλεψη πολλαπλών διπόλων	53
4	Μελέτη Μετρητικών Διατάξεων	55
4.1	Εισαγωγή	55
4.2	Γεωμετρία των διατάξεων	55
4.3	Προσομοιωμένες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου	59
4.4	Κριτήρια αξιολόγησης των λύσεων	60
4.5	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	61
4.6	Κατασκευή πολλαπλών μαγνητομέτρων	63
4.6.1	Μεθοδολογία Μέτρησης και Συλλογής Δεδομένων	64
4.6.2	Μηχανικό σύστημα υποστήριξης	65
4.6.3	Ρεαλιστικές διατάξεις μαγνητομέτρων στην εγκατάσταση MMF	67
4.7	Συμπεράσματα	69
5	Πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης	71
5.1	Εισαγωγή	71
5.2	Αποτελέσματα πραγματικών μετρήσεων	72
5.2.1	Δίπολο με ασθενή μαγνητική υπογραφή	72
5.2.2	Δίπολο με ισχυρή μαγνητική υπογραφή	75
5.2.3	Δύο δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές	78
5.2.4	Δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές	80
5.2.5	Πηγίο τροφοδοτούμενο από ηλεκτρικό ρεύμα	82
5.2.6	Μαγνητικό τετράπολο	85
5.3	Συμπεράσματα	88
6	Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου σε απομακρυσμένες αποστάσεις	89
6.1	Εισαγωγή	89

6.2	Μέθοδος πρόβλεψης πολλαπλών μοντέλων	89
6.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	91
6.4	Πραγματικές μετρήσεις	92
6.5	Συμπεράσματα	97
7	Μέθοδοι Μοντελοποίησης Μαγνητικών Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας	99
7.1	Εισαγωγή	99
7.2	Μαθηματικό υπόβαθρο	100
7.3	Περιγραφή της Μεθόδου	102
7.4	Επαλήθευση της μεθόδου με προσομοιώσεις	105
7.5	Συμπεράσματα	109
8	Αποτελέσματα Μοντελοποίησης Χαμηλόσυχνων Μαγνητικών Πεδίων	111
8.1	Εισαγωγή	111
8.2	Ρύθμιση της διάταξης και μεθοδολογία των μετρήσεων	111
8.3	Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης	113
8.4	Συμπεράσματα	116
9	Συμπεράσματα - Μελλοντική Εργασία	117
9.1	Συμπεράσματα	117
9.2	Μελλοντική Εργασία	119
	Βιβλιογραφία	121

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Το διαστημόπλοιο Cassini με magnetometer boom 11 μέτρων.	2
1.2	Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών	4
1.3	Ρεύμα που διαρρέει ένα κύτταρο ηλιακού πάνελ και η τεχνική αντίθετης καλωδίωσης (backwiring) η οποία καταλήγει σε μηδενική μαγνητική ροπή. . . .	5
1.4	Magnetic Coil Facility - MCF.	6
1.5	Εκτίμηση βέλτιστης απόστασης για μαγνητικές μετρήσεις.	7
1.6	Τυπική μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής μιας συσκευής με βήμα γωνίας 10°	8
1.7	Μετρήσεις σε επίπεδο υποσυστήματος Exomars Test Bench.	9
1.8	Μαγνητική εγκατάσταση MFSA για μετρήσεις σε επίπεδο συστήματος. . . .	10
1.9	Μαγνητικό εργαστήριο J.B. BIOT.	11
1.10	Μαγνητικό εργαστήριο J.B. BIOT - γεωμετρία των πηνίων αντιστάθμισης και προσομοίωσης.	12
1.11	Μαγνητικό εργαστήριο J.B. BIOT - πηνία για μαγνήτιση (perm) και απομαγνήτιση (deperm).	12
1.12	Μαγνητικές μετρήσεις και μοντελοποίηση για το διαστημικό σκάφος Ulysses. . . .	14
1.13	Μια καλλιτεχνική απεικόνιση της αποστολής SWARM της ESA που δείχνει τους τρεις δορυφόρους να μετρούν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το εσωτερικό της Γης.	14
1.14	Προφίλ εξωτερικού πεδίου για έλεγχο μαγνήτισης.	15
1.15	Προφίλ εξωτερικού πεδίου για απομαγνήτιση διαστημικού εξοπλισμού.	16
1.16	Αισθητήρας ροής που μετράει τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (Tri-axial Fluxgate Magnetometer) και η ευαισθησία του συναρτήσει της συχνότητας.	17
1.17	Αισθητήρας αναζήτησης των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου (Tri-axial Search Coil Magnetometer) και η ευαισθησία του συναρτήσει της συχνότητας. . . .	18
1.18	Τεχνική των δύο μαγνητομέτρων για απόρριψη του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος.	18
1.19	Προσομοίωση μαγνητικού προϋπολογισμού σε επίπεδο συστήματος που περιλαμβάνει μαγνητοκινητήρες.	21
2.1	Απεικόνιση του νόμου Biot-Savart.	26
2.2	Ορθογωνικός βρόχος ρεύματος τοποθετημένος στο επίπεδο xy γύρω από την αρχή των αξόνων.	28
2.3	Μαγνητικό πεδίο διπόλου (μπλε γραμμή) και ορθογωνικού βρόχου (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την απόσταση παρατήρησης.	38
2.4	Σχήματα μαγνητικών βρόχων.	38

2.5	Εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης του σημείου παρατήρησης ενός τετραγωνικού βρόχου ρεύματος, υπολογιζόμενο με τη χρήση του νόμου Biot-Savart και μέσω του μαγνητικού δυναμικού σε διάφορες συχνότητες.	41
2.6	Καμπύλες προσαρμογής για τον ορθογώνιο βρόχο κάτω από 0,5 m (αριστερά) και πάνω από 0,5 m (δεξιά).	42
2.7	Καμπύλες προσαρμογής για ορθογώνιο βρόχο με πλευρά $a = 0.15$ m κάτω από 0.5 m(αριστερά) και πάνω από 0.5 m (δεξιά).	43
2.8	Καμπύλες προσαρμογής για ορθογώνιο βρόχο με πλευρά $a = 0,15$ m κάτω από 0,5 m(αριστερά) και πάνω από 0,5 m (δεξιά).	44
3.1	Απεικόνιση της βασικής γεωμετρίας του προβλήματος.	48
3.2	Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO.	52
4.1	Διάταξη 1 με 12 σημεία παρατήρησης: ένας κύκλος στο επίπεδο της περιστρεφόμενης τράπεζας.	56
4.2	Διάταξη 2 με 12 σημεία παρατήρησης: δύο κύκλοι 6 μαγνητομέτρων κάτω και πάνω από το επίπεδο της συσκευής.	56
4.3	Διάταξη 3 με 12 σημεία παρατήρησης: τρεις κύκλοι 4 μαγνητομέτρων κάτω, πάνω και στο επίπεδο του τραπέζιού της συσκευής.	57
4.4	Διάταξη 4 με 12 σημεία παρατήρησης: δύο κύκλοι 6 μαγνητομέτρων με διαφορετικές ακτίνες και σε διαφορετικά ύψη πάνω από το επίπεδο του τραπέζιού.	57
4.5	Διάταξη 5 με 12 σημεία παρατήρησης: δύο κύκλοι 6 μαγνητομέτρων κάτω και πάνω από το επίπεδο της περιστρεφόμενης τράπεζας - ο κάτω κύκλος έχει περιστραφεί κατά γωνία 30°	58
4.6	Διάταξη 6 με 12 σημεία παρατήρησης: ελικοειδής δομή γύρω από το EUT.	58
4.7	Διάταξη με 12 μαγνητόμετρα και ακτίνα $r = 20$ cm.	67
4.8	Ελικοειδής διάταξη με 12 μαγνητόμετρα και ακτίνα $r = 30$ cm.	68
4.9	Διάταξη με 12 μαγνητόμετρα και ακτίνες των δύο κύκλων $r_1 = 20$ και $r_2 = 30$ cm.	68
4.10	Διάταξη με 12 μαγνητόμετρα τοποθετημένα σε 4 κύκλους ακτίνας $r = 30$ cm.	69
4.11	Διάταξη με 12 μαγνητόμετρα τοποθετημένα σε διάφορες ακτίνες και ύψη.	69
5.1	Διάταξη 2 με 12 μαγνητόμετρα και ακτίνα $r = 20$ cm.	72
5.2	Μαγνητικό δίπολο με ασθενή μαγνητική υπογραφή.	73
5.3	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του διπόλου με ασθενή μαγνητική υπογραφή - x συνιστώσα.	74
5.4	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του διπόλου με ασθενή μαγνητική υπογραφή - y συνιστώσα.	75
5.5	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του διπόλου με ασθενή μαγνητική υπογραφή - z συνιστώσα.	75
5.6	Μαγνητικό δίπολο με ισχυρή μαγνητική υπογραφή.	76
5.7	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο διπόλου με ισχυρή μαγνητική υπογραφή - x συνιστώσα.	77
5.8	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο διπόλου με ισχυρή μαγνητική υπογραφή - y συνιστώσα.	77
5.9	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο διπόλου με ισχυρή μαγνητική υπογραφή - z συνιστώσα.	78

5.10	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με παράλληλες μαγνητικές ροπές - x συνιστώσα.	79
5.11	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με παράλληλες μαγνητικές ροπές - y συνιστώσα.	79
5.12	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με παράλληλες μαγνητικές ροπές - z συνιστώσα.	80
5.13	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές - x συνιστώσα.	81
5.14	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές - y συνιστώσα.	82
5.15	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές - z συνιστώσα.	82
5.16	Πηγίο τροφοδοτούμενο από ρεύμα.	83
5.17	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του πηγίου το οποίο τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα - x συνιστώσα.	84
5.18	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του πηγίου το οποίο τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα - y συνιστώσα.	85
5.19	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του πηγίου το οποίο τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα - z συνιστώσα.	85
5.20	Σχηματισμός μαγνητικού τετραπόλου αποτελούμενος από δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές σε κοντινή απόσταση.	86
5.21	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο μαγνητικού τετραπόλου - x συνιστώσα.	87
5.22	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο μαγνητικού τετραπόλου - y συνιστώσα.	87
5.23	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο μαγνητικού τετραπόλου - z συνιστώσα.	88
6.1	Σύγκριση μεταξύ θεωρητικού και υπολογιζόμενου (από ένα μοντέλο) μαγνητικού πεδίου σε ένα κύκλο με ακτίνα 1 m.	92
6.2	Σύγκριση μεταξύ θεωρητικού και υπολογιζόμενου (μέση τιμή των 30 μοντέλων) μαγνητικού πεδίου σε ένα κύκλο με ακτίνα 1 m.	92
6.3	Εγκατάσταση δύο μαγνητομέτρων για τη μέτρηση μαγνητικής υπογραφής μίας συσκευής.	93
6.4	Απεικόνιση της τοποθέτησης των 5 μαγνητικών διπόλων στην εγκατάσταση μέτρησης.	93
6.5	Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου στα σημεία μέτρησης.	94
6.6	Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου σε κύκλο ακτίνας 70 cm.	95
6.7	Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου (από διαφορετικό διπολικό μοντέλο) μαγνητικού πεδίου σε κύκλο ακτίνας 70 cm.	95
6.8	Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και της μέσης τιμής των μοντελοποιημένων μαγνητικών πεδίων σε κύκλο ακτίνας 70 cm.	96
6.9	Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου σε κύκλο ακτίνας 150 cm - υπερεκτίμηση του πεδίου.	96
6.10	Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου (από διαφορετικό διπολικό μοντέλο) μαγνητικού πεδίου σε κύκλο ακτίνας 150 cm - υποεκτίμηση του πεδίου.	97

6.11	Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και της μέσης τιμής των μοντελοποιημένων μαγνητικών πεδίων σε κύκλο ακτίνας 150 cm.	97
7.1	Απεικόνιση του προβλήματος.	102
7.2	Διάγραμμα ροής της μεθόδου μοντελοποίησης χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων.	104
7.3	Διάταξη για προσομοιώσεις αργά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων. . . .	105
7.4	Παραμορφωμένο χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης 3.	106
7.5	Παραμορφωμένο φάσμα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στο σημείο παρατήρησης 3.	107
7.6	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο φάσμα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στο σημείο μέτρησης 3.	108
7.7	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο φάσμα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου σε απομακρυσμένο σημείο παρατήρησης.	109
8.1	Διάταξη μαγνητομέτρων για τις μετρήσεις χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων. . . .	112
8.2	Προφίλ του θορύβου υποβάθρου στη συχνοτική περιοχή ενδιαφέροντος. . . .	113
8.3	Πηγίο τροφοδοτούμενο από ρεύμα και χρησιμοποιείται για την παραγωγή πραγματικών μετρήσεων.	114
8.4	Μέτρηση στο πεδίο της συχνότητας της μαγνητικής υπογραφής του EUT - πηνίου.	114
8.5	Μετρούμενα και μοντελοποιημένα φάσματα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στον πλησιέστερο αισθητήρα στο πηνίο.	116

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και μέσο τετραγωνικό σφάλμα για διάφορες συχνότητες του ρεύματος που διαρρέει τον τετραγωνικό βρόχο. . . .	41
2.2	Νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και μέσο τετραγωνικό σφάλμα για τα σχήματα βρόχων υπό εξέταση.	42
2.3	Νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και μέσο τετραγωνικό σφάλμα για διαφορετική επιφάνεια του μαγνητικού βρόχου τετραγωνικού σχήματος. . . .	43
2.4	Νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και μέσο τετραγωνικό σφάλμα για ρεύμα διαφορικού και κοινού τρόπου λειτουργίας που τροφοδοτείται σε τετραγωνικό βρόχο.	44
4.1	Ποσοστά επαναληψιμότητας του μοντέλου χρησιμοποιώντας τις μετρητικές διατάξεις υπό εξέταση.	62
4.2	Σύγκριση των διατάξεων υπό εξέταση.	63
5.1	Πρόβλεψη μοντέλου - Δίπολο με ασθενή μαγνητική υπογραφή.	73
5.2	Δίπολο με ασθενή μαγνητική υπογραφή - Κριτήριο C_1	73
5.3	Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του διπόλου με ασθενή μαγνητική υπογραφή στα 12 μαγνητόμετρα.	74
5.4	Πρόβλεψη μοντέλου - Δίπολο με ισχυρή μαγνητική υπογραφή.	76
5.5	Δίπολο με ισχυρή μαγνητική υπογραφή - Κριτήριο C_1	76
5.6	Πρόβλεψη μοντέλου - Δύο δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές.	78
5.7	Δύο δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές - Κριτήριο C_1	78
5.8	Πρόβλεψη μοντέλου - Δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές. . . .	80
5.9	Δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές - Κριτήριο C_1	81
5.10	Πρόβλεψη μοντέλου - Πηνίο τροφοδοτούμενο με σταθερό ρεύμα.	83
5.11	Πηνίο τροφοδοτούμενο με σταθερό ρεύμα - Κριτήριο C_1	84
5.12	Πρόβλεψη μοντέλου - Μαγνητικό δίπολο και τετράπολο.	86
5.13	Μαγνητικό δίπολο και τετράπολο - Κριτήριο C_1	87
6.1	Παράμετροι του σχηματισμού των 5 μαγνητικών πηγών.	93
7.1	Εκτιμώμενα διπολικά μοντέλα για τις επιλεγμένες συχνότητες.	108
7.2	RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου φάσματος του μαγνητικού πεδίου.	109
8.1	Εκτιμώμενες παράμετροι των διπολικών μοντέλων και προσαρμογή του μοντέλου (G_{rel}) για τις προσδιορισμένες συχνότητες.	115

Συντομογραφίες

AC	A lternative C urrent
ACS	A ttitude C ontrol S ystem
ADC	A nalog D igital C onverter
DAQ	D ata A c Q uisition
DC	D irect C urrent
DE	D ifferential E volution
EMC	E lectro M agnetic C ompatibility
EMI	E lectro M agnetic I nterference
ESA	E uropean S pace A gency
EUT	E quipment U nder T est
FEM	F inite E lement M ethod
FFT	F ast F ourier T ransform
GA	G enetic A lgorithm
LEO	L ow E arth O rbit
MCF	M agnetic C oil F acility
MDM	M ultiple D ipole M odeling
MMF	M ulti M agnetometer F acility
PSO	P article S warm O ptimization
RMSE	R oot M ean S quare E rror
SNR	S ignal to N oise R atio

Φυσικές σταθερές

Ταχύτητα του φωτός	$c = 2.997\,924 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	$\mu_0 = 1.256\,637 \times 10^{-8} \text{ NA}^{-2}$
Ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού	$\epsilon_0 = 8.854\,187 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$
Χαρακτηριστική αντίσταση του ελεύθερου χώρου	$Z_0 = 376.730\,313 \text{ }\Omega$

Σύμβολα

f	συχνότητα	Hz
ω	γωνιακή συχνότητα	rad s ⁻¹
λ	μήκος κύματος	m
k	κυματαριθμός	m ⁻¹
t	χρόνος	s
t'	καθυστερημένος χρόνος	s
ρ	πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου	C m ⁻³
I	ηλεκτρικό ρεύμα	A
Φ	ηλεκτρικό δυναμικό	V
\mathbf{A}	μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό	V s m ⁻¹
\mathbf{J}	επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος	A m ⁻²
\mathbf{B}	διάνυσμα μαγνητικού πεδίου	T
\mathbf{E}	διάνυσμα ηλεκτρικού πεδίου	V m ⁻¹
\mathbf{m}	διάνυσμα διπολικής μαγνητικής ροπής	A m ²
\mathbf{p}	διάνυσμα διπολικής ηλεκτρικής ροπής	C m
\mathbf{Q}_l	τανυστής τετραπολικής μαγνητικής ροπής	A m ³
\mathbf{x}' ή \mathbf{r}'	διάνυσμα θέσης της πηγής	m
\mathbf{x} ή \mathbf{r}	διάνυσμα θέσης του σημείου παρατήρησης	m
\mathbf{R}	διάνυσμα απόστασης μεταξύ σημείου πηγής και παρατήρησης	m
R ή r	απόσταση μεταξύ σημείου πηγής και σημείου παρατήρησης	m

Κεφάλαιο 1

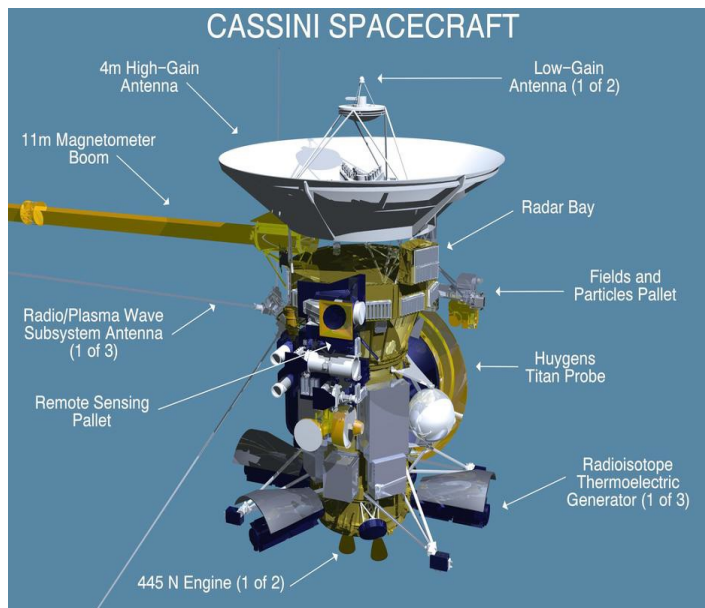
Εισαγωγή στη Μαγνητική Καθαρότητα

1.1 Γενικά

Η μέτρηση μαγνητικών πεδίων τα οποία περιβάλλουν τη Γη, άλλους πλανήτες ή τον ήλιο είναι πρωτεύων στόχος προηγούμενων, εν εξελίξει και μελλοντικών διαστημικών αποστολών. Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την εσωτερική δομή και τη σύσταση αυτών των ουράνιων σωμάτων, καθώς και να βελτιώσει την κατανόησή μας για τους φυσικούς μηχανισμούς οι οποίοι διέπουν τις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις της ύλης που βρίσκεται σε κατάσταση πλάσματος [3]. Για να μετρήσουν *in situ* τις επιπτώσεις των μαγνητικών φαινομένων, σχεδόν όλα τα διαστημόπλοια έχουν ειδικές ευαίσθητες μετρητικές συσκευές που ονομάζονται μαγνητόμετρα. Από τις πρώτες διαστημικές αποστολές, η ανάγκη να προσδιοριστούν κάποια “μαγνητικά καθαρά” σημεία πάνω στο διαστημόπλοιο γρήγορα προέκυψε [38]. Μονάδες και εξοπλισμός καθαυτού του διαστημοπλοίου παράγουν ένα συνδυασμένο μαγνητικό πεδίο στη θέση των μαγνητομέτρων, ουσιαστικά παρεμβάλλοντας τις μετρήσεις των οργάνων. Επιπρόσθετα, πολλοί μηχανισμοί του διαστημοπλοίου βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικές αρχές για ώθηση και κίνηση που επίσης εκπέμπουν μαγνητικά πεδία τα οποία μπορούν να διαταράξουν τις μετρήσεις.

Αναμφίβολα, μια από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις για τον μετρητικό εξοπλισμό που τοποθετείται επί του σκάφους είναι να λειτουργεί σε μαγνητικά καθαρό περιβάλλον· τυπικές απαιτήσεις για το συνολικό μαγνητικό πεδίο του διαστημοπλοίου στη θέση των μαγνητομέτρων είναι για παράδειγμα της τάξης του 0.1 - 1 nT [29]. Κατά συνέπεια, από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού μιας διαστημικής αποστολής πραγματοποιούνται μελέτες που στόχο έχουν την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής του μαγνητικού πεδίου του οχήματος στις μετρήσεις των οργάνων. Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται συνήθως σε ένα άκαμπτο μακρύ

βραχίονα σε απόσταση 6 έως 12 μέτρων από το διαστημόπλοιο, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η εξασθένιση του μαγνητικού πεδίου ενός διπόλου σε εξάρτηση με την απόσταση από αυτό ακολουθεί κυβικό νόμο. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται το διαστημόπλοιο Cassini, το οποίο φέρει τα μαγνητόμετρα σε έναν άκαμπτο βραχίονα μήκους 11 μέτρων [35].



ΣΧΗΜΑ 1.1: Το διαστημόπλοιο Cassini με magnetometer boom 11 μέτρων.

Εφόσον οι διαταραχές του μαγνητικού πεδίου οφείλονται σε μεγάλο βαθμό σε εξοπλισμό και υποσυστήματα του διαστημοπλοίου, η πρώτη φάση των διαστημικών αποστολών περιλαμβάνει μετρήσεις Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility - EMC test campaigns) και Παρεμβολής (Electromagnetic Interference - EMI) σε επίπεδο μονάδας και σε επίπεδο συστήματος του διαστημοπλοίου πάνω στη Γη. Ένα βασικό μέρος των EMC μετρήσεων για τέτοιες διαστημικές αποστολές είναι η μαγνητική καθαρότητα και συνεπάγεται τον προσδιορισμό της μαγνητικής υπογραφής του διαστημοπλοίου σε επίπεδο μονάδας, εξοπλισμού, υποσυστήματος και συστήματος [12]. Οι απαιτήσεις για μαγνητική καθαρότητα καθορίζονται από την επιστημονική εφαρμογή της εκάστοτε διαστημικής αποστολής και είναι ανάλογη με την ευαισθησία (ανάλυση) των ενσωματωμένων μαγνητομέτρων.

Η μαγνητική καθαρότητα βασίζεται σε δύο πυλώνες. Ο ένας είναι ο έλεγχος των πηγών του μαγνητικού πεδίου και ο δεύτερος είναι ο έλεγχος των υλικών τα οποία μπορούν να έχουν επαγόμενη μαγνήτιση παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Επομένως, είναι σημαντικό να ελέγχονται τόσο οι ιδιότητες των υλικών όσο και οι πηγές μαγνητικού πεδίου. Οι πιθανές πηγές μαγνητικού πεδίου είναι:

- Η παραμένουσα μαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών υλικών.
- Τα ηλεκτρικά ρεύματα.

Τα υλικά μπορούν ουσιαστικά να αλληλεπιδρούν με δύο διαφορετικούς τρόπους με το μαγνητικό πεδίο. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι:

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

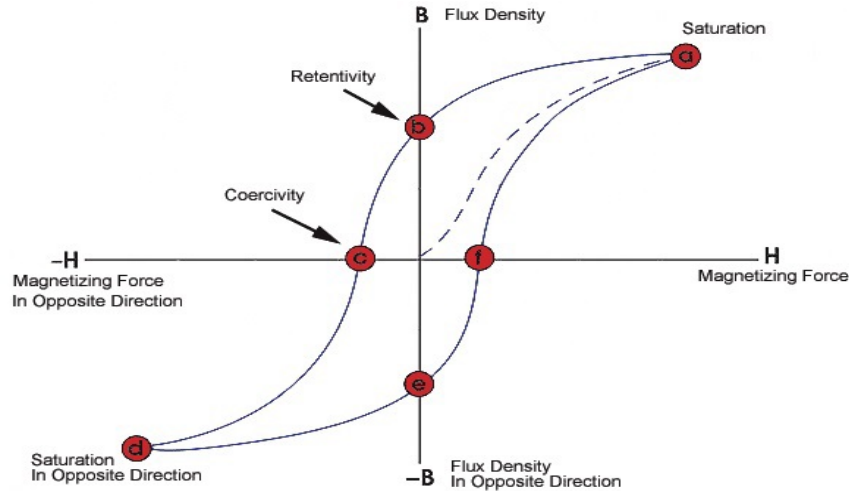
Τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να έχουν μόνιμη ή επαγόμενη μαγνήτιση, η τελευταία όντας παρούσα μόνο όταν το υλικό εκτίθεται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Επιπροσθέτως, αγώγιμα αντικείμενα χωρίς μαγνητικές ιδιότητες μπορούν να παρουσιάσουν μαγνητική επιδεκτικότητα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC magnetic susceptibility) όταν εκτίθενται σε χρονικά μεταβαλλόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, μέσω του φυσικού μηχανισμού των δινορευμάτων [9].

Σχετικά με την μόνιμη (ή παραμένουσα) μαγνήτιση, ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μπορεί να είναι μαλακό ή σκληρό ανάλογα με την τιμή του πεδίου καταναγκασμού (coercive field), που δηλώνεται ως H_c , μετράται σε A/m και εκφράζει την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που απαιτείται για να μειώσει τη μαγνήτιση του υλικού στο μηδέν, αφού πρώτα το έχει οδηγήσει σε κορεσμό (Σχήμα 1.2). Αν η παραμένουσα μαγνήτιση είναι σταθερή μέχρι ενός δεδομένου ορίου του εξωτερικού πεδίου, το υλικό θεωρείται σκληρό. Εάν όμως ο μαλακός μαγνητισμός του αλλάζει κάτω από αυτό το όριο, το υλικό θεωρείται μαλακό. Το επίπεδο του κατώτατου ορίου που χρησιμοποιείται για ένα διαστημικό πρόγραμμα εξαρτάται από τις ανάγκες της συγκεκριμένης αποστολής. Αυτό το κατώφλι, που εκφράζεται ως μT στον ελεύθερο χώρο, επιλέγεται από το εύρος 100 μT - 300 μT και αντιστοιχεί σε εξωτερικό εφαρμοζόμενο πεδίο περίπου 80 - 240 A/m). Για τις περισσότερες διαστημικές αποστολές το όριο των 100 μT είναι επαρκές, δηλαδή περίπου το διπλάσιο του πλάτους του μαγνητικού πεδίου της Γης.

Η επαγόμενη μαγνήτιση ενός υλικού (μερικές φορές αδόκιμα λέγεται μαλακή) εξαρτάται πλήρως από την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και αλλάζει αναλόγα με αυτό.

Οι ροπές και οι δυνάμεις δημιουργούνται εάν υπάρχουν μαγνητικά υλικά ή καλώδια που φέρουν ηλεκτρικό ρεύμα και εκτίθενται σε μαγνητικό πεδίο. Ο έλεγχος των μαγνητικών υλικών περιλαμβάνει:

- Περιορισμό των μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών σε βαθμό που είναι αποδεκτός για τις απαιτήσεις της μαγνητικής καθαρότητας.
- Δημιουργία απαιτήσεων μαγνητικής ροπής σε επίπεδο μονάδας.
- Έλεγχο της δρομολόγησης των ηλεκτρικών ρευμάτων.



ΣΧΗΜΑ 1.2: Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών

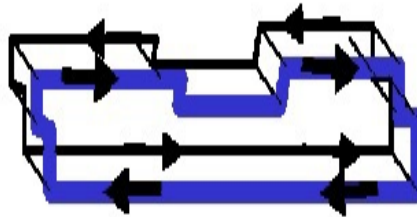
- Δημιουργία απαιτήσεων για τη δρομολόγηση του ηλεκτρικού ρεύματος ως μαγνητική ροπή ή ως μαγνητικό πεδίο.

Η μαγνητική καθαρότητα ενός διαστημικού σκάφους μπορεί να επιτευχθεί και να ελεγχθεί από τα κάτωθι:

- Προσεκτικός σχεδιασμός με μη μαγνητικά υλικά.
- Προϋπολογισμός μαγνητικής ροπής.
- Μαγνητικοί έλεγχοι.
- Μοντελοποίηση του μαγνητικού πεδίου ολόκληρου του διαστημοπλοίου.

Ο στόχος του μαγνητικά καθαρού διαστημοπλοίου επιτυγχάνεται με εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης της διαστημικής αποστολής, αποτελούμενη από προσεκτικό σχεδιασμό του διαστημικού σκάφους· το πρώτο βήμα είναι συνήθως η επιλογή μη μαγνητικών υλικών (τιτάνιο, συγκεκριμένα κράματα αλουμινίου, κ.α.) για την κατασκευή του σκελετού του σκάφους και των συσκευών. Φυσικά, η χρήση μαγνητικών υλικών δεν γίνεται να αποφευχθεί εξ ολοκλήρου, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις οι μόνιμες μαγνητικές ιδιότητες των υλικών διατηρούνται χαμηλές ή αποφεύγονται εντελώς στο σχεδιασμό του σκάφους. Συνεπώς, οι μετρήσεις Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας και Παρεμβολής έχουν ως στόχο να διακριβώσουν εάν η μόνιμη παραμένουσα μαγνήτιση του διαστημικού οχήματος διατηρείται κάτω από τις απαιτήσεις που καθορίζονται από την εκάστοτε επιστημονική εφαρμογή.

Επίσης, η σύνδεση των διαφόρων μονάδων εξοπλισμού μεταξύ τους καθώς και με μια κεντρική μονάδα είναι καθοριστικής σημασίας για τη μελέτη των Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών. Η καλωδίωση όλων των συστημάτων πρέπει να γίνεται προσεκτικά, έτσι ώστε να μη δημιουργούνται βρόχοι που συμπεριφέρονται ως μαγνητικά δίπολα και η οδήγηση του ρεύματος σε κάθε συσκευή να βρίσκεται μαζί με την επιστροφή του (twisted pair), ουσιαστικά για να αλληλοαναιρούνται τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από τα καλώδια όταν διαρρέονται από ρεύμα. Μια μέθοδος που εφαρμόζεται στην καλωδίωση της ηλιακής συστοιχίας (solar array), ονομάζεται τεχνική αντίθετης καλωδίωσης και φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Η μέθοδος αυτή είναι ουσιαστικά μια τεχνική μαγνητικής αντιστάθμισης, που είναι πιο σημαντική σε χώρους όπου τοποθετούνται μαγνητικοί αισθητήρες ή ευαίσθητες μονάδες. Με τη δρομολόγηση του καλωδίου επιστροφής από κάθε διαδρομή ρεύματος ακριβώς κάτω από τον κεντρικό άξονα κάθε καλωδίου, το εκπομπόμενο μαγνητικό πεδίο και, κατά συνέπεια, η μαγνητική ροπή κάθε κυττάρου του ηλιακού πάνελ μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Προκειμένου να επιτευχθεί επιπρόσθετη μαγνητική αντιστάθμιση, η κατεύθυνση του ρεύματος σε γειτονικά κύτταρα μπορεί να εναλλάσσεται [44].



ΣΧΗΜΑ 1.3: Ρεύμα που διαρρέει ένα κύτταρο ηλιακού πάνελ και η τεχνική αντίθετης καλωδίωσης (backwiring) η οποία καταλήγει σε μηδενική μαγνητική ροπή.

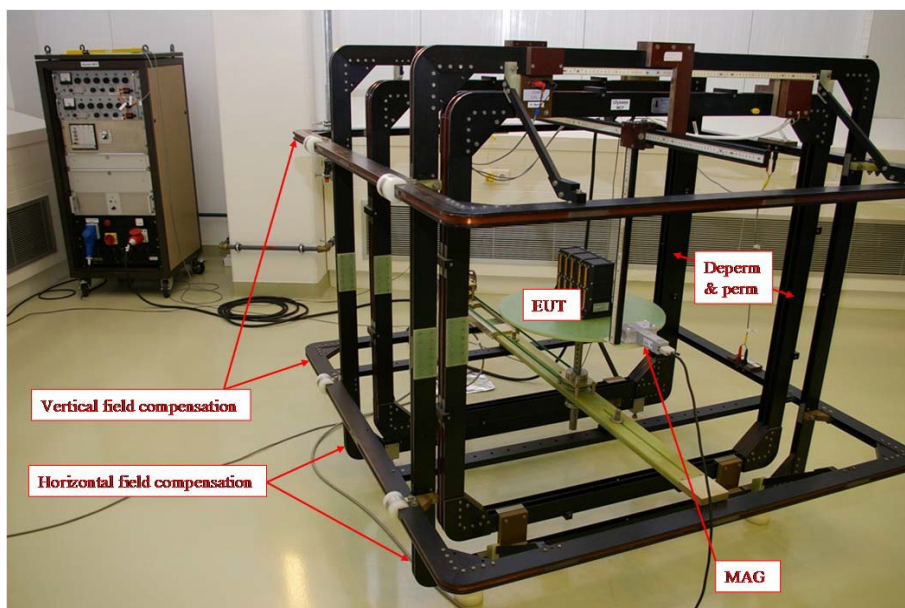
Τέλος, υπάρχουν πολλές τεχνικές θωράκισης των καλωδίων και του εξοπλισμού αλλά λόγω της πολυπλοκότητας της καλωδίωσης σε ένα διαστημικό σκάφος είναι πρακτικά αδύνατο να κατασταλούν πλήρως τα μαγνητικά πεδία που προκαλούν τις παρεμβολές. Οι ηλεκτρομαγνητικές θωρακίσεις που περιέχουν σιδηρομαγνητικά υλικά (με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα) πρέπει να αποφεύγονται όσο το δυνατόν περισσότερο. Ακόμη και τα μικρά φύλλα του Mu-metal (μαλακό μαγνητικό κράμα νικελίου-σιδήρου με πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως για τη θωράκιση ευαίσθητου ηλεκτρονικού εξοπλισμού έναντι στατικών ή χαμηλής συχνότητας μαγνητικών πεδίων) μπορούν να δημιουργήσουν μια υψηλή μαλακή μαγνητική ροπή και, επίσης, ενδέχεται να μαγνητιστούν μόνιμα. Εντούτοις, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι λογικό να χρησιμοποιούνται μαγνητικές θωρακίσεις για τη μείωση της μαγνητικής ροπής του εξοπλισμού και των οργάνων. Συνεπώς, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός διότι υπάρχει κίνδυνος να επιδεινωθούν οι μαγνητικές ιδιότητες του εξοπλισμού, ενώ ο αρχικός στόχος είναι η καταστολή τους. Για να αποφευχθεί ο κορεσμός

υλικού θωράκισης το οποίο την καθιστά αναποτελεσματική, απαιτούνται αρκετά στρώματα θωράκισης από διαφορετικά υλικά. Γενικά, η μαγνητική θωράκιση θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο εάν δεν υπάρχει άλλος τρόπος επίλυσης του προβλήματος, καθώς ο πρωτεύων στόχος είναι η πρόληψη για την αποφυγή των ανεπιθύμητων μαγνητικών διαταραχών.

1.2 Μαγνητικές μετρήσεις πάνω στη Γη

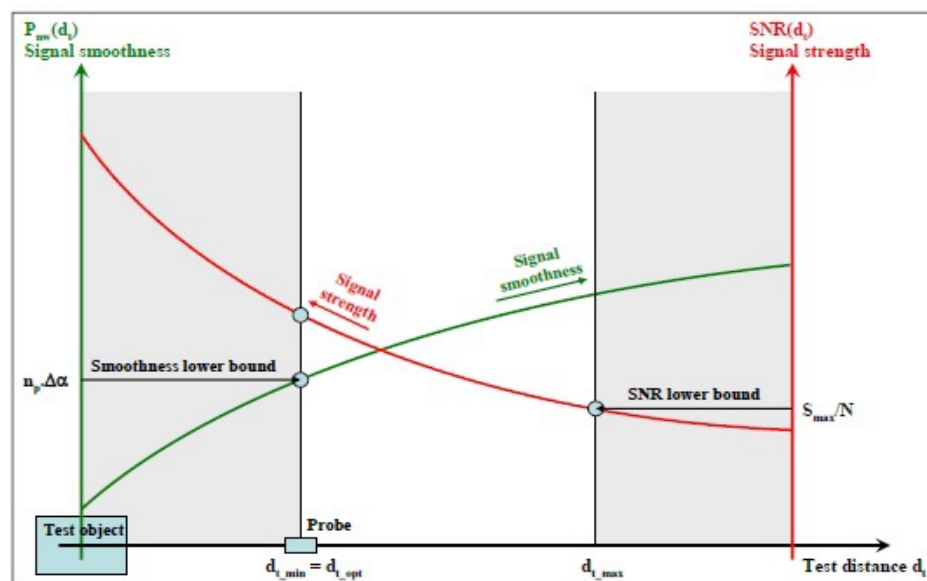
1.2.1 Μετρήσεις σε επίπεδο μονάδας

Η μέθοδος μέτρησης της μαγνητικής ροπής διαφόρων συσκευών και εξοπλισμού υπό εξέταση (Equipment Under Test - EUT) για αποστολές με αυστηρές απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας πραγματοποιούνται συνήθως σε ειδικές εγκαταστάσεις που ονομάζονται Mobile Coil Facility (MCF). Οι εγκαταστάσεις αυτές περιλαμβάνουν ένα μικρό αριθμό μαγνητόμετρων και χρησιμοποιούν περιστροφικές μετρήσεις για να μετρήσουν τη μαγνητική υπογραφή γύρω από ένα EUT [12]. Συνήθως, για να αποφευχθεί η μέτρηση της επαγόμενης μαγνήτισης της συσκευής και να μετρηθεί μόνο η παραμένουσα μαγνητική υπογραφή, το EUT τοποθετείται στο κέντρο των πηνίων Helmholtz που στόχο έχουν να αντισταθμίσουν το μαγνητικό πεδίο της Γης. Το μαγνητικό πεδίο μετά την αντιστάθμιση είναι στο επίπεδο των 10 nT - 100 nT στο κέντρο του συστήματος των πηνίων και θεωρείται επαρκές ώστε να καθίσταται αμελητέα οποιαδήποτε επαγόμενη μαγνητική ροπή. Ένα άλλο ζεύγος πηνίων Helmholtz χρησιμοποιείται για την υποβολή του EUT σε πεδία μαγνήτισης/απομαγνήτισης (perm/deperm), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4.



ΣΧΗΜΑ 1.4: Magnetic Coil Facility - MCF.

Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου συνήθως διεξάγονται σε κοντινή απόσταση από τη συσκευή για σκοπούς υψηλού σηματοθροβικού λόγου (Signal to Noise Ratio - SNR). Αφ' ετέρου, η μαγνητική συμπεριφορά της συσκευής θεωρείται ότι ακολουθεί τον κυβικό νόμο του διπόλου σχετικά με την απόσταση όταν το σημείο παρατήρησης (μαγνητόμετρο) βρίσκεται μακρύτερα από περίπου 3 - 5 φορές τη μέγιστη διάσταση της συσκευής υπό εξέταση [20]. Κάτω από αυτό το όριο, ο ισχύων νόμος απόστασης του μαγνητικού πεδίου μπορεί να αποκλίνει από τον νόμο του διπόλου. Η απόσταση τοποθέτησης του μαγνητομέτρου καθορίζεται, λοιπόν, από τη συμπεριφορά της μαγνητικής υπογραφής μιας μονάδας σε συνάρτηση με τον σηματοθροβικό λόγο SNR καθώς επίσης και την ομαλότητα του σήματος (Signal Smoothness), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.

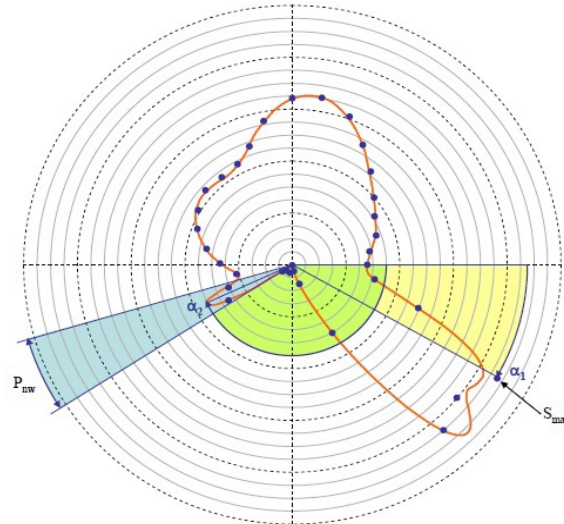


ΣΧΗΜΑ 1.5: Εκτίμηση βέλτιστης απόστασης για μαγνητικές μετρήσεις.

Επιπλέον, για να υπάρχει καλή κάλυψη της μαγνητικής υπογραφής της συσκευής σε όλες τις γωνίες, οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου αποκτώνται συνήθως σε βήμα γωνίας 10° σε μια ολόκληρη 360° στροφή από ένα ή περισσότερα σταθερά μαγνητόμετρα 3 αξόνων. Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται μια τυπική μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής μιας συσκευής με βήμα γωνίας 10° .

Στη συνέχεια, ένα Πολλαπλό Διπολικό Μοντέλο (Multiple Magnetic Dipole Model - MDM) προσαρμόζεται στο μετρούμενο μαγνητικό πεδίο με έναν αλγόριθμο που εφαρμόζει μη γραμμικές ντετερμινιστικές μεθόδους βελτιστοποίησης, όπως η μέθοδος Gauss-Newton [11, 29] ή άλλες στοχαστικές ευρεστικές μεθόδους, όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι [21].

Η εμπειρία με τις μετρήσεις έχει δείξει ότι:



ΣΧΗΜΑ 1.6: Τυπική μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής μιας συσκευής με βήμα γωνίας 10° .

- Οι περισσότερες (αν όχι όλες) μονάδες μπορούν να μοντελοποιηθούν με λιγότερα από 5 δίπολα.
- Μετρήσεις από ένα μαγνητόμετρο είναι συνήθως αρκετές για τη διαδικασία μοντελοποίησης, αν και μετρήσεις από δύο ή περισσότερα βελτιώνουν πολύ την ακρίβεια του μοντέλου.
- Δεν απαιτείται αντιστάθμιση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου της Γης εάν η περιστροφή εκτελείται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

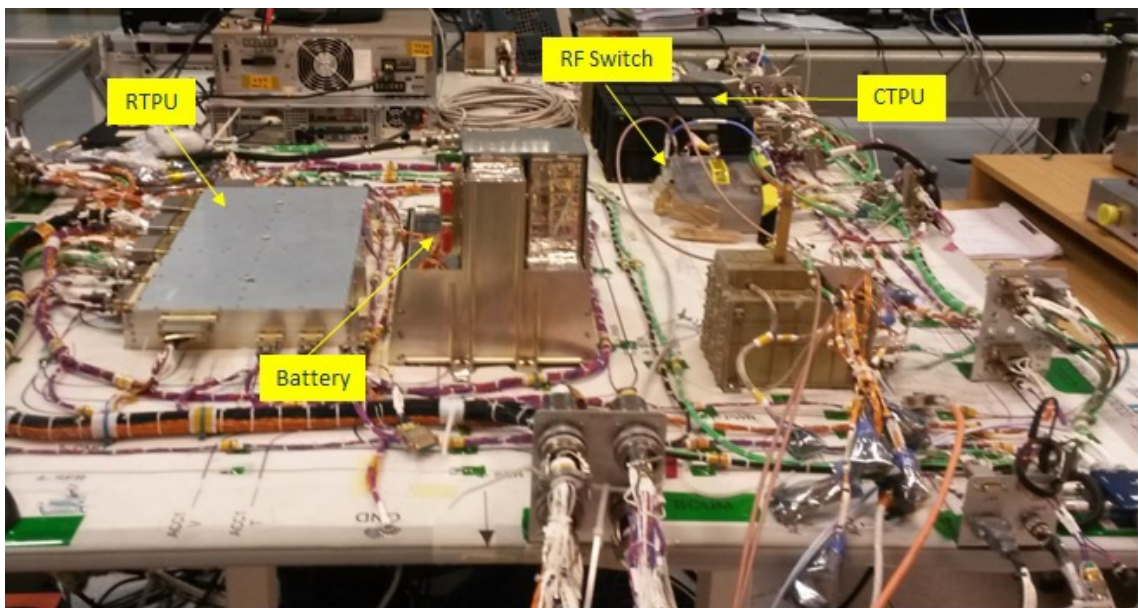
Ένα δεδομένο EUT μετράται συνήθως αρκετές φορές σύμφωνα με την κάτωθι ακολουθία:

- Αρχική (όπως παρελήφθη η συσκευή).
- Μετά την απομαγνήτιση (deperm).
- Μετά τη μαγνήτιση (perm) με εξωτερικό πεδίο έως 0.3 mT.
- Μετά την τελική απομαγνήτιση.
- Ενεργοποιημένο (powered on).

Αυτή η τυποποιημένη αλληλουχία μπορεί να συμπληρωθεί με μια μέτρηση για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης μαγνητικής διπολικής ροπής που αντιπροσωπεύει την επαγόμενη μαγνήτιση της συσκευής. Για το σκοπό αυτό, ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο παράγεται με το ζεύγος πηνίων Helmholtz και εφαρμόζεται στο χώρο που βρίσκεται η συσκευή. Τυπικά επίπεδα του εξωτερικού πεδίου κυμαίνονται μεταξύ $\pm 50 \mu\text{T}$ και $\pm 100 \mu\text{T}$, δηλαδή

διαφορετικά επίπεδα με αντίθετες κατευθύνσεις. Για μια τυχαία μονάδα εξοπλισμού το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε όλους τους άξονες x, y, z για να καλυφθούν όλες οι περιπτώσεις.

Επιπροσθέτως, μαγνητικές μετρήσεις εκτελούνται και σε επίπεδο υποσυστήματος κάνοντας χρήση δύο ή περισσότερων μονάδων εξοπλισμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.7. Ο σκοπός αυτών των μετρήσεων είναι να αποκαλύψουν τα μαγνητικά αποτελέσματα της ταυτόχρονης λειτουργίας πολλών συσκευών, της ηλεκτρικής διασύνδεσης μεταξύ τους καθώς και της επίδρασης της λειτουργίας της καθεμιάς συσκευής στη μαγνητική συμπεριφορά του υπόλοιπου εξοπλισμού (unit-to-unit interaction).



ΣΧΗΜΑ 1.7: Μετρήσεις σε επίπεδο υποσυστήματος Exomars Test Bench.

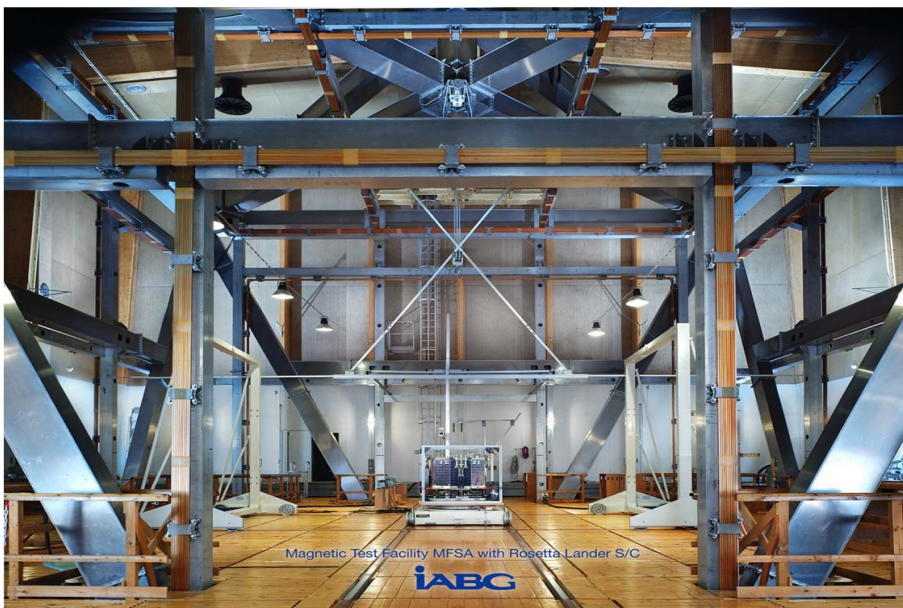
1.2.2 Μετρήσεις σε επίπεδο συστήματος

Μαγνητικές μετρήσεις σε επίπεδο συστήματος (ολόκληρου του διαστημοπλοίου) διεξάγονται προκειμένου να εκτιμηθεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ολόκληρο το διαστημικό σκάφος στη θέση του ευαίσθητου ωφέλιμου φορτίου, δηλαδή στην θέση των μαγνητομέτρων πάνω στο βραχίονα [19]. Τέτοιες μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ειδικές εγκαταστάσεις που επιτρέπουν την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου της Γης προκειμένου να επιτευχθεί μια μαγνητικά καθαρή περιοχή όπου μπορούν να πραγματοποιηθούν μαγνητικές μετρήσεις και να προσομοιωθούν οι κατάλληλες συνθήκες μηδενικού πεδίου (zero field conditions) [12]. Η αντιστάθμιση των φυσικών μεταβολών του πεδίου της Γης πραγματοποιείται χάρη σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί ανατροφοδότηση από ένα εξωτερικό μαγνητόμετρο αναφοράς και ρυθμίζει αναλόγως το ρεύμα τροφοδοσίας των πηνίων. Παραδείγματα τέτοιων

εγκαταστάσεων στην Ευρώπη είναι η MFSA της IABG στο Ottobrunn της Γερμανίας και η μαγνητική εγκατάσταση J.B. BIOT της CNES στην Toulouse της Γαλλίας. Αν και διαφορετικών μεγεθών, και οι δύο εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν τέσσερα τετράγωνα πηνία ανά άξονα για τη βελτίωση της ομοιογένειας του πεδίου και την επέκταση της ζώνης αντιστάθμισης του μαγνητικού πεδίου της Γης.

Η εγκατάσταση MFSA (Σχήμα 1.8) επιτρέπει τη δημιουργία μιας μεγάλης ζώνης μηδενικού σταθερού μαγνητικού πεδίου (ή τεχνητά ομοιόμορφου σταθερού πεδίου - DC έως 75000 nT), με τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- Ανάλυση ≤ 0.1 nT στο κέντρο της εγκατάστασης.
- Ακρίβεια ~ 0.3 nT.
- Ομοιομορφία 6 nT σε διάμετρο 4 μέτρων (μέγιστη απόκλιση από την κεντρική τιμή).
- Σταθερότητα στο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο περίπου 0.5 nT/h.



ΣΧΗΜΑ 1.8: Μαγνητική εγκατάσταση MFSA για μετρήσεις σε επίπεδο συστήματος.

Οι βασικές μετρήσεις που μπορούν να εκτελεστούν με αυτή την εγκατάσταση είναι:

- Προσδιορισμός της μόνιμης και της επαγόμενης μαγνητικής ροπής δορυφόρων και υποσυστημάτων.
- Προσομοίωση του μαγνητικού περιβάλλοντος ενός περιστρεφόμενου διαστημοπλοίου (μέσω περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου).

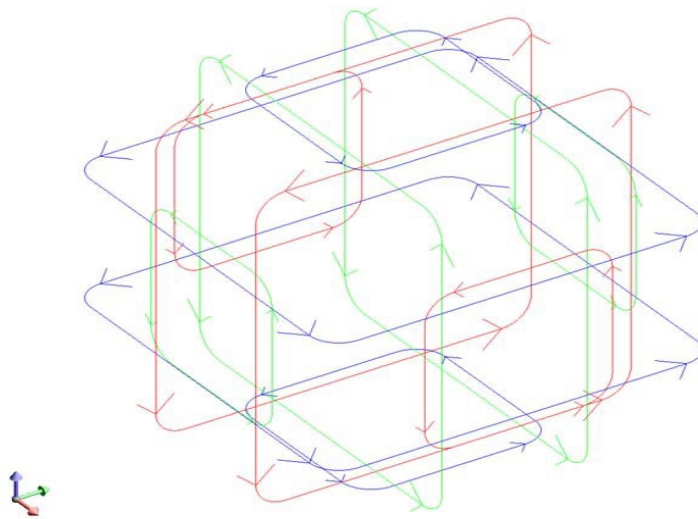
- Βαθμονόμηση μαγνητομέτρων διαστημικών σκαφών.
- Μαγνήτιση (Perm) και απομαγνήτιση (deperm) χρησιμοποιώντας τα άσπρα τετραγωνικά πηνία που έχουν διαστάσεις 3.7 m × 3.7 m - Σχήμα 1.8.
- Ο περιστρεφόμενος δίσκος μπορεί να αντέξει σκάφη βάρους έως 1500 kg.

Η εγκατάσταση J.B. BIOT (Σχήμα 1.9) επιτρέπει τη δημιουργία μιας μεγάλης ζώνης μηδενικού σταθερού μαγνητικού πεδίου (ή τεχνητά ομοιόμορφου σταθερού πεδίου - DC έως 75000 nT). Είναι αφιερωμένη κυρίως στη δοκιμή υπομονάδων διαστημικών οχημάτων καθώς και μικρών δορυφόρων με τις ακόλουθες προδιαγραφές:

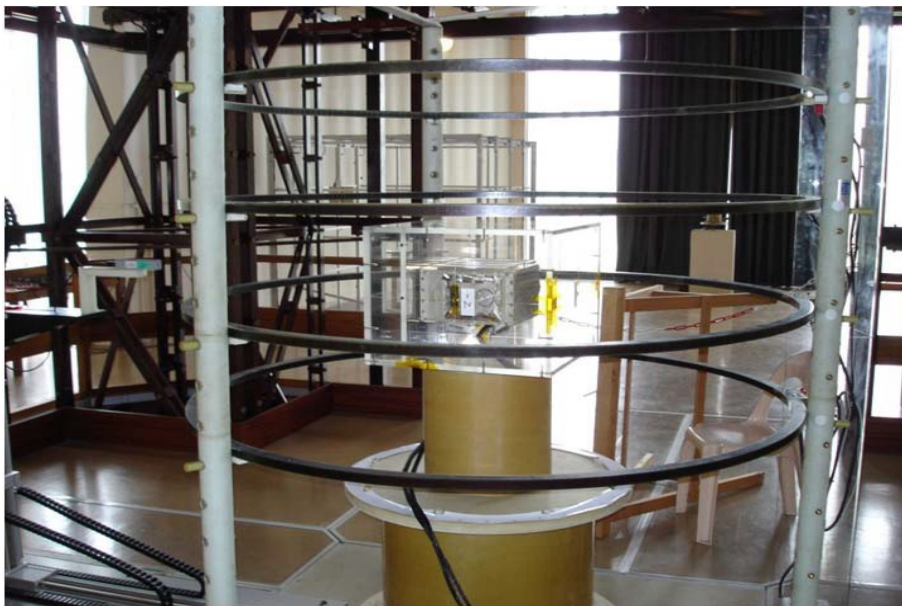


ΣΧΗΜΑ 1.9: Μαγνητικό εργαστήριο J.B. BIOT.

- Αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου της Γης εντός ± 5 nT (στοχεύοντας στα ± 1 nT).
- Προσομοίωση ομοιόμορφων μαγνητικών πεδίων μέχρι 70000 nT σε όλες τις κατευθύνσεις (Σχήμα 1.10).
- Απομαγνήτιση (Deperm) χρησιμοποιώντας τέσσερα κυκλικά πηνία διαμέτρου 1575 mm - Σχήμα 1.11.
- Χωρητικότητα: 1 m × 1 m × 1 m.
- Επιτρεπόμενη μάζα του αντικειμένου δοκιμής: 173 kg.



ΣΧΗΜΑ 1.10: Μαγνητικό εργαστήριο J.B. BIOT - γεωμετρία των πηνίων αντιστάθμισης και προσομοίωσης.



ΣΧΗΜΑ 1.11: Μαγνητικό εργαστήριο J.B. BIOT - πηνία για μαγνήτιση (perm) και απομαγνήτιση (deperm).

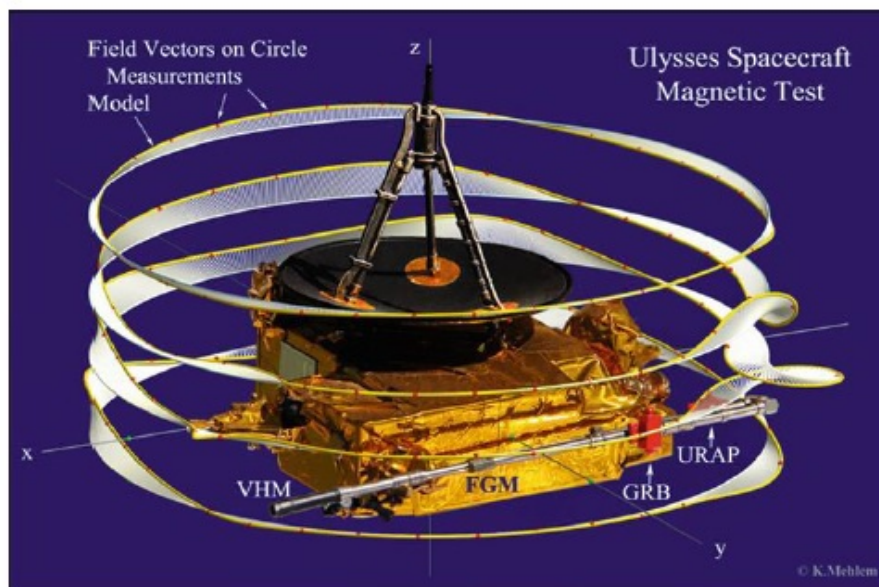
Οι απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας των περισσότερων διαστημικών αποστολών είναι συνήθως χαμηλότερες από την ακρίβεια αυτών των εγκαταστάσεων. Ωστόσο, οι μαγνητικές μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε αυτές είναι κρίσιμες για την εκτίμηση ενός συνόλου ισοδύναμων μαγνητικών διπόλων που παράγουν σε κάποια απόσταση το ίδιο μαγνητικό πεδίο με το διαστημικό σκάφος. Αυτά τα ισοδύναμα μαγνητικά δίπολα στη συνέχεια επιτρέπουν την πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου στην πραγματική θέση των μαγνητομέτρων επάνω

στον βραχίονα. Στη συνέχεια, αυτή η εκτίμηση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να συγκριθεί με τις απαιτήσεις της μαγνητικής καθαρότητας.

Τα ισοδύναμα μαγνητικά δίπολα λαμβάνονται με τοποθέτηση ολόκληρου του διαστημικού σκάφους στο κέντρο της εγκατάστασης και επομένως κατά το μέγιστο βαθμό εντός της περιοχής μηδενικού μαγνητικού πεδίου. Ενώ το διαστημικό σκάφος περιστρέφεται στη συνέχεια 360° γύρω από έναν άξονα, τα μαγνητόμετρα της εγκατάστασης τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη καταγράφουν το μαγνητικό πεδίο σε μια ορισμένη απόσταση. Αυτή η απόσταση πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά βάσει του αναμενόμενου επιπέδου του πεδίου και των διαστάσεων του διαστημικού οχήματος. Ένας ισορροπημένος συμβιβασμός μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης απόστασης των σημείων μέτρησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη αφ' ενός την εξασφάλιση των συνθηκών μακρινού πεδίου (3-5 φορές τη μεγαλύτερη διάσταση του διαστημοπλοίου) και αφ' ετέρου την εξασφάλιση υψηλού σηματοθορυβικού λόγου SNR. Ανάλογα με την ακρίβεια που απαιτείται, αυτή η περιστροφική μέτρηση μπορεί να επαναληφθεί και για τους τρεις άξονες.

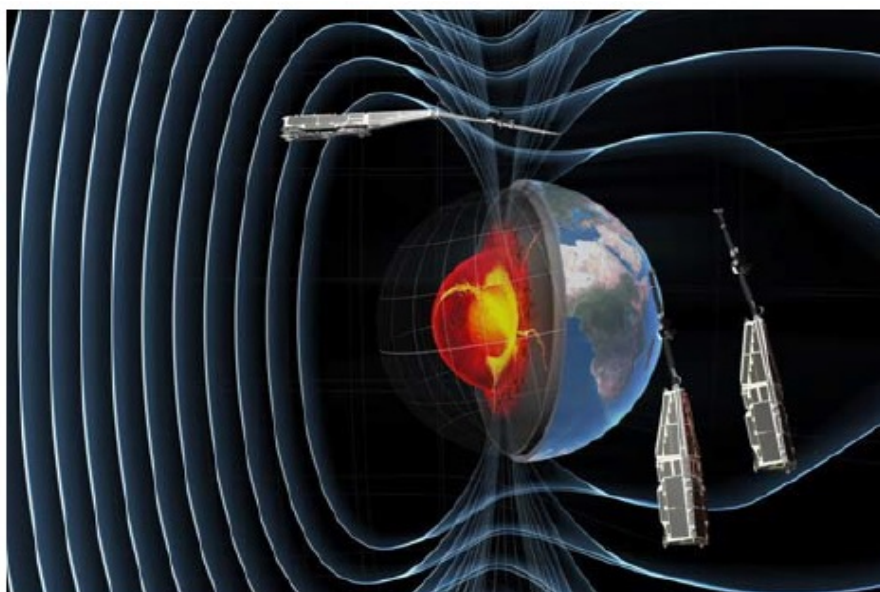
Το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο κατά τη διάρκεια τέτοιων περιστροφικών μετρήσεων τροφοδοτείται, στη συνέχεια, σε έναν αλγόριθμο για τη μοντελοποίησή του, δηλαδή την εκτίμηση της θέσης και της μαγνητικής ροπής ενός αριθμού ισοδύναμων μαγνητικών διπόλων. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από αυτά τα δίπολα ουσιαστικά προσομοιώνει το μαγνητικό πεδίο του διαστημικού σκάφους στην απόσταση μέτρησης [18]. Ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου και του πεδίου που παράγεται από τα ισοδύναμα δίπολα εξαρτάται από τον αριθμό των μαγνητικών διπόλων και την ικανότητα να τοποθετούνται τα μαγνητόμετρα της εγκατάστασης στο μακρινό πεδίο. Κατά συνέπεια, συνήθως ένα σφάλμα της τάξης του 10% στη συμφωνία μεταξύ των δύο πεδίων είναι ανεκτό. Τα ισοδύναμα μαγνητικά δίπολα που προκύπτουν επιτρέπουν την πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου σε οποιαδήποτε απόσταση μεγαλύτερη από την απόσταση μέτρησης. Συνεπώς, αυτή η πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου μπορεί να συγκριθεί με τις απαιτήσεις της μαγνητικής καθαρότητας στη θέση του ευαίσθητου ωφέλιμου φορτίου. Αυτή η προσέγγιση έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές διαστημικές αποστολές, π.χ. Ulysses, Giotto, Cluster, Rosetta, κ.ά (Σχήμα 1.12).

Ωστόσο, ανάλογα με το λόγο της απόστασης των μαγνητομέτρων πάνω στο βραχίονα προς την απόσταση που τοποθετούνται τα μαγνητόμετρα κατά τη διάρκεια της μέτρησης, οποιαδήποτε διαφωνία μεταξύ του μαγνητικού πεδίου διαστημικού σκάφους και του πεδίου που παράγεται από τα ισοδύναμα δίπολα θεωρείται αβεβαιότητα ως προς το εκτιμώμενο μαγνητικό πεδίο. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθούν τα ισοδύναμα μαγνητικά δίπολα από τις μετρήσεις σε επίπεδο μονάδας για την πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου σε επίπεδο συστήματος. Η προσέγγιση αυτή βέβαια απαιτεί τη σύνθεση και την επαλήθευση όλων των μοντέλων σε επίπεδο μονάδας με αποτελέσματα σε επίπεδο συστήματος από μια



ΣΧΗΜΑ 1.12: Μαγνητικές μετρήσεις και μοντελοποίηση για το διαστημικό σκάφος Ulysses.

μεγάλη μαγνητική εγκατάσταση. Η κύρια διαφορά παρ' όλα αυτά είναι ότι αυτή η επαλήθευση ενδέχεται να εκτελείται στο μακρινό πεδίο της εκάστοτε μονάδας, δηλαδή πιθανώς στο κοντινό πεδίο του διαστημικού οχήματος.



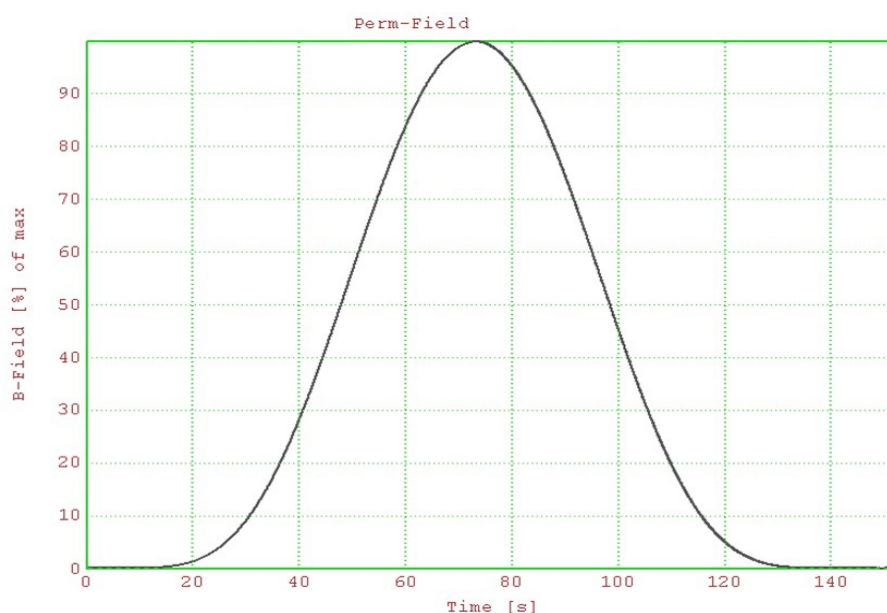
ΣΧΗΜΑ 1.13: Μια καλλιτεχνική απεικόνιση της αποστολής SWARM της ESA που δείχνει τους τρεις δορυφόρους να μετρούν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το εσωτερικό της Γης.

Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για διαστημικά σκάφη, όπου δεν υπάρχει επαρκής σηματοθυρβικός λόγος SNR στο μακρινό πεδίο, όπως για παράδειγμα στην αποστολή

SWARM (Σχήμα 1.13).

1.2.3 Μαγνήτιση και Απομαγνήτιση

Οι εγκαταστάσεις MCF ή οι υπάρχουσες μεγαλύτερες μαγνητικές εγκαταστάσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ελεγχθεί η μαγνητική σταθερότητα μιας συσκευής, δηλαδή η δυνατότητα και η ευαισθησία του να μαγνητίζεται. Το μέγιστο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι συνήθως της τάξης των 300 μT , καθώς τιμές μεγαλύτερες από αυτό το επίπεδο σπάνια υπερβαίνονται σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος. Το προφίλ του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται από αυτές τις εγκαταστάσεις φαίνεται στο Σχήμα 1.14. Τα διαθέσιμα επίπεδα μαγνητικών πεδίων μαγνήτισης είναι 100 μT , 200 μT , 300 μT και η διάρκεια είναι 2 min.

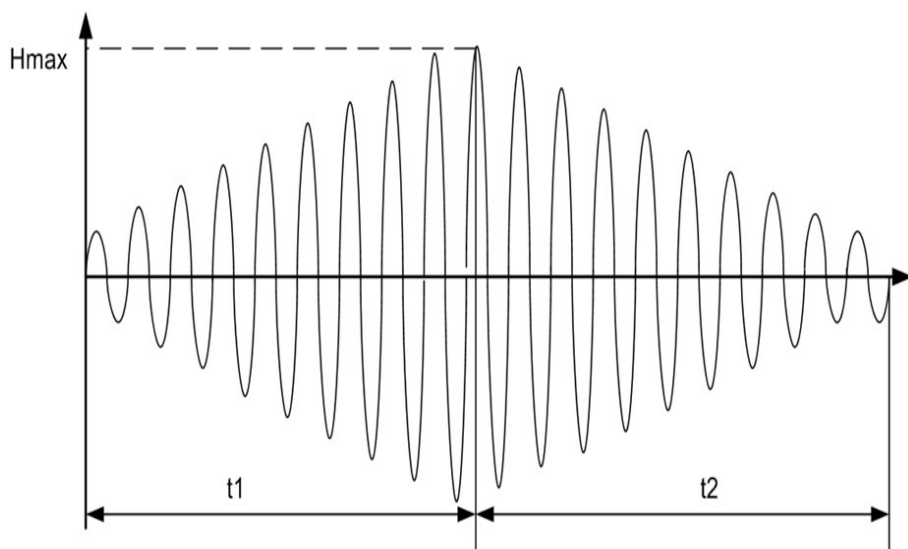


ΣΧΗΜΑ 1.14: Προφίλ εξωτερικού πεδίου για έλεγχο μαγνήτισης.

Ο σκοπός του λείου ημιτονοειδούς προφίλ είναι να αποφευχθεί η έκθεση της συσκευής σε απότομες αλλαγές πεδίου (π.χ. βηματικής συνάρτησης), μετά την οποία κάθε προσπάθεια απομαγνήτισής του θα είναι ανεπιτυχής. Το προφίλ του αργά μεταβαλλόμενου AC μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται για την απομαγνητοποίηση της συσκευής φαίνεται στο Σχήμα 1.15.

Τυπικές παράμετροι για το πεδίο απομαγνήτισης είναι:

- Διάρκεια $t_1 \geq 200$ s (~ 4 min με το MCF στις εγκαταστάσεις της ESA.)
- Διάρκεια $t_2 \geq 400$ s (~ 7 min με το MCF στις εγκαταστάσεις της ESA.)



ΣΧΗΜΑ 1.15: Προφίλ εξωτερικού πεδίου για απομαγνήτιση διαστημικού εξοπλισμού.

- Εξωτερικό μαγνητικό πεδίο $H_{max} = 3980$ A/m, δηλαδή περίπου 5 mT στον αέρα.
- Συχνότητα του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου από 3 έως 4 Hz.
- Αύξηση του πεδίου: 2% ανά κύκλο.
- Μείωση του πεδίου: 1% ανά κύκλο.

Η επιλογή της συχνότητας λαμβάνει υπ' όψιν τις εξής παραμέτρους:

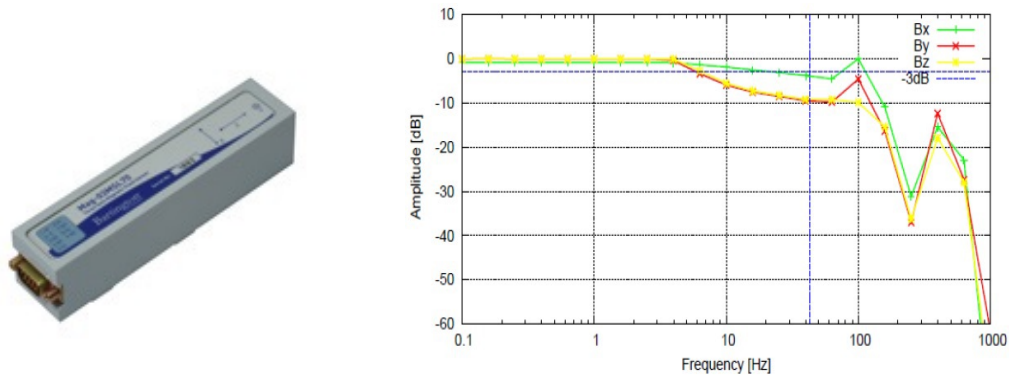
- Αποφυγή επαγόμενων ρευμάτων (δινορεύματα).
- Προοδευτική και όχι απότομη αύξηση και μείωση του πεδίου απομαγνήτισης.
- Συνολικός χρόνος της διαδικασίας.

Οι μονάδες που περιλαμβάνουν μια σημαντική ποσότητα μαλακών μαγνητικών υλικών, όπως για παράδειγμα οι μπαταρίες, μπορούν συνεπώς να έχουν μια δραματική μείωση στην μαγνητική ροπή μετά από τη διαδικασία απομαγνήτισης.

1.2.4 Μετρήσεις στατικών και αργά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων

Οι αισθητήρες για ακριβείς μετρήσεις στατικού DC ή πολύ χαμηλής συχνότητας μαγνητικού πεδίου είναι αισθητήρες ροής (Fluxgate Magnetometers) και η απόκρισή τους συναρτῆσει

της συχνότητας επιτρέπει τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων μερικών εκατοντάδων Hz - Σχήμα 1.16 [33].

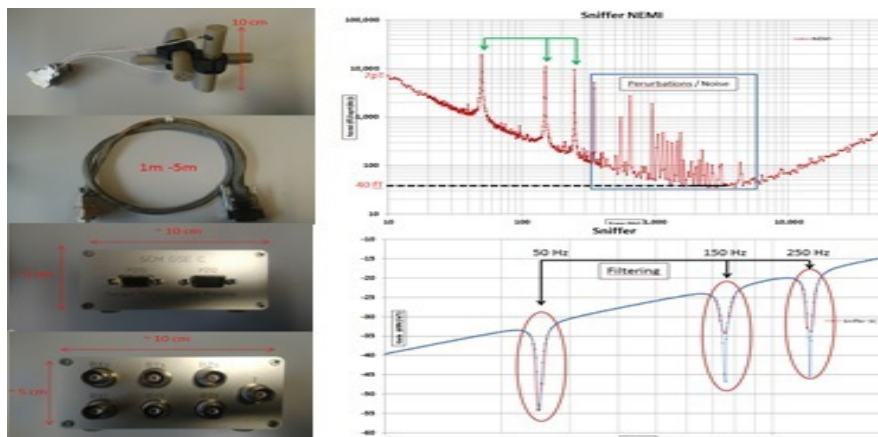


ΣΧΗΜΑ 1.16: Αισθητήρας ροής που μετράει τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (Tri-axial Fluxgate Magnetometer) και η ευαισθησία του συναρτήσει της συχνότητας.

Ορισμένες διαστημικές αποστολές ωστόσο διαθέτουν αυστηρές απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας όχι μόνο για σταθερό μαγνητικό πεδίο (DC) αλλά και για αργά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία, η συχνότητα των οποίων μπορεί να κυμαίνεται από 1 mHz έως μερικές δεκάδες kHz [32]. Οι αισθητήρες για ακριβείς μετρήσεις μαγνητικού πεδίου σε αυτό το εύρος συχνοτήτων είναι πηνία αναζήτησης μαγνητικού πεδίου (Search Coil Magnetometers) - Σχήμα 1.17. Τα πηνία αναζήτησης είναι μαγνητόμετρα επαγωγής, επομένως δεν μπορούν να μετρήσουν στατικά μαγνητικά πεδία, αλλά ορισμένα έχουν σχεδιαστεί για να έχουν επίπεδη απόκριση έως και τα 100 mHz. Επιπροσθέτως, τα πηνία αναζήτησης είναι εξαιρετικά ευαίσθητα: επίπεδα θορύβου που επιτυγχάνονται είναι της τάξης του 1 pT στα 100 Hz, ωστόσο ο θόρυβος αυξάνεται σημαντικά προς τις χαμηλότερες συχνότητες [2].

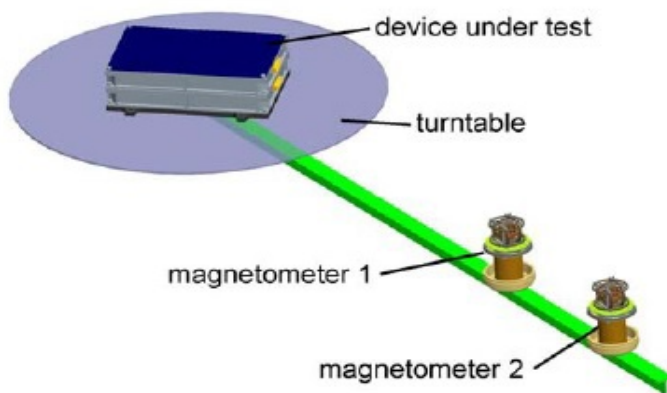
Οι αισθητήρες ροής (Fluxgate Magnetometers) και τα πηνία αναζήτησης μαγνητικού πεδίου (Search Coil Magnetometers) που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής μιας συσκευής στη Γη, είναι συνήθως τα ίδια όργανα που φέρουν τα διαστημικά σκάφη και χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των πλανητικών μαγνητικών πεδίων στο διάστημα καθώς και των κυμάτων πλάσματος.

Στην πράξη, ανεξάρτητα από την τεχνολογία μαγνητομέτρου που χρησιμοποιείται, ο θόρυβος εξαρτάται από το σύστημα λήψης δεδομένων (Data Acquisition System - DAQ), το οποίο μπορεί να είναι ένας μετατροπέας αναλογικού - ψηφιακού σήματος (Analog to Digital Converter - ADC), μια καταγραφή της χρονοσειράς ή ένας αναλυτής φάσματος (FFT Analyser). Επίσης, σε κάθε μέτρηση υπάρχει ο θόρυβος περιβάλλοντος: διακυμάνσεις στον γεωμαγνητικό θόρυβο και στο ρεύμα των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας επικρατούν στις χαμηλές συχνότητες και βιομηχανικός θόρυβος παράγει μαγνητικές διαταραχές σε αρμονικές των 50 Hz στις υψηλότερες συχνότητες. Εάν η απαιτούμενη ευαισθησία μέτρησης είναι χαμηλότερη από το επίπεδο θορύβου του περιβάλλοντος, λύσεις όπως η λειτουργία σε



ΣΧΗΜΑ 1.17: Αισθητήρας αναζήτησης των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου (Tri-axial Search Coil Magnetometer) και η ευαισθησία του συναρτήσει της συχνότητας.

μαγνητικά θωρακισμένο δωμάτιο ή η χρήση μαγνητικών βαθμίδων για απόρριψη του ομοιογενούς πεδίου του περιβάλλοντος συνήθως εφαρμόζονται. Η τελευταία πρακτική ονομάζεται και τεχνική των δύο μαγνητομέτρων και φαίνεται στο Σχήμα 1.18.



ΣΧΗΜΑ 1.18: Τεχνική των δύο μαγνητομέτρων για απόρριψη του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος.

Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και ουσιαστικά μετρούν τη βάρθρωση (gradient) του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής, απορρίπτοντας ταυτόχρονα τον θόρυβο του περιβάλλοντος καθώς οι χρονικές διακυμάνσεις του γεωμαγνητικού θορύβου και των γραμμών μεταφοράς είναι ομοιόμορφες στα σημεία που τοποθετούνται τα δύο μαγνητόμετρα [16]. Συχνά τα δύο μαγνητόμετρα αντικαθίστανται από ένα γραντιόμετρο (gradiometer) το οποίο μετράει απ' ευθείας τον ταυστή της βάρθρωσης του μαγνητικού πεδίου καθώς και τη μείωσή του σε σχέση με την απόσταση παρατήρησης.

1.3 Μοντελοποίηση με Πολλαπλά Μαγνητικά Δίπολα

Διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για το πρόβλημα του προσδιορισμού μαγνητικά καθαρών σημείων [14, 34, 40]. Η πλέον καθιερωμένη μέθοδος για τα σταθερά DC μαγνητικά πεδία περιλαμβάνει τη δημιουργία πολλαπλών μαγνητικών διπολικών μοντέλων (MDM) που προσομοιώνουν το μαγνητικό πεδίο μιας συσκευής υπό εξέταση [29]. Οι παράμετροι του μοντέλου (διανύσματα θέσης και ροπής του κάθε μαγνητικού διπόλου) μπορούν να εκτιμηθούν με ακρίβεια από μετρήσεις της μαγνητικής υπογραφής της συσκευής υπό εξέταση, εφαρμόζοντας είτε ντετερμινιστικές [46] ή στοχαστικές μεθόδους [7, 8]. Το προκύπτον μοντέλο μπορεί συνεπώς να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή αναπαράσταση της μαγνητικής συμπεριφοράς της συσκευής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνική πολλαπλών μαγνητικών διπολικών μοντέλων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η ανάλυση πεδίου κοντά σε συστοιχίες κεραιών [31], η πρόβλεψη ακτινοβολούμενων εκπομπών από ολοκληρωμένα κυκλώματα [36] και οι προσομοιώσεις ηλεκτροκαρδιογραφημάτων [1].

Συνεπώς, έχει γίνει συνήθης πρακτική η εκτέλεση μετρήσεων κοντινού μαγνητικού πεδίου, προκειμένου να καταγραφεί η συμπεριφορά μεμονωμένων μονάδων και να χαρακτηριστούν μαγνητικά. Έπειτα, ένα μοντέλο πολλαπλών μαγνητικών διπόλων προσαρμόζεται στα μετρούμενα δεδομένα της μαγνητικής υπογραφής, που στόχο έχει να παράγει το ίδιο μαγνητικό πεδίο με την αρχική μονάδα του εκάστοτε εξοπλισμού και άρα να τον αντιπροσωπεύει [30]. Τα προγράμματα μαγνητικής καθαρότητας παρελθόντων και παρόντων αποστολών για όλα τα διαστημικά οχήματα με μονάδες ή όργανα ευαίσθητα σε μαγνητικά πεδία βασίζονται εκτεταμένα στη Μοντελοποίηση Πολλαπλών Διπόλων σε επίπεδο μονάδας χρησιμοποιώντας τις εγκαταστάσεις MCF. Ωστόσο, οι μαγνητικές μετρήσεις αυτών των εγκαταστάσεων υπόκεινται σε σημαντικές περιβαλλοντικές διακυμάνσεις που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της περιστροφής της συσκευής και ενδέχεται να απαιτηθούν πολλές επαναλήψεις της μέτρησης.

Αφού μετρηθούν και χαρακτηριστούν οι μονάδες και οι συσκευές που είναι τοποθετημένες στο διαστημικό σκάφος, μπορούν να διεξαχθούν σχεδιασμοί προσομοίωσης σε σχέση με την τοποθέτηση του εξοπλισμού και των ευαίσθητων οργάνων μέτρησης σε επίπεδο συστήματος χρησιμοποιώντας τα μεμονωμένα μοντέλα μαγνητικού διπόλου κάθε μονάδας, με αποτέλεσμα τον μαγνητικό προϋπολογισμό της διαστημικής αποστολής. Επομένως, η ακρίβεια των εκτιμώμενων μοντέλων, καθώς και οι κατάλληλες τεχνικές πρόβλεψης της μαγνητικής υπογραφής σε διαφορετικές αποστάσεις από τα σημεία μέτρησης, θα επιτρέψουν την ακριβή εκτίμηση του συνολικού μαγνητικού πεδίου στη θέση του ευαίσθητου εξοπλισμού και την ελαχιστοποίησή του.

1.4 Μαγνητικός προϋπολογισμός σε επίπεδο συστήματος

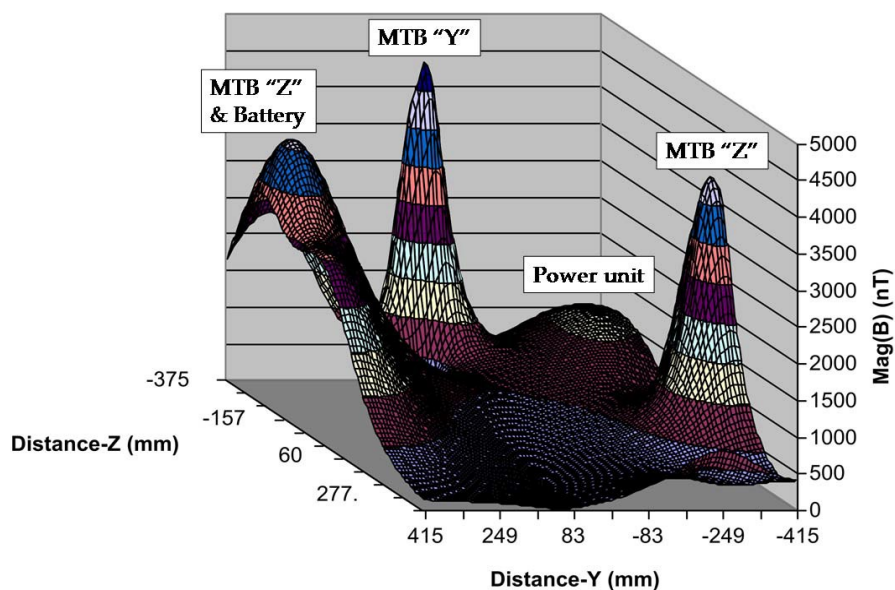
Αρκετά από τα πρόσφατα και μελλοντικά διαστημικά προγράμματα χρειάζονται όχι μόνο μαγνητική καθαρότητα σχεδόν σταθερού μαγνητικού πεδίου αλλά έχουν ακόμη πιο υψηλές απαιτήσεις σε αργά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία. Επιπλέον, οι απαιτήσεις συμπεριλαμβάνουν όρια και για τη μαγνητική δύναμη σε αποστολές που χρησιμοποιούν αδρανειακούς αισθητήρες και περιλαμβάνουν μάζες δοκιμής, όπως οι LISA και Lisa Pathfinder, χωρίς όμως να περιορίζονται σε αυτές. Συγκεκριμένα, η διαστημική αποστολή LISA σκοπεύει να ανιχνεύσει τα κύματα βαρύτητας μετρώντας την μεταβολή του μήκους της οπτικής διαδρομής μεταξύ των μάζων δοκιμής. Οι απαιτήσεις της μαγνητικής καθαρότητας σε αυτές τις αποστολές περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση της συνεισφοράς των μαγνητικών δυνάμεων στις ευαίσθητες αυτές μάζες καθώς ενδέχεται να προκαλέσουν “θόρυβο” στην κίνησή τους [10]. Συνεπώς, ο μαγνητικός προϋπολογισμός σε επίπεδο συστήματος είναι μια κρίσιμη πτυχή σε όλα τα διαστημικά προγράμματα και οι στόχοι του είναι συνήθως:

- Ο υπολογισμός της συνολικής μαγνητικής ροπής του οχήματος και η προκύπτουσα παρασιτική ροπή δυνάμει περιστροφής στο μαγνητικό πεδίο της Γης.
- Ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου στη θέση των μαγνητομέτρων που ελέγχουν αυτόματα τη σταθεροποίηση και τον προσανατολισμό των Δορυφόρων Χαμηλής περί τη Γη Τροχιάς (Low Earth Orbit - LEO).
- Ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου στη θέση κάθε εξοπλισμού ευαίσθητου σε σταθερό μαγνητικό πεδίο, ως συνέπεια πολλών ατελειών στα χαρακτηριστικά σχεδιασμού του σκάφους.
- Ο υπολογισμός του παρασιτικού μαγνητικού πεδίου από το διαστημικό σκάφος στη θέση των ευαίσθητων ωφέλιμων φορτίων, συνήθως στα μαγνητόμετρα μέτρησης του διαστημικού οχήματος, καθώς επίσης και σε επιστημονικά πειράματα που απαιτούν υψηλή καθαρότητα στη γεωδαιτική κίνηση των μαζών δοκιμής (π.χ. LISA). Αυτή η περίπτωση είναι συνήθως η πιο απαιτητική όσον αφορά την ακρίβεια των μετρήσεων.

Ο μαγνητικός προϋπολογισμός αποσκοπεί στον έλεγχο της συμμόρφωσης ολόκληρου του διαστημικού οχήματος με τις απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας, όπως για παράδειγμα το υπολειμματικό πεδίο στη θέση των μαγνητομέτρων. Συνεπάγεται λοιπόν το συνδυασμό της μαγνητικής συνεισφοράς των μονάδων εξοπλισμού για τις οποίες έχουν καθοριστεί απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας, οι οποίες είναι συνήθως απαιτήσεις μαγνητικής ροπής εκφρασμένες σε Am^2 . Ένας προκαταρκτικός μαγνητικός προϋπολογισμός μπορεί να ρυθμίσει την κατανομή των απαιτήσεων μαγνητικής ροπής στις διάφορες μονάδες εξοπλισμού.

Αυτή η κατανομή λαμβάνει υπ' όψιν την απόσταση της αντίστοιχης συσκευής από τη θέση του ευαίσθητου μαγνητομέτρου σύμφωνα με έναν αρχικό σχεδιασμό του διαστημοπλοίου αλλά και γνωστούς τεχνολογικούς περιορισμούς που ενδέχεται να βάλουν όριο στο επίπεδο μαγνητικής καθαρότητας που μπορεί να επιτευχθεί από ορισμένες μονάδες εξοπλισμού. Εάν τα όρια μαγνητικής καθαρότητας σε επίπεδο συστήματος που πρέπει να εξασφαλιστούν δεν είναι απαιτητικά, ο μαγνητικός προϋπολογισμός μπορεί να βασιστεί σε αναλύσεις επιπέδου μονάδας, ουσιαστικά εκτιμώντας μόνο τη χειρότερη περίπτωση μέγιστης μαγνητικής εκπομπής.

Σε διαστημικές αποστολές με απαιτητικά όρια μαγνητικής καθαρότητας, ο μαγνητικός προϋπολογισμός βασίζεται στα αποτελέσματα και τα προκύπτοντα μαγνητικά μοντέλα σε επίπεδο μονάδας, όπως τα μοντέλα πολλαπλών διπόλων. Με βάση τα μαγνητικά μοντέλα και τον χαρακτηρισμό που προκύπτουν από τις μετρήσεις και τις προβλέψεις για μονάδες όπως η ηλιακή συστοιχία, το μαγνητικό πεδίο στα σημεία των προδιαγραφών μπορεί να εκτιμηθεί με έναν απλό υπολογισμό.



ΣΧΗΜΑ 1.19: Προσομοίωση μαγνητικού προϋπολογισμού σε επίπεδο συστήματος που περιλαμβάνει μαγνητοκινητήρες.

Ωστόσο, στις περιπτώσεις των Δορυφόρων Χαμηλής περί τη Γη Τροχιάς (LEO) που το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο της Γης εξαρτάται από τη δορυφορική τροχιακή θέση και ως εκ τούτου πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι επαγόμενες μαγνητικές ροπές, ο μαγνητικός προϋπολογισμός είναι πολύ πιο περίπλοκη διαδικασία. Πολυπλοκότητα μπορεί επίσης να προκύψει από το αν πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν διάφορες άλλες παράμετροι των συστημάτων των διαστημικών σκαφών. Οι δορυφόροι LEO για παράδειγμα, που χρησιμοποιούν μαγνητοκινητήρες (Magneto-Torquer Bars) για τον προσανατολισμό τους και για αυτόματη σταθεροποίησή τους (Attitude Control System - ACS) είναι μια ειδική περίπτωση, καθώς το

πεδίο από τους μαγνητοκινητήρες στη θέση των διαφόρων ηλεκτρονικών μονάδων μπορεί να είναι ισχυρό (αρκετά mT), καθώς και όταν είναι απενεργοποιημένοι μπορούν να χαρακτηριστούν με μια μεγάλη υπολειμματική μαγνητική ροπή που συμβάλλει στη λάθος ανάγνωση της μέτρησης των μαγνητομέτρων. Το Σχήμα 1.19 δείχνει μια προσομοίωση της κατανομής του σταθερού μαγνητικού πεδίου ενός δορυφόρου μέσα στο χώρο του οχήματος και γύρω από αυτό, απεικονίζοντας την κυρίαρχη μαγνητική συνεισφορά των μαγνητοκινητήρων.

1.5 Ερευνητικά θέματα στην παρούσα διδακτορική διατριβή

Στο πρώτο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, προσδιορίζονται και διερευνώνται ειδικά θέματα στη μέθοδο Μοντελοποίησης Μαγνητικών Διπόλων για μετρήσεις DC μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα, διεξάγεται η μελέτη διαφόρων δυνατών διατάξεων μέτρησης πολλαπλών μαγνητομέτρων για τη λήψη ενός στιγμιότυπου της μαγνητικής υπογραφής μιας συσκευής υπό εξέταση. Η ανάλυση περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση του αριθμού των μαγνητομέτρων, καθώς και τις θέσεις αυτών των αισθητήρων γύρω από τη συσκευή προκειμένου να αυξηθεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων και να εξαλειφθεί η αβεβαιότητα των περιβαλλοντικών μεταβολών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την ακρίβεια των μαγνητικών μετρήσεων καθώς και των εκτιμώμενων διπολικών μοντέλων. Η κατασκευή μιας πρωτοτύπης Εγκατάστασης Πολλαπλών Μαγνητόμετρων (Multi Magnetometer Facility) αποτελούμενης από 12 μαγνητόμετρα τύπου Fluxgate η οποία βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της ESA-ESTEC, βασίζεται στην παραπάνω ανάλυση.

Στα πλαίσια της ανάλυσης αυτής, η περιστροφή αντικαθίσταται πλήρως από αυξημένο αριθμό σταθερών μαγνητομέτρων, γεγονός που μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο της δοκιμής και την εμπειρογνωμοσύνη του χειριστή. Η τρέχουσα εργασία καθοδηγείται από την ανάγκη ακριβέστερης μέτρησης και δοκιμής εξοπλισμού και μονάδων διαστημικών σκαφών για την καλύτερη εκτίμηση του υπολειμματικού μαγνητικού πεδίου του διαστημικού σκάφους, χρησιμοποιώντας τεχνικές μοντελοποίησης με πολλαπλά μαγνητικά δίπολα. Ο στόχος της ανάλυσης αυτής είναι η παραγωγή ισοδύναμων μαγνητικών μοντέλων για όλα τα υποσυστήματα του διαστημικού οχήματος και η εκτίμηση των κατανομημένων μαγνητικών διπόλων και τετραπόλων που αντιπροσωπεύουν το μακρινό μαγνητικό τους πεδίο. Για το σκοπό αυτό, μελετώνται και αναπτύσσονται μέθοδοι για την πρόβλεψη πολλαπλών μαγνητικών διπόλων από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής. Τέλος, οι μέθοδοι επαληθεύονται και επιβεβαιώνονται με πραγματικές μετρήσεις από πηγές με γνωστή μαγνητική συμπεριφορά και συγκεκριμένα μαγνητικά δίπολα και τετράπολα.

Αφού μετρηθούν και χαρακτηριστούν οι μονάδες που είναι τοποθετημένες στο διαστημικό σκάφος, μπορούν να διεξαχθούν προσομοιώσεις σχεδιασμού για την τοποθέτηση του

εξοπλισμού σε σχέση με τα όργανα μέτρησης σε επίπεδο συστήματος χρησιμοποιώντας τα μεμονωμένα μοντέλα μαγνητικού διπόλου κάθε μονάδας. Επομένως, η ακρίβεια των εκτιμώμενων μοντέλων, καθώς και οι κατάλληλες τεχνικές πρόβλεψης του μαγνητικού πεδίου σε διάφορες αποστάσεις, θα επιτρέψουν την ακριβή εκτίμηση του συνολικού μαγνητικού πεδίου στη θέση του ευαίσθητου εξοπλισμού. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου μέρους της παρούσας διατριβής, αναπτύσσεται μια αποτελεσματική μέθοδος για την ακριβή πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς μιας συσκευής στο χώρο, αποτρέποντας την υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου στη θέση των μαγνητομέτρων και επιτρέποντας τον προσδιορισμό μαγνητικά καθαρών σημείων κοντά στο διαστημικό σκάφος, όπου ο ευαίσθητος εξοπλισμός μέτρησης μπορεί να τοποθετηθεί με ασφάλεια. Η τεχνική αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την ακριβή πρόβλεψη της μαγνητικής υπογραφής σύνθετων συσκευών που αποτελούνται από πολλές μαγνητικές πηγές.

Τέλος, παρόλο που η καθιερωμένη μέθοδος πολλαπλών μαγνητικών διπόλων χρησιμοποιείται κατά κόρον για μετρήσεις σταθερών DC μαγνητικών πεδίων από διαστημικό εξοπλισμό, δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη μέθοδος επαλήθευσης της μαγνητικής καθαρότητας αργά μεταβαλλόμενων AC πεδίων. Στο τελευταίο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, οι καθιερωμένες τεχνικές για τις μεθόδους επαλήθευσης μαγνητικής καθαρότητας στατικών πεδίων επεκτείνονται για να καλύψουν τις απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας για επαλήθευση AC μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας σε επίπεδο μονάδας και συστήματος. Η προτεινόμενη προσέγγιση χρησιμοποιεί στοχαστικές μεθόδους για τον εντοπισμό ενός μικρού αριθμού μαγνητικών διπόλων (τυπικά όχι περισσότερα από δύο) τα οποία μπορούν να μιμηθούν με ακρίβεια το φάσμα του μετρηθέντος μαγνητικού πεδίου που ακτινοβολείται από μια συσκευή, με αποτέλεσμα μοντελοποίηση στο πεδίο της συχνότητας. Η μέθοδος συνεπάγεται τον προσδιορισμό των παραμέτρων (θέσης και μαγνητικής ροπής) των διπολικών πηγών που συνθέτουν μια συσκευή στην περιοχή συχνοτικού ενδιαφέροντος, με στόχο την αναπαραγωγή του φάσματος του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου.

Κεφάλαιο 2

Βασικές αρχές ηλεκτρομαγνητισμού

2.1 Εισαγωγή

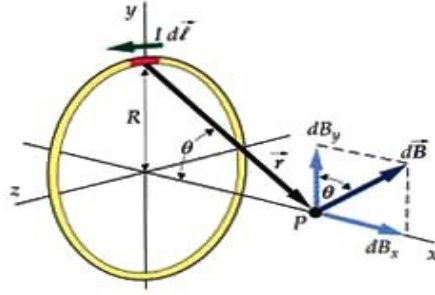
Στο παρόν κεφάλαιο, βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού περιγράφονται εκτενώς. Συγκεκριμένα, η θεωρητική ανάλυση περιλαμβάνει τους φυσικούς νόμους που διέπουν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που προκαλούνται από πηγές ρευμάτων και φορτίων, καθώς και τους περιορισμούς αυτών στην προσέγγιση πολλαπλών διπόλων. Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων στοιχειωδών προβλημάτων μαγνητισμού. Ως πηγές μαγνητικού πεδίου θεωρούνται βρόχοι τροφοδοτούμενοι από ρεύμα και οι παράμετροι που επηρεάζουν τη μαγνητική τους συμπεριφορά διερευνώνται και περιγράφονται.

2.2 Νόμος Biot-Savart

Προκειμένου να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο ενός πεπερασμένου στοιχείου ρεύματος μήκους $d\mathbf{l}$ που φέρει σταθερό ρεύμα I , μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο νόμος Biot-Savart:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^3} \quad (2.1)$$

όπου $\mathbf{R} = \mathbf{x} - \mathbf{x}'$ είναι το διάνυσμα απόστασης μεταξύ των σημείων \mathbf{x}' (σημείο πηγής) και \mathbf{x} (σημείο παρατήρησης) και το ολοκλήρωμα υπολογίζεται στη διαδρομή C στην οποία ρέει το ηλεκτρικό ρεύμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.



ΣΧΗΜΑ 2.1: Απεικόνιση του νόμου Biot-Savart.

2.3 Χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία

Το χρονικό μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ που οφείλεται σε μία εναλλασσόμενη πηγή ρεύματος AC μπορεί να υπολογιστεί με δύο ταυτόσημους τρόπους, είτε μέσω της εξίσωσης κύματος για το διάνυσμα μαγνητικού δυναμικού \mathbf{A} , είτε μέσω της εξίσωσης κύματος για το ίδιο το πεδίο \mathbf{B} [15].

2.3.1 Διάνυσμα μαγνητικού δυναμικού

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Maxwell μπορούμε να βρούμε τις εξισώσεις των κυμάτων για το ηλεκτρικό δυναμικό Φ και για το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό \mathbf{A} :

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (2.3)$$

Οι λύσεις στις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να βρεθούν χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις Green για την εξίσωση κύματος. Συγκεκριμένα, ας υποθέσουμε ότι έχουμε πυκνότητα ρεύματος $\mathbf{J}(\mathbf{x}', t')$ (πηγή) τοποθετημένη στο σημείο $\mathbf{x}' = (x', y', z')$ σε χρόνο t' . Το διάνυσμα μαγνητικού δυναμικού σε κάποιο σημείο παρατήρησης $\mathbf{x} = (x, y, z)$ στο χρόνο t μπορεί να εκφραστεί:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{1}{R} \mathbf{J}(\mathbf{x}', t') d^3 x' \quad (2.4)$$

όπου $R = |\mathbf{R}| = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$ είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της πηγής και $t' = t - R/c = t - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/c$ που εκφράζει τον χρόνο που χρειάζεται το κύμα να διαδοθεί από το \mathbf{x}' (σημείο πηγής) στο \mathbf{x} (σημείο παρατήρησης) και ονομάζεται καθυστερημένος χρόνος. Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί από το στροβιλισμό του μαγνητικού δυναμικού:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.5)$$

2.3.2 Λύση για το μαγνητικό πεδίο

Ένας παρόμοιος τρόπος για να βρούμε μια έκφραση για το χρονικό μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο είναι να μετασχηματίσουμε κατευθείαν τις εξισώσεις Maxwell για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Λαμβάνοντας τον στροβιλισμό του νόμου του Ampere έχουμε:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0(\nabla \times \mathbf{J}) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{E}) \quad (2.6)$$

Χρησιμοποιώντας το νόμο του Faraday και το νόμο του Gauss για το μαγνητισμό, η παραπάνω έκφραση καταλήγει στην εξίσωση κύματος για το μαγνητικό πεδίο:

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = -\mu_0(\nabla \times \mathbf{J}) \quad (2.7)$$

Η λύση ξανά μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις Green για την κυματική εξίσωση:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \left[\frac{1}{R^2} \mathbf{J}(\mathbf{x}', t') + \frac{1}{cR} \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} \right] \times \hat{\mathbf{R}} d^3 x' \quad (2.8)$$

Ομοίως, το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να βρεθεί:

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \left[\frac{\hat{\mathbf{R}}}{R^2} \rho(\mathbf{x}', t') + \frac{\hat{\mathbf{R}}}{cR} \frac{\partial \rho(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} - \frac{1}{cR^2} \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} \right] d^3 x' \quad (2.9)$$

Όπως μπορούμε να δούμε από τις παραπάνω εξισώσεις (Jefimenko's equations), μια χρονικά μεταβαλλόμενη πυκνότητα ρεύματος $\mathbf{J}(\mathbf{x}', t')$ θα παράγει τόσο ηλεκτρικό όσο και μαγνητικό πεδία. Το γεγονός αυτό ισχύει και για την χρονική μεταβολή της πυκνότητας φορτίου $\rho(\mathbf{x}', t')$ μέσω της εξίσωσης συνέχειας:

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}', t') = -\frac{\partial \rho(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} \quad (2.10)$$

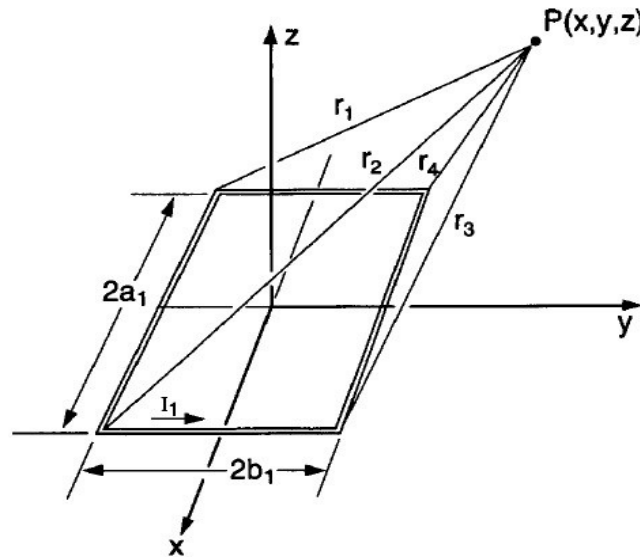
2.4 Τετραγωνικός βρόχος ρεύματος τοποθετημένος στην αρχή των αξόνων

Οι εξισώσεις (2.4) και (2.5) (ή εναλλακτικά η εξίσωση (2.8)) θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου από ορθογωνικό βρόχο ρεύματος που βρίσκεται στο επίπεδο xy γύρω από την αρχή των αξόνων με διαστάσεις $2a \times 2b$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2. Διαχωρίζοντας τον βρόχο σε 4 σύρματα, μπορούμε να δούμε ότι το ρεύμα ρέει μόνο στην x -διεύθυνση για τις διαδρομές ρεύματος 1,

3 και προς την κατεύθυνση y για τα σύρματα 2, 4. Υποθέτοντας ότι η διατομή του σύρματος είναι αμελητέα, μπορούμε να γράψουμε την πυκνότητα ρεύματος του σύρματος 1:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}', t') = \begin{cases} I_1(t')\delta(z')\delta(y'+b)\hat{\mathbf{x}}, & -a < x < a \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.11)$$

Στην παραπάνω εξίσωση θεωρείται επίσης ότι η χωρική και χρονική εξαρτήσεις της πυκνότητας ρεύματος μπορούν να διαχωριστούν, δεδομένου ότι το μήκος κύματος λ της χρονικά μεταβαλλόμενης πυκνότητας ρεύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις του βρόχου ή από οποιαδήποτε απόσταση ενδιαφέροντος/σημείο παρατήρησης $P(x, y, z)$. Για παράδειγμα, ένα εναλλασσόμενο πεδίο 1 MHz ($\lambda \approx 300\mu$), προσεγγίζεται καλά ως ημι-στατικό μερικά μέτρα μακριά από βρόχους συγκρίσιμων διαστάσεων.



ΣΧΗΜΑ 2.2: Ορθογωνικός βρόχος ρεύματος τοποθετημένος στο επίπεδο xy γύρω από την αρχή των αξόνων.

Το διάνυσμα απόστασης μεταξύ ενός αυθαίρετου σημείου παρατήρησης P και του πρώτου σύρματος μπορεί να εκφραστεί:

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{x} - \mathbf{x}' = (x - x')\hat{\mathbf{x}} + (y + b)\hat{\mathbf{y}} + z\hat{\mathbf{z}} \quad (2.12)$$

και $R_1 = |\mathbf{R}_1|$. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.4), το μαγνητικό δυναμικό σε καρτεσιανές συντεταγμένες μπορεί να εκφραστεί:

$$\mathbf{A}_{x1}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{1}{R_1} I_1(t')\delta(z')\delta(y'+b)d^3x' = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{I_1(t')}{R_1} dx' \Rightarrow$$

$$\mathbf{A}_{x1}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{I_1(t - R_1/c)}{\sqrt{(x - x')^2 + (y + b)^2 + z^2}} dx' \quad (2.13)$$

Ομοίως, λαμβάνοντας υπ' όψιν την κατεύθυνση του ρεύματος, οι συνεισφορές των άλλων 3 συρμάτων μπορούν να εκφραστούν:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{x3}(\mathbf{x}, t) &= -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_a^{-a} \frac{I_1(t - R_3/c)}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - b)^2 + z^2}} dx' \\ \mathbf{A}_{y2}(\mathbf{x}, t) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-b}^b \frac{I_1(t - R_2/c)}{\sqrt{(x - a)^2 + (y - y')^2 + z^2}} dy' \\ \mathbf{A}_{y4}(\mathbf{x}, t) &= -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_b^{-b} \frac{I_1(t - R_4/c)}{\sqrt{(x + a)^2 + (y - y')^2 + z^2}} dy' \end{aligned} \quad (2.14)$$

Για να επιλύσουμε αναλυτικά τα παραπάνω ολοκληρώματα, πρέπει να γνωρίζουμε τη χρονική συμπεριφορά του ρεύματος $I_1(t)$. Επιπλέον, μπορούμε να κάνουμε κάποιες απλουστεύσεις ανάλογα με τη θέση του σημείου παρατήρησης P . Αν d είναι η μέγιστη τυπική διάσταση του ορθογωνικού βρόχου, μπορούμε να ορίσουμε τρεις ξεχωριστές περιοχές:

- Την κοντινή (στατική) ζώνη: $d \ll r \ll \lambda$
- Την ενδιάμεση (επαγωγική) ζώνη: $d \ll r \sim \lambda$
- Τη μακρινή ζώνη ακτινοβολίας: $d \ll \lambda \ll r$

2.4.1 Η κοντινή (στατική) ζώνη

Στην κοντινή ζώνη είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι η απόσταση παρατήρησης θα είναι πολύ μικρή. Ως εκ τούτου, το ολοκλήρωμα για το πρώτο σύρμα τώρα γίνεται:

$$\mathbf{A}_{x1}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{1}{\sqrt{(x - x')^2 + (y + b)^2 + z^2}} dx' = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \ln \left(\frac{r_1 + a + x}{r_2 - a - x} \right) \quad (2.15)$$

Υπολογίζοντας όλα τα ολοκληρώματα και αθροίζοντας τη συμβολή όλων των συρμάτων (υπέρθωση) παίρνουμε τη λύση για το μαγνητικό δυναμικό:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_x(\mathbf{x}, t) &= -\frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \ln \left(\frac{r_1 + a + x}{r_2 - a - x} \cdot \frac{r_3 - a - x}{r_4 + a + x} \right) \\ \mathbf{A}_{y2}(\mathbf{x}, t) &= \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \ln \left(\frac{r_2 + b + y}{r_3 - b + y} \cdot \frac{r_4 - b - y}{r_1 + b + y} \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

όπου οι αποστάσεις r_1, r_2, r_3, r_4 από τις τέσσερις άκρες του τετραγωνικού βρόχου είναι:

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(a+x)^2 + (y+b)^2 + z^2} \\ r_2 &= \sqrt{(a-x)^2 + (y+b)^2 + z^2} \\ r_3 &= \sqrt{(a-x)^2 + (y-b)^2 + z^2} \\ r_4 &= \sqrt{(a+x)^2 + (y-b)^2 + z^2} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.5) μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου αναλυτικά:

$$\begin{aligned} B_x &= -\frac{\partial A_y}{\partial z} \\ B_y &= \frac{\partial A_x}{\partial z} \\ B_z &= \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Με την εκτέλεση των μερικών παραγώγων έχουμε την τελική λύση για το μαγνητικό πεδίο:

$$\begin{aligned} B_x(\mathbf{x}, t) &= \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \sum_{n=1}^4 \frac{(-1)^{n+1} z}{r_n [r_n + d_n]} \\ B_y(\mathbf{x}, t) &= \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \sum_{n=1}^4 \frac{(-1)^{n+1} z}{r_n [r_n + (-1)^{n+1} c_n]} \\ B_z(\mathbf{x}, t) &= \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \sum_{n=1}^4 \left[\frac{(-1)^n d_n}{r_n [r_n + (-1)^{n+1} c_n]} - \frac{c_n}{r_n [r_n + d_n]} \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

όπου

$$\begin{aligned} c_1 &= -c_4 = a + x & d_1 &= d_2 = y + b \\ c_2 &= -c_3 = a - x & d_3 &= d_4 = y - b \end{aligned} \quad (2.20)$$

Από την εξίσωση (2.19) είναι προφανές ότι η χρονική συμπεριφορά των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου θα ακολουθήσει τη χρονική συμπεριφορά του ρεύματος που διαρρέει το βρόχο. Επιπλέον, ο χαρακτήρας του μαγνητικού πεδίου είναι ημι-στατικός και η διακύμανσή του σε σχέση με την απόσταση παρατήρησης εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες και τη γεωμετρία της πηγής, στη συγκεκριμένη περίπτωση του ορθογωνικού βρόχου.

2.4.2 Η μακρινή ζώνη ακτινοβολίας

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να γίνουν κάποιες απλουστεύσεις όσον αφορά την πηγή (βρόχος ρεύματος ή οποιαδήποτε τοπική πηγή) που ισχύουν επίσης για την προηγούμενη ενότητα. Οι κατανομές πηγών που εξαρτώνται από το χρόνο μπορούν να εκφραστούν χρησιμοποιώντας ανάλυση Fourier. Αυτό επιτρέπει τη ξεχωριστή διαχείριση των διακριτών

συχνότητων. Ο μετασχηματισμός Fourier της πυκνότητας ρεύματος είναι:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, t) = \int \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{x}, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.21)$$

Χωρίς απώλεια της γενικότητας, μπορούμε να μελετήσουμε μόνο μία γωνιακή συχνότητα ω . Η αρχή υπέρθεσης μπορεί στη συνέχεια να εφαρμοστεί για τη γενίκευση των αποτελεσμάτων για πολλαπλές συχνότητες. Οι πηγές μπορούν να εκφραστούν:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\mathbf{x}, t) &= \mathbf{J}(\mathbf{x}) e^{-i\omega t} \\ \rho(\mathbf{x}, t) &= \rho(\mathbf{x}) e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Φυσικά, το πραγματικό μέρος αυτών των εκφράσεων πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν για να αποκτηθούν φυσικές ποσότητες. Το μαγνητικό δυναμικό από την εξίσωση (2.4) μπορεί τώρα να εκφραστεί:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{1}{R} \mathbf{J}(\mathbf{x}') e^{-i\omega(t-R/c)} d^3x' = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \int \frac{e^{ikR}}{R} \mathbf{J}(\mathbf{x}') d^3x' \quad (2.23)$$

όπου $k = \omega/c$ είναι ο κυματαριθμός και $R = |\mathbf{R}| = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$ ως συνήθως. Μπορούμε αμέσως να δούμε ότι στην κοντινή ζώνη, το $kr \ll 1$ και ο εκθετικός όρος μέσα στο ολοκλήρωμα μπορεί να αντικατασταθεί με τη μονάδα ($e^{ikR} \rightarrow 1$). Έτσι οδηγούμαστε στη λύση της προηγούμενης υποπαραγράφου, δηλαδή το κοντινό μαγνητικό πεδίο είναι ημι-στατικό και ταλαντώνεται αρμονικά στο χρόνο (με $e^{-i\omega t}$). Στο μακρινό πεδίο ($kr \gg 1$) μπορούμε να προσεγγίσουμε την απόσταση R :

$$|\mathbf{x} - \mathbf{x}'| = r - \mathbf{n} \cdot \mathbf{x}' \quad (2.24)$$

όπου \mathbf{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση του \mathbf{x} . Στην πραγματικότητα, αυτή η προσέγγιση ισχύει για $r \gg d$ και είναι επαρκής ακόμη και στην κοντινή ζώνη. Επιπλέον, το μέτρο της απόστασης R στον παρονομαστή του ολοκληρώματος της εξίσωσης (2.23) μπορεί να προσεγγιστεί με την απόσταση r και το μαγνητικό δυναμικό μπορεί να γραφτεί:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') e^{-k\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}'} d^3x' \quad (2.25)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι στη μακρινή ζώνη το μαγνητικό δυναμικό συμπεριφέρεται ως ένα εξερχόμενο σφαιρικό κύμα. Επιπροσθέτως, το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο που θα προκύψουν από αυτή την πηγή είναι εγκάρσια στο διάνυσμα απόστασης και ελαττώνονται με νόμο απόστασης r^{-1} . Εάν οι διαστάσεις πηγής είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με το

μήκος κύματος λ , μπορούμε να αναλύσουμε σε σειρά τις εκθετικές δυνάμεις του k :

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \sum_n \frac{(-ik)^n}{n!} \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') (\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}')^n d^3x' \quad (2.26)$$

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την πηγή στην μακρινή ζώνη θα προέρχεται κυρίως από τον πρώτο όρο της σειράς (το μαγνητικό δυναμικό γίνεται αμελητέο για μεγάλες τιμές του n). Έτσι, μπορούμε να εκφράσουμε το δυναμικό στη μακρινή ζώνη ενός τετραγωνικού ($a = b$) βρόχου σε σφαιρικές συντεταγμένες:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{(-ik)\mu_0 a^2 I_1 e^{-i\omega t}}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \sin\theta \hat{\phi} \quad (2.27)$$

και να συνεχίσουμε τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου μέσω της εξίσωσης (2.5).

2.4.3 Η ενδιάμεση (επαγωγική) ζώνη

Στην ενδιάμεση ζώνη, δεν μπορούμε να κάνουμε ούτε τις προσεγγίσεις της κοντινής ούτε της μακρινής ζώνης. Όλες οι δυνάμεις του kr πρέπει να διατηρηθούν. Χρησιμοποιώντας τις σφαιρικές συναρτήσεις Green και υποθέτοντας ότι οι διαστάσεις της πηγής είναι μικρές σε σύγκριση με το μήκος κύματος λ , το μαγνητικό δυναμικό μπορεί να εκφραστεί:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 i\omega e^{-i\omega t}}{4\pi} \sum_{l,m} \frac{4\pi}{2l+1} Y_{lm}(\theta, \phi) \frac{e^{ikr}}{r^{l+1}} [1 + \alpha_1(ikr) + \dots \\ + \alpha_l(ikr)^l] \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') r'^l Y_{lm}^*(\theta', \phi') d^3x' \end{aligned} \quad (2.28)$$

όπου $Y_{lm}(\theta, \phi)$ είναι οι σφαιρικές αρμονικές και οι αριθμητικοί συντελεστές α_i προέρχονται από την ακριβή έκφραση για τις σφαιρικές συναρτήσεις Hankel. Ο όρος

$$\frac{e^{ikr}}{r^{l+1}} [1 + \alpha_1(ikr) + \dots + \alpha_l(ikr)^l]$$

δείχνει στην πραγματικότητα τη μετάβαση από την κοντινή ζώνη ($kr \ll 1$) στη ζώνη ακτινοβολίας ($kr \gg 1$).

2.5 Πεδία ηλεκτρικού και μαγνητικού διπόλου

Η επιλογή των όρων στη σειρά της εξίσωσης (2.26) θα οδηγήσει σε προσέγγιση πολλαπλών πόλων για το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό [17]. Συγκεκριμένα, ο πρώτος όρος

($n = 0$) θα οδηγήσει στο ηλεκτρικό δίπολο και μπορούμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Επιπλέον, ο όρος $n = 1$ θα οδηγήσει σε μαγνητικό δίπολο και ηλεκτρικό τετράπολο. Επομένως, ο ορθογωνικός βρόχος μπορεί να προσεγγιστεί με ένα μαγνητικό δίπολο. Ο ηλεκτρικός τετραπολικός όρος μπορεί να γίνει κατανοητός θεωρώντας ένα μαγνητικό δίπολο ως τέσσερα σύρματα. Από ηλεκτρική άποψη κάθε σύρμα φέρει μια κατανομή φορτίου $\rho(\mathbf{x}, t)$ και τα σύρματα είναι σε ζεύγη αντίθετα το ένα με το άλλο, δηλαδή ένα ηλεκτρικό τετραπόλο.

2.5.1 Πεδία ηλεκτρικού διπόλου

Διατηρώντας τον μηδενικό όρο της εξίσωσης (2.26) έχουμε:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') d^3 x' \quad (2.29)$$

Ολοκληρώνοντας κατά παράγοντες έχουμε:

$$\int \mathbf{J}(\mathbf{x}') d^3 x' = \int \mathbf{x}' (\nabla \cdot \mathbf{J}) = -i\omega \int \mathbf{x}' \rho(\mathbf{x}') d^3 x' \quad (2.30)$$

αφού από την εξίσωση συνέχειας έχουμε $-i\omega\rho = \nabla \cdot \mathbf{J}$. Αναγνωρίζουμε λοιπόν το ολοκλήρωμα ως την ηλεκτρική διπολική ροπή \mathbf{p} :

$$\mathbf{p} = \int \mathbf{x}' \rho(\mathbf{x}') d^3 x' \quad (2.31)$$

και το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό μπορεί να γραφτεί:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \mathbf{p} \quad (2.32)$$

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο (εξωτερικά της πηγής) μπορούν να βρεθούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) &= \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) \\ \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) &= \frac{ic}{k} \nabla \times \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Τα πεδία του ηλεκτρικού διπόλου μπορούν επομένως να γραφτούν:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) &= \frac{e^{-i\omega t}}{4\pi\epsilon_0} \left(k^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \times \mathbf{n} \frac{e^{ikr}}{r} + [3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{p}] \left(\frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} \right) e^{ikr} \right) \\ \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) &= \frac{\mu_0 c k^2 e^{-i\omega t}}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{e^{ikr}}{r} \left(1 - \frac{1}{ikr} \right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μαγνητικό πεδίο είναι εγκάρσιο στο διάνυσμα απόστασης, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο έχει συνιστώσες παράλληλα και κάθετα στο \mathbf{n} . Στη μακρινή ζώνη ακτινοβολίας τα πεδία παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned}\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) &= \frac{\mu_0 c k^2 e^{-i\omega t}}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{e^{ikr}}{r} \\ \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) &= c\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \times \mathbf{n}\end{aligned}\quad (2.35)$$

παρουσιάζοντας τυπική συμπεριφορά ακτινοβολούσας πηγής. Στην κοντινή ζώνη όμως, τα πεδία προσεγγίζουν:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 i\omega e^{-i\omega t}}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{1}{r^2} \quad (2.36)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{e^{-i\omega t}}{4\pi\epsilon_0} [3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{p}] \frac{1}{r^3} \quad (2.37)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο, εκτός από τις ταλαντώσεις του στο χρόνο, είναι το στατικό ηλεκτρικό διπολικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο είναι μικρότερο από το ηλεκτρικό πεδίο κατά το συντελεστή kr . Ως εκ τούτου, τα πεδία στην κοντινή ζώνη του ηλεκτρικού διπόλου είναι κυρίαρχα ηλεκτρικά. Στο στατικό όριο που η γωνιακή συχνότητα τείνει στο μηδέν ($\omega \propto k \rightarrow 0$), το μαγνητικό πεδίο εξαφανίζεται και η κοντινή ζώνη του ηλεκτρικού πεδίου εκτείνεται μέχρι το άπειρο.

2.5.2 Πεδία μαγνητικού διπόλου

Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (2.26) ($n = 1$) αντιστοιχεί σε ένα μαγνητικό δίπολο και ένα ηλεκτρικό τετράπολο. Τα πεδία για το μαγνητικό δίπολο είναι:

$$\begin{aligned}\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) &= \frac{e^{-i\omega t} \mu_0}{4\pi} \left(k^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{m}) \times \mathbf{n} \frac{e^{ikr}}{r} + [3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}) - \mathbf{m}] \left(\frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} \right) e^{ikr} \right) \\ \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) &= \frac{-Z_0 k^2 e^{-i\omega t}}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{m}) \frac{e^{ikr}}{r} \left(1 - \frac{1}{ikr} \right)\end{aligned}\quad (2.38)$$

όπου \mathbf{m} είναι η μαγνητική διπολική ροπή:

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \int (\mathbf{x}' \times \mathbf{J}) d^3x' \quad (2.39)$$

και $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ είναι η αντίσταση του ελεύθερου χώρου. Παρατηρούμε βέβαια την ηλεκτρομαγνητική δυαδικότητα για τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά δίπολα, αφού το μαγνητικό πεδίο για την πηγή μαγνητικού διπόλου θα είναι ίσο με $1/Z_0$ φορές το ηλεκτρικό πεδίο για το ηλεκτρικό δίπολο, με την αντικατάσταση $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{m}/c$. Όπως και πριν, έχουμε το μαγνητικό

πεδίο στην κοντινή ζώνη:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{e^{-i\omega t} \mu_0}{4\pi} [3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}) - \mathbf{m}] \frac{1}{r^3} \quad (2.40)$$

Ομοίως, το ηλεκτρικό πεδίο από μια πηγή μαγνητικού διπόλου είναι $-Z_0$ φορές το μαγνητικό πεδίο για το ηλεκτρικό δίπολο, με την αντικατάσταση $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{m}/c$:

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{-Z_0 i k e^{-i\omega t}}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{m}) \frac{1}{r^2} \quad (2.41)$$

Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί η ηλεκτρική τετραπολική συνεισφορά λόγω του $n = 1$ όρου. Επιπλέον, η επιλογή των όρων υψηλότερης τάξης ($n = 2, \dots$) θα οδηγήσει σε περαιτέρω πολυπολικό ανάπτυγμα (μαγνητικό τετράπολο, ηλεκτρική οκταπολική ροπή κ.ά.). Οι όροι υψηλότερης τάξης συνήθως δεν διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ηλεκτρική και μαγνητική συμπεριφορά των πηγών, δεδομένου ότι η συμβολή τους είναι αμελητέα και τα πεδία εξασθενούν γρήγορα σε συνάρτηση με την απόσταση παρατήρησης.

2.5.3 Γενικευμένα πεδία ηλεκτρικών και μαγνητικών διπόλων

Οι εξισώσεις που προκύπτουν για τα πεδία ηλεκτρικού και μαγνητικού διπόλου αντιστοιχούν σε πηγές που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς στο χρόνο. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.9) και (2.8) μπορούμε να βρούμε τις εξισώσεις ηλεκτρικών και μαγνητικών διπόλων για αυθαίρετη χρονική κατανομή των πηγών [28]. Τα πεδία του ηλεκτρικού διπόλου είναι:

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{3\mathbf{n}[\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}(t')] - \mathbf{p}(t')}{r^3} + \frac{3\mathbf{n}[\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{p}}(t')] - \dot{\mathbf{p}}(t')}{cr^2} + \frac{\mathbf{n} \times [\mathbf{n} \times \ddot{\mathbf{p}}(t')]}{c^2 r} \right) \quad (2.42)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{\dot{\mathbf{p}}(t') \times \mathbf{n}}{r^2} + \frac{\ddot{\mathbf{p}}(t') \times \mathbf{n}}{cr} \right) \quad (2.43)$$

όπου $t' = t - r/c$ είναι ο καθυστερημένος χρόνος και η τελεία πάνω από τις διπολικές ροπές δηλώνει την χρονική παράγωγο. Ομοίως, τα πεδία που παράγει ένα μαγνητικό δίπολο είναι:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3\mathbf{n}[\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}(t')] - \mathbf{m}(t')}{r^3} + \frac{3\mathbf{n}[\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{m}}(t')] - \dot{\mathbf{m}}(t')}{cr^2} + \frac{\mathbf{n} \times [\mathbf{n} \times \ddot{\mathbf{m}}(t')]}{c^2 r} \right) \quad (2.44)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{\dot{\mathbf{m}}(t') \times \mathbf{n}}{r^2} + \frac{\ddot{\mathbf{m}}(t') \times \mathbf{n}}{cr} \right) \quad (2.45)$$

Οι εξισώσεις αυτές διευκολύνουν τον υπολογισμό των πεδίων από ηλεκτρικές και μαγνητικές διπολικές πηγές με οποιαδήποτε χρονική εξάρτηση (π.χ. παλμική ακολουθία, βηματική ή κρουστική συμπεριφορά, κ.ά.). Η παραδοχή μιας ημιτονοειδούς χρονικής εξάρτησης των

διπολικών ροπών, δηλαδή $\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_0 e^{-i\omega t}$ και $\mathbf{m}(t) = \mathbf{m}_0 e^{-i\omega t}$, θα οδηγήσει και πάλι στις εξισώσεις (2.34) και (2.38).

2.5.4 Πεδίο μαγνητικού τετραπόλου

Η πηγή μαγνητικού τετραπόλου μπορεί να θεωρηθεί ως δύο πηγές μαγνητικών διπόλων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές τοποθετημένα σε πολύ κοντινή απόσταση [41]. Το σταθερό μαγνητικό πεδίο από μια τέτοια πηγή μπορεί να εκφραστεί σε μορφή πινάκων σε συνάρτηση με τον ταυστή τετραπολικής ροπής. Ένας εύκολος τρόπος υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου στη θέση \mathbf{x}_i που προέρχεται από μια πηγή μαγνητικού τετραπόλου είναι [26]:

$$\mathbf{B}_l^{QP}(\mathbf{x}_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{15}{R_{il}^7} \mathbf{d}_{il} \mathbf{d}_{il}^T \mathbf{Q}_l \mathbf{d}_{il} - \frac{6}{R_{il}^5} \mathbf{Q}_l \mathbf{d}_{il} \right) \quad (2.46)$$

όπου ο δείκτης l προσδιορίζει το l - τετραπόλο σε ένα σύνολο N_{qp} και ορίζονται οι ακόλουθες μεταβλητές:

- \mathbf{Q}_l : Συμμετρικός και με μηδενικό ίχνος ταυστής του τετραπόλου ($\text{mA}\cdot\text{m}^3$).
- \mathbf{x}'_l : Διάνυσμα θέσης του l τετραπόλου (m).
- $\mathbf{d}_{il} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}'_l$: Διάνυσμα απόστασης μεταξύ πηγής τετραπόλου και σημείου παρατήρησης (m).
- $R_{il} = \|\mathbf{d}_{il}\|_2$: Μέτρο διανύσματος απόστασης (m).

Για να εξασφαλιστεί η συμμετρία και οι ιδιότητες του ίχνους του ταυστή \mathbf{Q}_l , ο πίνακας αντιπροσωπεύεται από πέντε βαθμωτές παραμέτρους q_1 έως q_5 :

$$\mathbf{Q}_l = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}q_1 - \frac{1}{3}q_4 & \frac{1}{2}q_2 & \frac{1}{2}q_3 \\ \frac{1}{2}q_2 & -\frac{1}{3}q_1 + \frac{2}{3}q_4 & \frac{1}{2}q_5 \\ \frac{1}{2}q_3 & \frac{1}{2}q_5 & -\frac{1}{3}q_1 - \frac{1}{3}q_4 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Για να επιτευχθεί διαχωρισμός μεταξύ της θέσης του τετραπόλου και του μαγνητικά εξαρτώμενου όρου, ο διανυσματικός τελεστής μπορεί να εφαρμοστεί στην εξίσωση (2.46), οδηγώντας μετά από αρκετούς χειρισμούς σε:

$$\mathbf{B}_l^{QP}(\mathbf{x}_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\mathbf{d}_{il}^T \otimes \left(\frac{15}{R_{il}^7} \mathbf{d}_{il} \mathbf{d}_{il}^T - \frac{6}{R_{il}^5} \mathbf{I}^3 \right) \right] \text{vec}\{\mathbf{Q}\} \quad (2.48)$$

όπου το \otimes είναι το γινόμενο Kronecker. Εφαρμόζοντας το διανυσματικό τελεστή στον ταυστή της τετραπολικής ροπής \mathbf{Q} , οι παράμετροι \mathbf{q} μπορούν να εκφραστούν γραμμικά

συναρτήσει του διανύσματος $\text{vec}\{\mathbf{Q}\}$ με την ακόλουθη εξάρτηση:

$$\text{vec}\{\mathbf{Q}\} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{3} & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{bmatrix} = \mathbf{E}\vec{\mathbf{q}} \quad (2.49)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω έκφραση στην εξίσωση (2.48), το μαγνητικό πεδίο το οποίο παράγεται από ένα τετράπολο προκύπτει από την έκφραση:

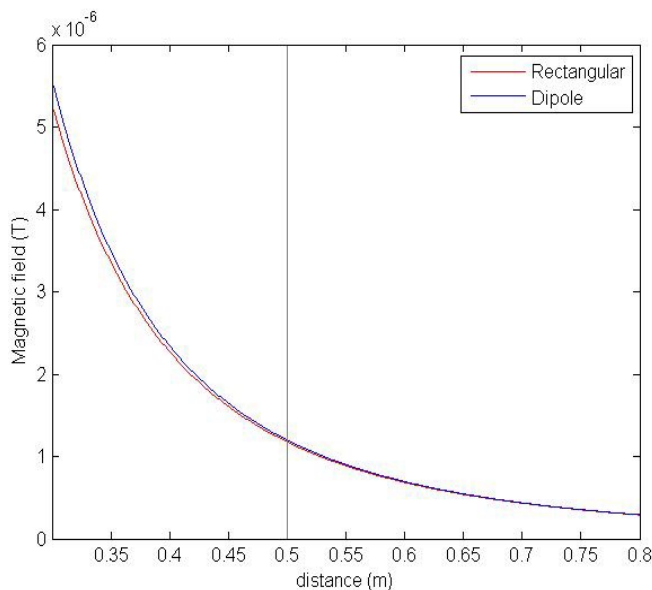
$$\mathbf{B}_l^{QP}(\mathbf{x}_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\mathbf{d}_{il}^T \otimes \left(\frac{15}{R_{il}^7} \mathbf{d}_{il} \mathbf{d}_{il}^T - \frac{6}{R_{il}^5} \mathbf{I}^3 \right) \right] \mathbf{E}\vec{\mathbf{q}}_l \quad (2.50)$$

η οποία είναι γραμμική ως προς $\vec{\mathbf{q}}_l$ και οι όροι που περιλαμβάνουν το διάνυσμα θέσης (και απόστασης από το σημείο παρατήρησης) της τετραπολικής πηγής και τον ταυιστή της μαγνητικής τετραπολικής ροπής είναι σαφώς γραμμικά διαχωρισμένοι.

2.6 Στοιχειώδη προβλήματα μαγνητισμού

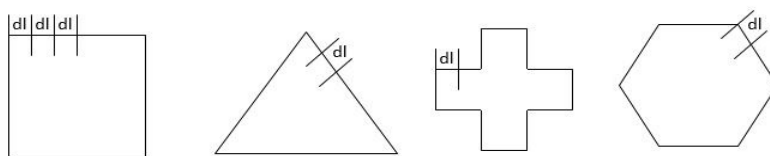
Προκειμένου να προσδιοριστούν πιθανοί περιορισμοί στην προσέγγιση των μαγνητικών βρόχων που είναι τοποθετημένοι μέσα σε μια συσκευή, το μαγνητικό πεδίο ενός δίπολου σε σύγκριση με το μαγνητικό πεδίο ενός βρόχου ρεύματος ορθογωνικού σχήματος 0.1 m απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Και οι δύο μαγνητικές πηγές είναι τοποθετημένες στο (0, 0, 0) m και έχουν ίσες μαγνητικές ροπές ($m = IA$, όπου A αντιπροσωπεύει την επιφάνεια που περικλείεται από το βρόχο ρεύματος). Όπως παρατηρείται εύκολα από το Σχήμα 2.3, η μαγνητική συμπεριφορά των δύο αυτών πηγών είναι παρόμοια όταν η απόσταση του σημείου παρατήρησης είναι μακρύτερη από περίπου 5 φορές τη μέγιστη διάσταση του βρόχου. Πέρα από αυτό το κατώφλι, το μαγνητικό πεδίο του ορθογώνιου βρόχου ακολουθεί περίπου τον κυβικό νόμο απόστασης r^{-3} . Ωστόσο, όταν η απόσταση παρατήρησης είναι κοντινότερη από 5 φορές τη μέγιστη διάσταση του βρόχου, ο ισχύων νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου αποκλίνει από τον κυβικό.

Οι διαδρομές του ρεύματος μέσα σε μια συσκευή (π.χ. στα ηλεκτρονικά της κυκλώματα) ενδέχεται να αποκλίνουν από τετραγωνικό ή ορθογωνικό σχήμα και συνεπώς παράγουν μια



ΣΧΗΜΑ 2.3: Μαγνητικό πεδίο διπόλου (μπλε γραμμή) και ορθογωνικού βρόχου (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την απόσταση παρατήρησης.

διαφορετική μαγνητική υπογραφή σε συνάρτηση με την απόσταση παρατήρησης. Οι μαγνητικές πηγές που μελετώνται απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4 και τα σχήματα που λαμβάνονται υπ' όψιν είναι ενδεικτικά. Επίσης, η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας, η επιφάνεια που περικλείει η διαδρομή του ρεύματος, το σχήμα, και η παρουσία ή απουσία ρευμάτων κοινού τρόπου λειτουργίας (common mode currents) επηρεάζουν σημαντικά τη μαγνητική συμπεριφορά των βρόχων ρεύματος [42].



ΣΧΗΜΑ 2.4: Σχήματα μαγνητικών βρόχων.

Προκειμένου να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από το στατικό ρεύμα I που διαρρέει αυτές τις πηγές ακολουθώντας τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Method - FEM), τα σχήματα των μαγνητικών βρόχων διαιρούνται σε w στοιχεία μήκους $d\mathbf{l}$ που φέρουν ρεύμα I . Στη συνέχεια, η συνεισφορά κάθε στοιχείου $i = 1 \dots w$ στο

μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται μέσω του νόμου Biot-Savart:

$$d\mathbf{B}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l}_i \times \mathbf{R}_i}{|\mathbf{R}_i|^3} \quad (2.51)$$

όπου \mathbf{R}_i είναι το διάνυσμα απόστασης μεταξύ του σημείου παρατήρησης και του εκάστοτε στοιχείου. Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο της πηγής υπολογίζεται ως υπέρθεση του μαγνητικού πεδίου όλων των μεμονωμένων στοιχείων, δηλαδή

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^w d\mathbf{B}_i \quad (2.52)$$

Εναλλακτικά, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί μέσω της προσέγγισης του διανυσματικού δυναμικού:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \mathbf{J}(\mathbf{x}') \frac{e^{ikr}}{r} dV' \quad (2.53)$$

και η πυκνότητα ρεύματος θεωρείται ότι ακολουθεί ημιτονοειδή χρονική κατανομή ($\mathbf{J}(\mathbf{x}', t) = \mathbf{J}(\mathbf{x}')e^{-i\omega t}$). Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.54)$$

Για παράδειγμα, το διανυσματικό δυναμικό ενός μικρού τετραγωνικού βρόχου, με πλευρές προσανατολισμένες μόνο προς $\hat{\mathbf{x}}$ και $\hat{\mathbf{y}}$ κατεύθυνση, με κέντρο την αρχή των αξόνων και τροφοδοτούμενο με ρεύμα I είναι σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\mathbf{A}(x, y, z) = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \left(\frac{e^{ikr_1}}{r_1} - \frac{e^{ikr_3}}{r_3} \right) \hat{\mathbf{x}} + \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \left(\frac{e^{ikr_4}}{r_4} - \frac{e^{ikr_2}}{r_2} \right) \hat{\mathbf{y}} \quad (2.55)$$

όπου r_i , $i = 1, 2, 3, 4$, είναι η απόσταση από το κέντρο κάθε πλευράς του τετραγωνικού βρόχου μέχρι το σημείο παρατήρησης και $a \ll \lambda$ είναι η πλευρά του βρόχου.

Για τις χαμηλές συχνότητες ($k \rightarrow 0$), οι εκθετικοί όροι της εξίσωσης (2.55) συγκλίνουν στη μονάδα, και η χρήση της εξίσωσης (2.54) δείχνει ότι είτε η εξίσωση του διανυσματικού δυναμικού ή ο νόμος Biot-Savart μπορούν εναλλακτικά να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου που παράγει ο τετραγωνικός βρόχος.

Το πρώτο βήμα της μελέτης είναι η επιλογή των διαστάσεων του κουτιού που αντιπροσωπεύει τη συσκευή υπό εξέταση και ορίζει το γεωμετρικό όριο των μέγιστων διαστάσεων του βρόχου. Στα αποτελέσματα προσομοίωσης που παρουσιάζονται στις επόμενες υποενότητες, η συσκευή θεωρείται ένα κουτί με διαστάσεις $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$. Μέσα σε αυτά όρια,

πρέπει να καθοριστεί το σχήμα και η επιφάνεια που περικλείεται από το ρεύμα που διαρρέει το βρόχο.

Ως επόμενο βήμα, πρέπει να προσδιοριστούν οι παράμετροι του σταθερού ή εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί τον βρόχο, δηλαδή η συχνότητα του ρεύματος και το πλάτος του. Επιπλέον, τα σημεία παρατήρησης επιλέγονται να είναι από 0.2 m έως 1.2 m επί του άξονα z και χωρίζονται ουσιαστικά σε δύο περιοχές. Η πρώτη περιοχή παρατήρησης είναι από 0.2 m έως 0.5 m και η δεύτερη από 0.5 m έως 1.2 m, λαμβάνοντας υπ' όψιν το κατώφλι του Σχήματος 2.3.

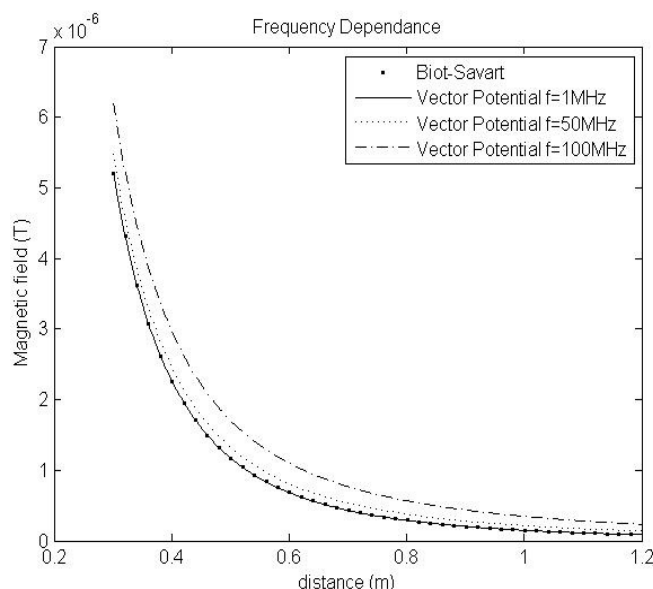
Το μαγνητικό πεδίο βρόχου σταθερού ρεύματος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας είτε το νόμο των Biot-Savart ή την προσέγγιση του μαγνητικού δυναμικού. Τέλος, χρησιμοποιείται ένα εργαλείο το οποίο προσαρμόζει στις τιμές του μαγνητικού πεδίου ένα νόμο δύναμης για τον καθορισμό του ακριβούς νόμου ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση παρατήρησης.

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, θεωρείται ότι η μαγνητική υπογραφή της συσκευής μπορεί να μοντελοποιηθεί μόνο με ένα βρόχο. Η μαγνητική συμπεριφορά του βρόχου ρεύματος εξετάζεται όσον αφορά το σχήμα του, την επιφάνεια που περικλείει, τη συχνότητα του ρεύματος που τον διαρρέει και την παρουσία ρευμάτων κοινού τρόπου λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα σενάρια μελετώνται ξεχωριστά, μεταβάλλοντας μόνο μία παράμετρο τη φορά, διατηρώντας παράλληλα σταθερές τις υπόλοιπες.

2.6.1 Εξάρτηση από τη συχνότητα του ρεύματος της πηγής

Το μαγνητικό πεδίο ενός ορθογώνιου βρόχου σχήματος υπολογίζεται με τη χρήση του νόμου Biot-Savart (που απεικονίζεται σε μπλε γραμμή) και μέσω του μαγνητικού δυναμικού για συχνότητες του ρεύματος 1 MHz, 50 MHz και 100 MHz. Η εξάρτηση σε σχέση με την απόσταση μεταξύ του μαγνητικού βρόχου και του σημείου παρατήρησης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.

Οι ακριβείς νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου, καθώς και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error - RMSE) για κάθε συχνότητα αντιστοιχίζονται στον Πίνακα 2.1. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όταν η συχνότητα του ρεύματος είναι μεγαλύτερη από 1 MHz, ο κυβικός νόμος ελάττωσης του πεδίου αποκλίνει σημαντικά, ενώ κάτω από 1 MHz οι δύο καμπύλες έχουν παρόμοια συμπεριφορά.



ΣΧΗΜΑ 2.5: Εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης του σημείου παρατήρησης ενός τετραγωνικού βρόχου ρεύματος, υπολογιζόμενο με τη χρήση του νόμου Biot-Savart και μέσω του μαγνητικού δυναμικού σε διάφορες συχνότητες.

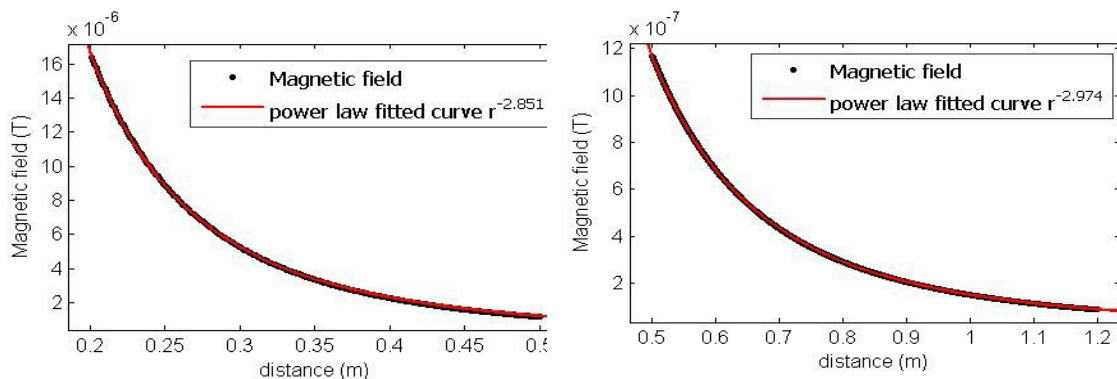
Συχνότητα ρεύματος τροφοδοσίας του τετραγωνικού βρόχου	Νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου	Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος
1 MHz	$r^{-2.899}$	2.723 e-08
50 MHz	$r^{-2.747}$	2.955 e-08
100 MHz	$r^{-2.529}$	7.05 e-08

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και μέσο τετραγωνικό σφάλμα για διάφορες συχνότητες του ρεύματος που διαρρέει τον τετραγωνικό βρόχο.

2.6.2 Εξάρτηση από το σχήμα της πηγής

Αρχικά μελετώνται τα τέσσερα διαφορετικά σχήματα βρόχων ρεύματος του Σχήματος 2.4 μελετώνται. Το κέντρο των βρόχων θεωρείται ότι βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και η επιφάνεια που περικλείεται από τη διαδρομή του ρεύματος σε κάθε περίπτωση είναι ίση με 0.01 m^2 . Όπως ήδη αναφέρθηκε, η απόσταση μεταξύ των μαγνητικών πηγών και του σημείου παρατήρησης χωρίζεται σε δύο περιοχές, ανάλογα με τις διαστάσεις του βρόχου. Οι καμπύλες προσαρμογής στο νόμο απόστασης του μαγνητικού πεδίου για τον τετραγωνικό βρόχο απεικονίζονται στο Σχ. 2.6.

Παρόμοια αποτελέσματα έχουν ληφθεί και για τα άλλα τρία σχήματα υπό εξέταση. Οι ακριβείς νόμοι απόστασης καθώς και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) για κάθε σχήμα αντιστοιχούνται στον Πίνακα 2.2. Η προσαρμογή του πεδίου με νόμους



Μαγνητικό πεδίο στην περιοχή 1.

Μαγνητικό πεδίο στην περιοχή 2.

ΣΧΗΜΑ 2.6: Καμπύλες προσαρμογής για τον ορθογώνιο βρόχο κάτω από 0,5 m (αριστερά) και πάνω από 0,5 m (δεξιά).

δύναμης είναι ικανοποιητική, καθώς οι τιμές του σφάλματος είναι αμελητέες. Όπως εύκολα παρατηρείται, η μαγνητική συμπεριφορά του τριγωνικού βρόχου διαφέρει σημαντικά στην πρώτη περιοχή (κάτω από 0,5 m), ενώ όταν η απόσταση παρατήρησης υπερβαίνει αυτό το κατώφλι ο νόμος απόστασης που ακολουθείται από όλα τα σχήματα συγκλίνει προς τον κυβικό νόμο του διπόλου r^{-3} .

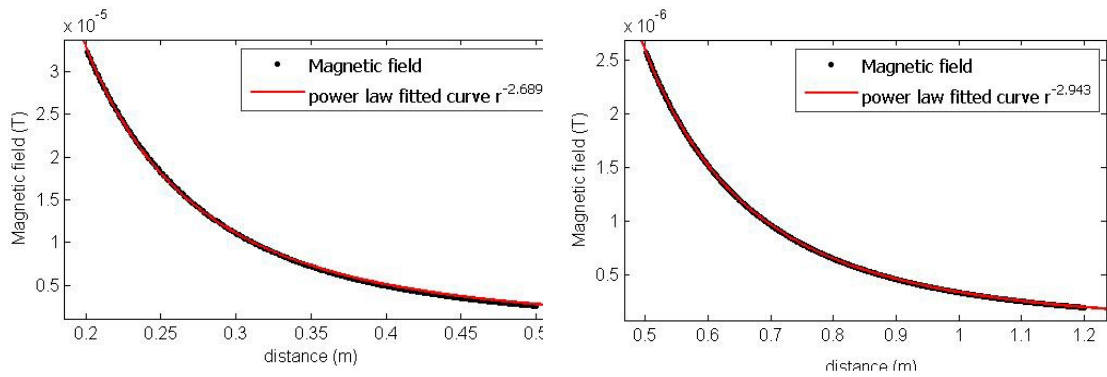
Σχήμα του τετραγωνικού βρόχου	Νόμος απόστασης του μαγνητικού πεδίου στην Περιοχή 1	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στην Περιοχή 1	Νόμος απόστασης του μαγνητικού πεδίου στην Περιοχή 2	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στην Περιοχή 2
Τετραγωνικός	$r^{-2.851}$	3.643 e-08	$r^{-2.974}$	4.327 e-10
Τριγωνικός	$r^{-2.761}$	8.176 e-08	$r^{-2.956}$	1.094 e-09
Σταυροειδής	$r^{-2.831}$	4.076 e-08	$r^{-2.97}$	4.989 e-10
Σταυροειδής	$r^{-2.856}$	3.554 e-08	$r^{-2.975}$	4.175 e-10

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: Νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και μέσο τετραγωνικό σφάλμα για τα σχήματα βρόχων υπό εξέταση.

2.6.3 Εξάρτηση από την επιφάνεια του βρόχου

Επιπλέον, προκειμένου να εξεταστεί η εξάρτηση μεταξύ της συμπεριφοράς του μαγνητικού βρόχου και της επιφάνειας που περικλείεται από τη διαδρομή του ρεύματος ελήφθησαν υπ' όψιν δύο τετράγωνοι μαγνητικοί βρόχοι με διαφορετικές διαστάσεις. Ο πρώτος έχει πλευρά $a = 0.1$ m, ενώ ο δεύτερος έχει πλευρά ίση με $a = 0.15$ m. Οι καμπύλες προσαρμογής στο νόμο απόστασης του μαγνητικού πεδίου για τον ορθογώνιο βρόχο με πλευρά $a = 0.15$ m φαίνεται στο Σχήμα 2.7.

Όπως παρατηρείται εύκολα, όταν η επιφάνεια του βρόχου αυξάνεται, η απόκλιση από το κυβικό νόμο επίσης αυξάνεται στην πρώτη περιοχή (κάτω από 0,5 m). Ωστόσο, στην περιοχή



Μαγνητικό πεδίο στην περιοχή 1.

Μαγνητικό πεδίο στην περιοχή 2.

ΣΧΗΜΑ 2.7: Καμπύλες προσαρμογής για ορθογώνιο βρόχο με πλευρά $a = 0.15$ m κάτω από 0.5 m(αριστερά) και πάνω από 0.5 m (δεξιά).

που αντιστοιχεί σε αποστάσεις παρατήρησης μεγαλύτερες από 0,5 m, η επιφάνεια του βρόχου δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη μαγνητική συμπεριφορά του όσον αφορά το νόμο απόστασης. Οι ακριβείς ισχύοντες νόμοι, καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE των δυο βρόχων και για τις δύο περιοχές παρατήρησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3. Από τις χαμηλές τιμές του σφάλματος RMSE, είναι προφανές ότι οι προσαρμογές είναι ακριβείς.

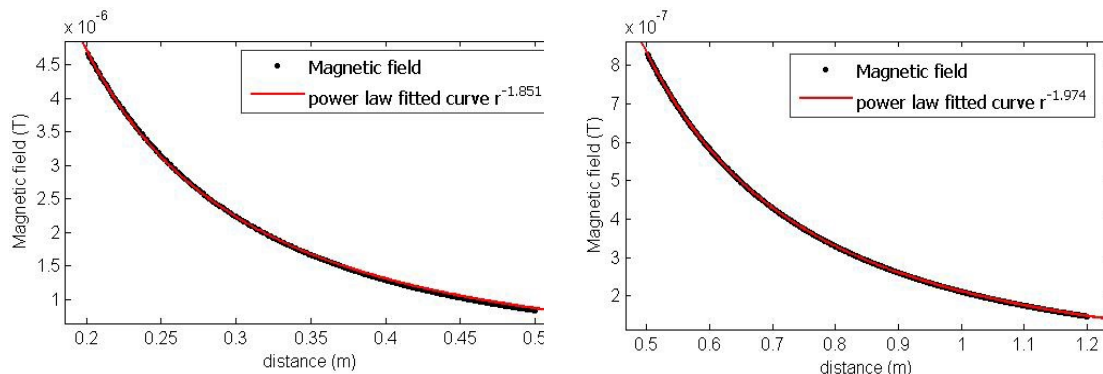
Πλευρά του τετραγωνικού βρόχου	Νόμος απόστασης του μαγνητικού πεδίου στην Περιοχή 1	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στην Περιοχή 1	Νόμος απόστασης του μαγνητικού πεδίου στην Περιοχή 2	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στην Περιοχή 2
$a = 0.1$ m	$r^{-2.851}$	3.643 e-08	$r^{-2.974}$	4.327 e-10
$a = 0.15$ m	$r^{-2.689}$	1.57 e-07	$r^{-2.943}$	2.128 e-09

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: Νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και μέσο τετραγωνικό σφάλμα για διαφορετική επιφάνεια του μαγνητικού βρόχου τετραγωνικού σχήματος.

2.6.4 Εξάρτηση από την παρουσία ρευμάτων κοινού τρόπου λειτουργίας

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των ρευμάτων κοινού τρόπου λειτουργίας σε μαγνητικούς βρόχους, ο νόμος απόστασης του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από ένα ορθογώνιο μαγνητικό βρόχο που φέρει μόνο ρεύμα κοινού τρόπου λειτουργίας (common mode current) συγκρίνεται με το νόμο απόστασης του μαγνητικού πεδίου ενός ορθογώνιου μαγνητικού βρόχου με διαφορικό ρεύμα (differential mode current). Συνήθως, τα ρεύματα κοινής λειτουργίας είναι σημαντικά χαμηλότερα από τα ρεύματα διαφορικού τρόπου λειτουργίας και η παρουσία τους σε μια συσκευή είναι μη επιθυμητή καθώς η ορθή λειτουργία της συναρτάται μόνο με το διαφορικό ρεύμα [37]. Κατά συνέπεια, η τιμή του ρεύματος

κοινής λειτουργίας που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη είναι ίση με το 10% του διαφορικού ρεύματος. Οι νόμοι απόστασης για τις δύο περιοχές παρατήρησης του μαγνητικού πεδίου το οποίο δημιουργείται από τετραγωνικό βρόχο με ρεύματα κοινού τρόπου λειτουργίας απεικονίζονται στο Σχήμα 2.8.



Μαγνητικό πεδίο στην περιοχή 1.

Μαγνητικό πεδίο στην περιοχή 2.

ΣΧΗΜΑ 2.8: Καμπύλες προσαρμογής για ορθογώνιο βρόχο με πλευρά $a = 0,15$ m κάτω από 0,5 m (αριστερά) και πάνω από 0,5 m (δεξιά).

Τύπος Ρεύματος	Νόμος απόστασης του μαγνητικού πεδίου στην Περιοχή 1	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στην Περιοχή 1	Νόμος απόστασης του μαγνητικού πεδίου στην Περιοχή 2	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στην Περιοχή 2
Ρεύμα διαφορικού τρόπου λειτουργίας	$r^{-2.851}$	3.643 e-08	$r^{-2.974}$	4.327 e-10
Ρεύμα κοινού τρόπου λειτουργίας	$r^{-1.851}$	2.002 e-08	$r^{-1.974}$	5.778 e-10

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4: Νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και μέσο τετραγωνικό σφάλμα για ρεύμα διαφορικού και κοινού τρόπου λειτουργίας που τροφοδοτείται σε τετραγωνικό βρόχο.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.8, η ελάττωση του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση παρατήρησης πλησιάζει σε τετραγωνικό νόμο απόστασης r^{-2} και στις δύο περιοχές, αποκλίνοντας σημαντικά από την αντίστοιχο νόμο του μαγνητικού πεδίου του ίδιου μαγνητικού βρόχου όταν υπάρχουν μόνο ρεύματα διαφορικού τρόπου λειτουργίας. Οι νόμοι απόστασης και το σφάλμα RMSE της προσαρμογής καταγράφονται στον Πίνακα 2.4, όπου είναι εμφανές ότι λόγω των χαμηλών σφαλμάτων η προσαρμογή είναι ακριβής.

2.7 Συμπεράσματα

Η παρούσα θεωρητική έρευνα επικεντρώνεται στην εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη συχνότητα λειτουργίας και την απόσταση του σημείου παρατήρησης, οδηγώντας σε ενδεικτικούς νόμους για διάφορους τύπους μαγνητικών βρόχων. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που μελετώνται περιλαμβάνουν το σχήμα του βρόχου, την επιφάνειά του, τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και τον τύπο του ρεύματος. Οι παράμετροι μελετήθηκαν μεμονωμένα, καταλήγοντας σε διαφορετικούς νόμους απόστασης του μαγνητικού πεδίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν σαφώς ότι όλες αυτές οι παράμετροι έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη μαγνητική συμπεριφορά ενός μαγνητικού βρόχου, ειδικά όταν το σημείο παρατήρησης βρίσκεται πολύ κοντά στην συσκευή υπό εξέταση και το μαγνητικό πεδίο αποκλίνει από τον κυβικό νόμο απόστασης. Από την άλλη πλευρά, όταν η απόσταση παρατήρησης αυξάνεται, ο νόμος του πεδίου συγκλίνει στον κυβικό (εκτός από την περίπτωση ρεύματος κοινού τρόπου λειτουργίας) και η προσέγγιση του διπόλου (r^{-3}) μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη. Αντιμετωπίζοντας τα στοιχειώδη προβλήματα που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο και βασίζοντας την ανάλυση σε φυσικούς νόμους, μαγνητικές πηγές μπορούν να προσομοιώσουν σύνθετες συσκευές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω μελέτη μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τον εντοπισμό των παραμέτρων των μαγνητικών βρόχων εντός μιας συσκευής με απλή μέτρηση του νόμου ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και κατά συνέπεια να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση μοντέλων μαγνητικών πηγών (magnetic source identification) και για την πρόβλεψη της μαγνητικής της συμπεριφοράς.

Εντούτοις, στην πραγματικότητα μια συσκευή αποτελείται από περισσότερους από έναν βρόχους, οι θέσεις των οποίων είναι άγνωστες εκ των προτέρων. Οι παράμετροι αυτών των βρόχων μπορεί να ποικίλουν και να επηρεάζουν ταυτόχρονα τη μαγνητική συμπεριφορά της συσκευής. Σε μια τέτοια περίπτωση, το συνολικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας την υπέρθεση των διαφορετικών στοιχείων των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από διαφορετικούς βρόχους. Για κάθε βρόχο, το παραγόμενο πεδίο μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$\mathbf{B}_j \sim \frac{F_{x_j} \hat{\mathbf{x}}}{r^{n_{x_j}}} + \frac{F_{y_j} \hat{\mathbf{y}}}{r^{n_{y_j}}} + \frac{F_{z_j} \hat{\mathbf{z}}}{r^{n_{z_j}}} \quad (2.56)$$

Όπου F είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται από το ρεύμα I , την επιφάνεια και τη θέση του βρόχου μέσα στην συσκευή, καθώς και τον προσανατολισμό του σε σχέση με το σημείο παρατήρησης, ενώ n_x , n_y , n_z είναι οι νόμοι απόστασης που εξαρτώνται από το σχήμα του βρόχου, την επιφάνειά του, τη συχνότητα και τον τύπο ρεύματος (διαφορικού ή/και κοινού τύπου) του βρόχου j . Το συνολικό μαγνητικό πεδίο θα ήταν τότε η υπέρθεση όλων των M

βρόχων j , $j = 1 \dots M$:

$$\mathbf{B}_{tot} = \sum_{j=1}^M \mathbf{B}_j \quad (2.57)$$

Αυτή η θεωρητική ανάλυση μπορεί λοιπόν να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει διάφορες ρεαλιστικές συσκευές υπό εξέταση που αποτελούνται από πολύπλοκα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα στα οποία τα φαινόμενα και οι παράμετροι που μελετήθηκαν ενδέχεται να είναι ταυτόχρονα παρόντα.

Κεφάλαιο 3

Μέθοδοι Μοντελοποίησης Πολλαπλών Διπόλων

3.1 Εισαγωγή

Οι πραγματικές πηγές μέσα σε μια συσκευή υπό εξέταση θεωρείται ότι αντιπροσωπεύονται από ένα μικρό αριθμό μαγνητικών διπόλων. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι πηγές μαγνητικού πεδίου μέσα σε ένα διαστημικό σκάφος δεν μπορούν να προσεγγιστούν με μαγνητικά δίπολα, δεδομένου ότι σε ορισμένες περιπτώσεις τα ηλεκτρικά ρεύματα που ρέουν στον εξοπλισμό πρέπει να υποβάλλονται σε αναλυτική επεξεργασία με το νόμο Biot-Savart, όπως για παράδειγμα οι ηλιακές συστοιχίες [20]. Το (στατικό) μαγνητικό πεδίο που παράγεται από μια μαγνητική διπολική ροπή σε ένα σημείο παρατήρησης \mathbf{r} μπορεί να περιγραφεί [17]:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\mathbf{r} - \mathbf{r}')[(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdot \mathbf{m}]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^5} - \frac{\mathbf{m}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \right] \quad (3.1)$$

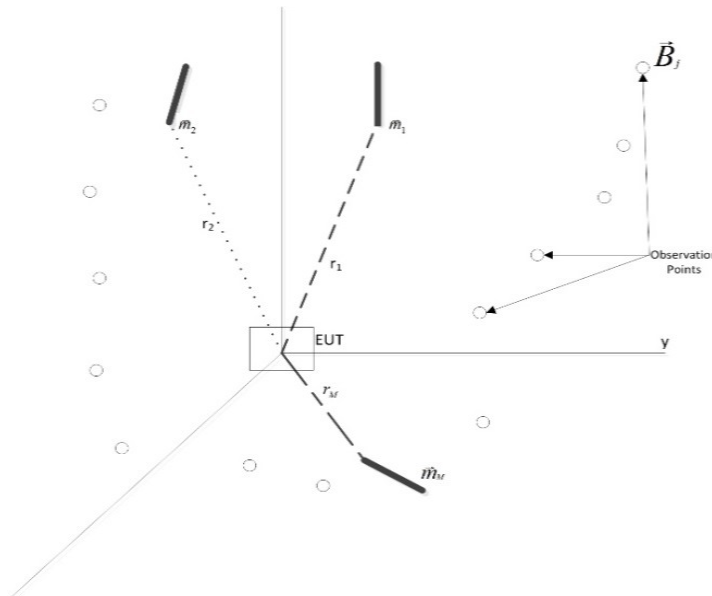
όπου \mathbf{r}' είναι η θέση της μαγνητικής ροπής \mathbf{m} στο σύστημα συντεταγμένων δοκιμής και μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου. Η εξίσωση (3.1) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} στη θέση των μαγνητομέτρων \mathbf{r}_{mag} στο σύστημα συντεταγμένων του διαστημικού οχήματος οποιουδήποτε είδους μαγνητικής ροπής (επαγόμενης ή και παραμένουσας) \mathbf{m} των μεμονωμένων μονάδων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται συνήθως σε μακρόστενο βραχίονα μήκους μερικών μέτρων προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις του μαγνητικού πεδίου του διαστημοπλοίου.

3.2 Μαθηματική Περιγραφή

Η συσκευή υπό εξέταση - EUT θεωρείται ότι είναι τοποθετημένη στην αρχή των αξόνων και η μαγνητική συμπεριφορά της μπορεί να προσεγγιστεί από ένα σύνολο M μαγνητικών διπόλων τοποθετημένων στο $\mathbf{r}'_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$ σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, με μαγνητικές ροπές:

$$\mathbf{m}_i = m_{i_x} \hat{\mathbf{x}} + m_{i_y} \hat{\mathbf{y}} + m_{i_z} \hat{\mathbf{z}} \quad (3.2)$$

Επιπλέον, τα σημεία παρατήρησης $j = 1, 2, \dots, N_{mag}$ βρίσκονται στη θέση $\mathbf{r}_{0j} = (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j})$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.



ΣΧΗΜΑ 3.1: Απεικόνιση της βασικής γεωμετρίας του προβλήματος.

Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το μαγνητικό δίπολο i στο σημείο παρατήρησης j μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση (3.1) σε συνιστώσες:

$$\begin{aligned} B_{x_{ij}} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(x_{0j} - x_i)}{\rho_{ij}^5} L_{ij} - \frac{m_{i_x}}{\rho_{ij}^3} \right] \\ B_{y_{ij}} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(y_{0j} - y_i)}{\rho_{ij}^5} L_{ij} - \frac{m_{i_y}}{\rho_{ij}^3} \right] \\ B_{z_{ij}} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(z_{0j} - z_i)}{\rho_{ij}^5} L_{ij} - \frac{m_{i_z}}{\rho_{ij}^3} \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου το εσωτερικό γινόμενο L_{ij} είναι:

$$L_{ij} = m_{i_x}(x_{0j} - x_i) + m_{i_y}(y_{0j} - y_i) + m_{i_z}(z_{0j} - z_i) \quad (3.4)$$

και ρ_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της πηγής:

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_{0j} - x_i)^2 + (y_{0j} - y_i)^2 + (z_{0j} - z_i)^2} \quad (3.5)$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο από τα M μαγνητικά δίπολα στο σημείο παρατήρησης j μπορεί να εκφραστεί ως υπέρθεση όλων των μεμονωμένων συνεισφορών:

$$\mathbf{B}_j = \sum_{i=1}^M B_{x_{ij}} \hat{\mathbf{x}} + \sum_{i=1}^M B_{y_{ij}} \hat{\mathbf{y}} + \sum_{i=1}^M B_{z_{ij}} \hat{\mathbf{z}} \quad (3.6)$$

Οι παράμετροι της μαγνητικής πηγής που πρόκειται να καθοριστούν περιλαμβάνουν τη θέση του διπόλου (x, y, z) και τη μαγνητική ροπή του (m_x, m_y, m_z) . Ο αλγόριθμος για τη λύση αυτού του αντίστροφου προβλήματος χρησιμοποιεί τις εξισώσεις του μαγνητικού διπόλου (3.3) - (3.6), προκειμένου να εκτιμήσει αυτές τις 6 παραμέτρους για κάθε πηγή διπόλου, που μπορούν αργότερα να χρησιμοποιηθούν για την αναδημιουργία της μαγνητικής υπογραφής της συσκευής.

3.3 Στοχαστικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Οι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης γενικεύουν τις ντετερμινιστικές μεθόδους για τα προσδιοριστικά προβλήματα καθώς παράγουν και χρησιμοποιούν τυχαίες μεταβλητές. Για τα στοχαστικά προβλήματα, οι τυχαίες μεταβλητές αυτές εμφανίζονται στη διατύπωση του ίδιου του προβλήματος βελτιστοποίησης, οι οποίες περιλαμβάνουν τυχαίες αντικειμενικές συναρτήσεις ή και τυχαίους περιορισμούς. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να περιγραφούν σαν αναζήτηση σε ένα δεδομένο χώρο για μια βέλτιστη λύση [47]. Τα δύσκολα προβλήματα, ωστόσο, είναι πολυπαραμετρικά με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ενδεχομένως περισσότερες από μία τοπικές βέλτιστες λύσεις στον χώρο αναζήτησης. Επομένως, οι στοχαστικές τεχνικές βελτιστοποίησης σχεδιάζονται για να μπορούν να δίνουν λύσεις σε υψηλής πολυπλοκότητας προβλήματα. Στην παρούσα διατριβή, η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων εφαρμόζεται στο αντίστροφο πρόβλημα πρόβλεψης διπολικών πηγών από μετρήσεις κοντινού μαγνητικού πεδίου. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς και άλλες στοχαστικές τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) και η διαφορική εξέλιξη (Differential Evolution).

3.4 Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων - Particle Swarm Optimization (PSO)

Η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους μονάδων (PSO) είναι μια σχετικά νέα στοχαστική τεχνική εξελικτικού υπολογισμού η οποία βασίζεται στην κίνηση και τη νοημοσύνη των σμηνών [25]. Αναπτύχθηκε το 1995 από τους Kennedy και Eberhart. Η μέθοδος (PSO) στήριξε την καινοτομία της στην κίνηση ενός σμήνους μελισσών (σωματιδίων) σε μια περιοχή. Ο στόχος των σωματιδίων είναι να βρουν τη βέλτιστη θέση σε ένα δεδομένο χώρο αναζήτησης. Τα σωματίδια αρχίζουν να ψάχνουν το χώρο αναζήτησης σε τυχαία σημεία και κινούνται επίσης με τυχαίες ταχύτητες. Αυτή η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως φάση αρχικοποίησης [13]. Οι ταχύτητες αλλάζουν σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου λαμβάνοντας υπ' όψιν όχι μόνο τη βέλτιστη λύση του καθενός μεμονωμένου σωματιδίου (personal optimum), αλλά ταυτόχρονα και τη βέλτιστη λύση που έχει συναντήσει όλο το σμήνος (global optimum). Οι ταχύτητες των σωματιδίων επίσης εξαρτώνται από το κατά πόσο απαιτείται η σύγκλιση σε μια βέλτιστη λύση ή αν η πλήρης εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης είναι κυρίαρχη. Το ισοζύγιο μεταξύ της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης και της εκμετάλλευσης της πιθανής βέλτιστης λύσης παρακολουθείται από δύο παράγοντες που καθορίζουν ποια επιλογή είναι κυρίαρχη [45]. Καθώς ο αλγόριθμος PSO ξετυλίγεται και τα σωματίδια διερευνούν το χώρο αναζήτησης, η παγκόσμια και η προσωπική λύση του κάθε σωματιδίου ενδέχεται να επικαιροποιηθούν, με αποτέλεσμα την ενημέρωση της ταχύτητας του κάθε σωματιδίου. Τέλος, τα σωματίδια συγκλίνουν προς τη βέλτιστη λύση. Οι παράμετροι της PSO και οι αντίστοιχες οντότητές της περιγράφονται παρακάτω:

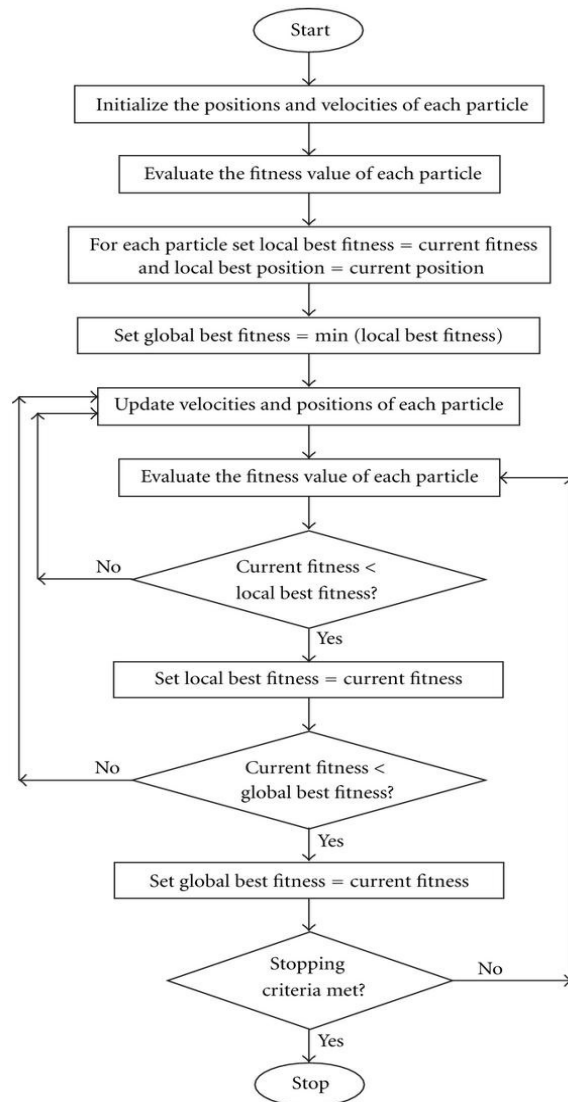
- *Σωματίδιο (particle) ή πράκτορας (agent)*: Κάθε ξεχωριστό άτομο στο σμήνος. Όλα τα σωματίδια ξεκινούν από τυχαίες θέσεις και μετακινούνται προς τις κατευθύνσεις (α) της προσωπικής βέλτιστης λύσης και (β) της βέλτιστης λύσης όλου του σμήνους.
- *Θέση (position)*: Η θέση αναφέρεται στη θέση ενός σωματιδίου στον χώρο αναζήτησης, που αντιπροσωπεύεται από ένα διάνυσμα ($6 \times M$) \mathbf{D}_i . Τα στοιχεία του αντιπροσωπεύουν τις θέσεις και τις μαγνητικές ροπές κάθε διπόλου, δηλαδή τα στοιχεία του \mathbf{D}_i είναι $(x_i, y_i, z_i, m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i})$, $i = 1, 2, \dots, M$. Αυτή ο χώρος ($6 \times M$) - διαστάσεων είναι ο χώρος λύσης για το πρόβλημα υπό βελτιστοποίηση, όπου κάθε σύνολο M διανυσμάτων αντιπροσωπεύει μια λύση στο πρόβλημα. Συνεπώς, οι τιμές των μεταβλητών που βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να καθοριστούν.
- *Καταλληλότητα (fitness)*: στην τεχνική PSO, μια αντικειμενική συνάρτηση πρέπει ουσιαστικά να αξιολογήσει την επάρκεια, την αποδοτικότητα και την επίδοση μιας θέσης \mathbf{D}_i . Η αντικειμενική συνάρτηση καταλληλότητας λαμβάνει υπ' όψιν όλες τις θέσεις

των διπόλων στο χώρο αναζήτησης και επιστρέφει ένα μοναδικό αριθμό που αξιολογεί αυτή τη θέση \mathbf{D}_i . Στην παρούσα μελέτη, η αντικειμενική συνάρτηση καταλληλότητας αντιπροσωπεύεται από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ του μετρούμενου και του υπολογιζόμενου μαγνητικού πεδίου: φυσικά ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του RMS σφάλματος.

- *pbest*: Η θέση (\mathbf{D}_i) με την χαμηλότερη τιμή καταλληλότητας που συναντάται από κάθε μεμονωμένο σωματίδιο είναι γνωστή ως η βέλτιστη προσωπική λύση ή *pbest*. Σε κάθε επανάληψη, καθώς ο πράκτορας μετακινείται στον χώρο αναζήτησης, συγκρίνει την τιμή καταλληλότητας της τρέχουσας θέσης του με εκείνη της *pbest*. Αν η τρέχουσα θέση έχει χαμηλότερη τιμή καταλληλότητας, η βέλτιστη προσωπική λύση αντικαθίσταται από τον τρέχουσα θέση.
- *gbest*: Η θέση (\mathbf{D}_i) με την χαμηλότερη τιμή καταλληλότητας που συναντάται από όλα τα σωματίδια του πληθυσμού (σμήνους) είναι γνωστή ως η βέλτιστη καθολική θέση ή *gbest*. Σε κάθε επανάληψη, καθώς ο πράκτορας μετακινείται μέσα στο χώρο αναζήτησης, συγκρίνει επίσης την τιμή καταλληλότητας της τρέχουσας θέσης της με εκείνη της *gbest*. Αν η τρέχουσα θέση έχει χαμηλότερη τιμή καταλληλότητας, η *gbest* αντικαθίσταται με την τρέχουσα θέση του. Προφανώς, σε κάθε επανάληψη υπάρχει μόνο ένα μία *gbest*.

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της PSO που φαίνεται στο Σχήμα 3.2 μπορεί να περιγραφεί:

1. Αρχικοποίηση ενός πληθυσμού σωματιδίων με τυχαίες θέσεις και ταχύτητες στο χώρο λύσης (solution space) ($6 \times M$) - διαστάσεων.
2. Υπολογισμός της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε μεμονωμένο σωματίδιο.
3. Για κάθε σωματίδιο, η τρέχουσα τιμή καταλληλότητας ορίζεται η βέλτιστη και η τρέχουσα θέση \mathbf{D}_i ορίζεται η βέλτιστη προσωπική λύση (local optimum) ή *pbest*.
4. Σύγκριση των τιμών καταλληλότητας σε όλο τον πληθυσμό των σωματιδίων και η μικρότερη τιμή ορίζεται ότι είναι η βέλτιστη τιμή καταλληλότητας όλου του σμήνους και η θέση του σωματιδίου η βέλτιστη καθολική θέση (global optimum) ή *gbest*.
5. Ενημέρωση της ταχύτητας και της θέσης κάθε σωματιδίου.
6. Υπολογισμός της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε μεμονωμένο σωματίδιο.
7. Εάν η τρέχουσα τιμή καταλληλότητας κάποιου σωματιδίου είναι μικρότερη από την προηγούμενη βέλτιστή του, τότε η βέλτιστη προσωπική του λύση (*pbest*) αντικαθίσταται από την τρέχουσα θέση.



ΣΧΗΜΑ 3.2: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO.

8. Εάν η τρέχουσα τιμή καταλληλότητας κάποιου σωματιδίου είναι μικρότερη από τη βέλτιστη τιμή καταλληλότητας όλου του σμήνους τότε η βέλτιστη καθολική θέση *gbest* αντικαθίσταται από την τρέχουσα θέση.
9. Επιστροφή στο βήμα 5 μέχρι να πραγματοποιηθεί κάποια συνθήκη τερματισμού, συνήθως κάποια ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης καταλληλότητας ή μέχρι να ολοκληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων.

3.5 Εφαρμογή του αλγορίθμου στην πρόβλεψη πολλαπλών διπόλων

Για να καθορισθεί το υπό εξέταση πρόβλημα πρόβλεψης μαγνητικών διπόλων, ένας πίνακας \mathbf{B}_{meas} δημιουργείται, έχοντας διαστάσεις $(3 \times N_{mag})$. Τα στοιχεία του αντιπροσωπεύουν τιμές των συνιστωσών του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου στα σημεία παρατήρησης $j = 1, 2, \dots, N_{mag}$. Ένας πίνακας \mathbf{B}_{iter} $(3 \times N_{mag})$ επίσης δημιουργείται για να συμπεριλάβει το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο κάθε σωματιδίου σε κάθε επανάληψη. Όπως ο αλγόριθμος αναπτύσσεται, κάθε πράκτορας ενημερώνει τη θέση του και στη συνέχεια οι νέες τιμές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του πεδίου \mathbf{B}_{iter} και της αντικειμενικής συνάρτησης καταλληλότητας F χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.3) - (3.6). Οι θέσεις και οι ταχύτητες των σωματιδίων επιλέγονται αρχικά τυχαία. Μετά από την αξιολόγηση της καταλληλότητας της βέλτιστης προσωπικής λύσης ($pbest$) και της βέλτιστης καθολικής λύσης ($gbest$), η θέση του στοιχείου k του διπόλου i (που αντιστοιχεί στο αντίστοιχο στοιχείο του \mathbf{D}_i) στην επανάληψη l είναι:

$$p_{ki}^{(l)} = p_{ki}^{(l-1)} + v_{ki}^{(l)} \quad (3.7)$$

και η ταχύτητα του στοιχείου k του διπόλου i , $v_{ki}^{(l)}$, στην επανάληψη l υπολογίζεται ως εξής:

$$v_{ki}^{(l)} = w \cdot v_{ki}^{(l-1)} + c_1 \cdot rand \cdot (pbest_{ki}^{(l-1)} - p_{ki}^{(l-1)}) + c_2 \cdot rand \cdot (gbest_k^{(l-1)} - p_{ki}^{(l-1)}) \quad (3.8)$$

Η μεταβλητή w αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά της ταχύτητας της προηγούμενης επανάληψης, και οι c_1 και c_2 είναι παράμετροι του αλγορίθμου που καθορίζουν τη στάθμιση μεταξύ της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης και της αξιοποίησης της βέλτιστης λύσης. Στην παρούσα εργασία, μετά από εκτενείς προσομοιώσεις, οι κατάλληλες τιμές των προαναφερθέντων παραγόντων επιλέγονται $c_1 = c_2 = 2$ και $w = 0.5$ [23]. Η συνάρτηση $rand$ παράγει ομοιόμορφα κατανομημένους τυχαίους αριθμούς στο διάστημα $[0, 1]$.

Καθώς ο αλγόριθμος εκτυλίσσεται, οι θέσεις και οι ταχύτητες των σωματιδίων ενημερώνονται συνεχώς με αποτέλεσμα τη συνεχή ενημέρωση του πίνακα \mathbf{B}_{iter} που περιλαμβάνει τις τιμές του μαγνητικού πεδίου από τις διάφορες θέσεις (\mathbf{D}_i) των σωματιδίων. Ομοίως, ενημερώνονται και δύο πίνακες \mathbf{B}_{pbest} και \mathbf{B}_{gbest} οι οποίοι περιλαμβάνουν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη βέλτιστη λύση κάθε σωματιδίου $pbest$ και από τη βέλτιστη λύση όλων των σωματιδίων $gbest$ αντίστοιχα.

Η αντικειμενική συνάρτηση που αξιολογεί την καταλληλότητα της λύσης ορίζεται από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού

πεδίου που παράγεται από την εκάστοτε λύση:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^3 \sum_{j=1}^{N_{mag}} (\mathbf{B}_{iter_{nj}} - \mathbf{B}_{meas_{nj}})^2}{3 \cdot M}} \quad (3.9)$$

Η μεταβλητή $n = 1, 2, 3$ αντιπροσωπεύει τους άξονες x, y, z , καθώς τα μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται μετρούν το μαγνητικό πεδίο στις 3 συνιστώσες B_x, B_y και B_z . Προφανώς, εάν η καταλληλότητα μιας λύσης είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη καταλληλότητα της $pbest$, τότε η $pbest$ αντικαθίσταται από την τρέχουσα λύση. Το ίδιο συμβαίνει και για τη λύση $gbest$.

Κεφάλαιο 4

Μελέτη Μετρητικών Διατάξεων

4.1 Εισαγωγή

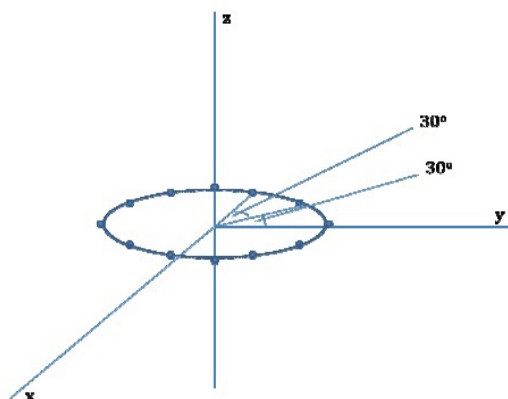
Στο παρόν κεφάλαιο μελετώνται ποικίλες γεωμετρίες μετρητικών διατάξεων αποτελούμενων από πολλαπλά μαγνητόμετρα που ταυτόχρονα καταγράφουν τη μαγνητική υπογραφή μιας συσκευής. Οι διάφορες διατάξεις αξιολογούνται με προσομοιωμένες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου που δημιουργούνται από εικονικές διπολικές πηγές.

4.2 Γεωμετρία των διατάξεων

Οι παράμετροι των μαγνητικών πηγών που πρόκειται να καθοριστούν είναι η θέση κάθε διπόλου (x, y, z) και η μαγνητική ροπή του (m_x, m_y, m_z) . Δεδομένου ότι οι παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι 6 για κάθε πηγή διπόλου και το μαγνητόμετρο τριών αξόνων μετρά τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (3 τιμές πεδίου B_x, B_y, B_z), η ακριβής πρόβλεψη ενός μικρού αριθμού μαγνητικών διπόλων, είναι δυνατή ακόμη και με μικρό αριθμό μαγνητομέτρων. Ωστόσο, οι σύνθετες συσκευές μπορούν να αποτελούνται από περισσότερα από ένα μαγνητικά δίπολα και ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν αυξάνουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Συνεπώς, είναι επιτακτική η χρήση πολλών μαγνητομέτρων που ταυτόχρονα καταγράφουν τη μαγνητική υπογραφή της συσκευής. Με βάση τα παραπάνω μελετώνται μετρητικές διατάξεις που αποτελούνται από 6 έως 12 μαγνητόμετρα τριών αξόνων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των παραμέτρων έως και 5 μαγνητικών διπόλων. Όσον αφορά τη γεωμετρία της μετρητικής διάταξης, τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε διάφορες γωνίες, ύψη και ακτίνες.

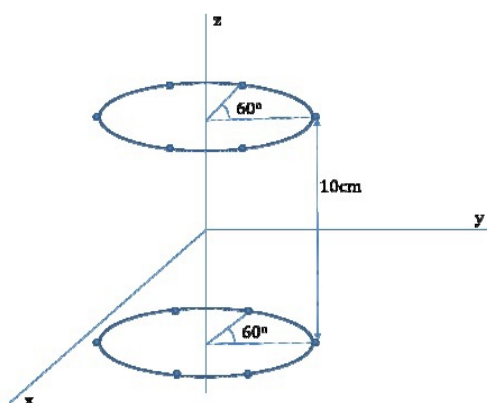
- Διάταξη 1: Όλα τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε έναν κύκλο στο ίδιο ύψος με το τραπέζι στο οποίο τοποθετείται η συσκευή υπό μέτρηση ($z = 0$), όπως απεικονίζεται

στο Σχήμα 4.1, υπό γωνίες $360^\circ/n$, $n = 1, 2, \dots, N_{mag}$. Το χαρακτηριστικό της γεωμετρίας αυτής είναι η ομοιότητα με την ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση MCF με τη διαφορά ότι στην τελευταία εγκατάσταση, το τραπέζι (άρα και η συσκευή) εκτελεί μια πλήρη περιστροφή 360° ενώ ένα σταθερό μαγνητόμετρο μετράει το μαγνητικό πεδίο ανά 10° .



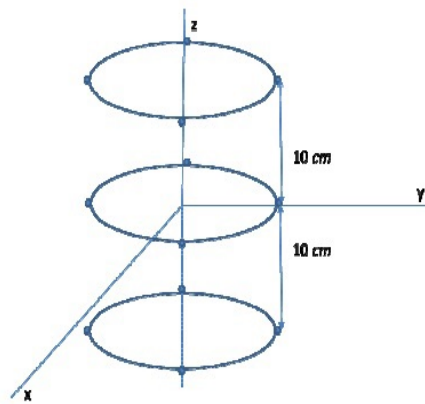
ΣΧΗΜΑ 4.1: Διάταξη 1 με 12 σημεία παρατήρησης: ένας κύκλος στο επίπεδο της περιστρεφόμενης τράπεζας.

- Διάταξη 2: Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε δύο κύκλους με ίσες ακτίνες σε διαφορετικά ύψη (για παράδειγμα $z = 10$ και $z = -10$ cm). Τα μαγνητόμετρα που είναι τοποθετημένα σε $z = 10$ cm βρίσκονται σε γωνίες $[(n-1) \cdot 180^\circ]/(N_{mag}/2)$, $n = 1, 3, \dots, N_{mag}-1$, σε γωνίες $60^\circ + [(h-2) \cdot 180^\circ]/(N_{mag}/2)$, $h = 2, 4, \dots, N_{mag}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα της μέτρησης του μαγνητικού σε δύο επίπεδα, πάνω και κάτω από τη συσκευή, επιτυγχάνοντας καλύτερη κάλυψη της μαγνητικής της υπογραφής.



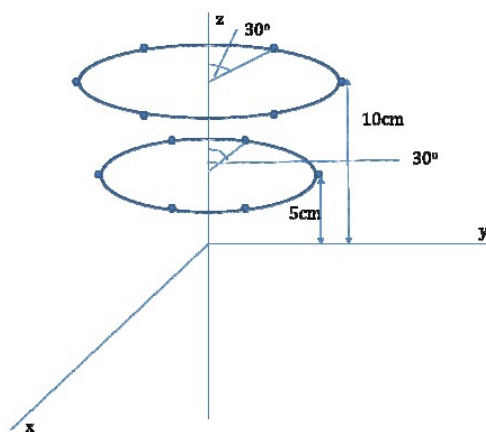
ΣΧΗΜΑ 4.2: Διάταξη 2 με 12 σημεία παρατήρησης: δύο κύκλοι 6 μαγνητομέτρων κάτω και πάνω από το επίπεδο της συσκευής.

- Διάταξη 3: Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε τρεις κύκλους με ίσες ακτίνες σε διαφορετικά ύψη (για παράδειγμα σε $z = 10, 0, -10$ cm) και σε γωνίες $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Ο στόχος της διάταξης αυτής είναι να αυξήσει περαιτέρω την κάλυψη του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τη συσκευή.



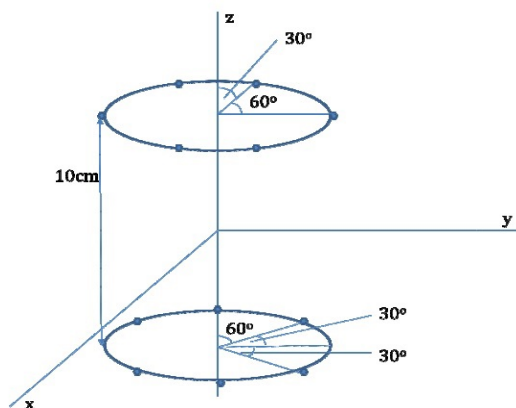
ΣΧΗΜΑ 4.3: Διάταξη 3 με 12 σημεία παρατήρησης: τρεις κύκλοι 4 μαγνητομέτρων κάτω, πάνω και στο επίπεδο του τραπεζιού της συσκευής.

- Διάταξη 4: Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε δύο κύκλους με διαφορετικές ακτίνες (για παράδειγμα 40 και 38 cm) και σε δύο διαφορετικά ύψη (για παράδειγμα $z = 10$ και $z = 15$ cm), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι η έμμεση πληροφορία για τη βάρθρωση του μαγνητικού πεδίου που προέρχεται από τη συσκευή. Πράγματι, εφόσον τα ζεύγη μαγνητομέτρων στους δύο διαφορετικούς κύκλους είναι τοποθετημένα σε κοντινή απόσταση, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο τανυστής της βάρθρωσης του μαγνητικού πεδίου καθώς και η μείωση του τελευταίου σε σχέση με την απόσταση παρατήρησης.



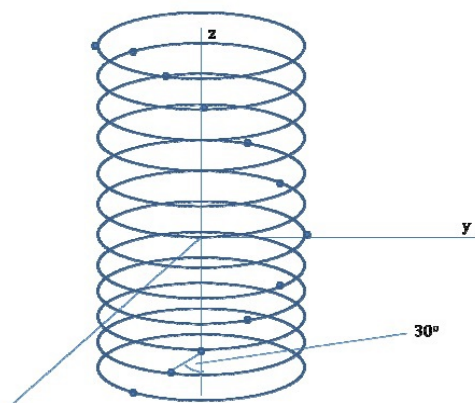
ΣΧΗΜΑ 4.4: Διάταξη 4 με 12 σημεία παρατήρησης: δύο κύκλοι 6 μαγνητομέτρων με διαφορετικές ακτίνες και σε διαφορετικά ύψη πάνω από το επίπεδο του τραπεζιού.

- Διάταξη 5: Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε δύο κύκλους με ίσες ακτίνες σε διαφορετικά ύψη (για παράδειγμα $z = 10$ και $z = -10$ cm). Τα μαγνητόμετρα που είναι τοποθετημένα σε $z = 10$ cm βρίσκονται σε γωνίες $[(n - 1) \cdot 180^\circ]/(N_{mag}/2)$, $n = 1, 3, \dots, N_{mag} - 1$, ενώ τα μαγνητόμετρα στον κάτω κύκλο βρίσκονται σε γωνίες $30^\circ + [(h - 2) \cdot 180^\circ]/(N_{mag}/2)$, $h = 2, 4, \dots, N_{mag}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Η παρούσα διάταξη είναι όμοια με τη διάταξη 2, αλλά ο κάτω κύκλος είναι περιστραμμένος κατά 30° , ουσιαστικά παρέχοντας πληροφορίες για το μαγνητικό πεδίο σε διαφορετικές γωνίες και συνεπώς, εξασφαλίζοντας καλύτερη κάλυψη της συσκευής.



ΣΧΗΜΑ 4.5: Διάταξη 5 με 12 σημεία παρατήρησης: δύο κύκλοι 6 μαγνητομέτρων κάτω και πάνω από το επίπεδο της περιστρεφόμενης τράπεζας - ο κάτω κύκλος έχει περιστραφεί κατά γωνία 30° .

- Διάταξη 6: Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε διαφορετικές γωνίες και ύψη, σχηματίζοντας ένα ελικοειδές σχήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, επιτυγχάνοντας βέλτιστη κάλυψη της μαγνητικής υπογραφής γύρω από τη συσκευή υπό εξέταση.



ΣΧΗΜΑ 4.6: Διάταξη 6 με 12 σημεία παρατήρησης: ελικοειδής δομή γύρω από το EUT.

4.3 Προσομοιωμένες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου

Δεδομένου ότι στη φάση μελέτης των μετρητικών διατάξεων της προηγούμενης ενότητας πραγματικές μετρήσεις δεν ήταν διαθέσιμες, οι προτεινόμενες μέθοδοι δοκιμάζονται με τη χρήση προσομοιωμένων μετρήσεων μαγνητικού πεδίου. Για να δημιουργηθούν αυτές οι προσομοιωμένες μετρήσεις, χρησιμοποιούνται εικονικές διπολικές πηγές (οι παράμετροι κάθε πηγής διπόλου είναι η θέση της x, y, z και η μαγνητική ροπή της m_x, m_y, m_z) για τη δημιουργία των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου σε προκαθορισμένες θέσεις (θέσεις μαγνητομέτρων), χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του μαγνητικού διπόλου (3.3) - (3.6). Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου στη συνέχεια παραμορφώνονται κατά μέγιστο q σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} B_{\text{distorted}x_j} &= B_{d_{xj}} + q \cdot (\text{rand} - \text{rand})B_{d_{xj}} \\ B_{\text{distorted}y_j} &= B_{d_{yj}} + q \cdot (\text{rand} - \text{rand})B_{d_{yj}} \\ B_{\text{distorted}z_j} &= B_{d_{zj}} + q \cdot (\text{rand} - \text{rand})B_{d_{zj}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

όπου το q αντιπροσωπεύει το μέγιστο ποσοστό παραμόρφωσης, το rand παίρνει τυχαίες τιμές στο διάστημα $[0,1]$ ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή και $B_{d_{xj}}, B_{d_{yj}}, B_{d_{zj}}$ είναι οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου της εικονικής διπολικής πηγής που παράγονται από την εξίσωση (3.3). Η εξίσωση (4.1) εισάγει σχετικό θόρυβο στο μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα παραμορφωμένες τιμές των συνιστωσών του. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που μπορεί να προκαλέσει αβεβαιότητα κατά τη διαδικασία μέτρησης είναι η ακρίβεια της σχετικής απόστασης μεταξύ της συσκευής υπό εξέταση και του μετρητικού εξοπλισμού [22]. Για να ποσοτικοποιηθεί η αβεβαιότητα που σχετίζεται με αυτή τη σχετική απόσταση, οι θέσεις των μαγνητομέτρων μετατοπίζονται τυχαία με μέγιστο 1 mm. Για τη διεξαγωγή της ανάλυσης αυτής, η συσκευή υπό εξέταση θεωρείται ότι αποτελείται από τρία εικονικά δίπολα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται 20 φορές (αντιπροσωπευτικό δείγμα στιγμιотύπων). Το μέσο ποσοστό διαφοράς μεταξύ των τιμών του μαγνητικού πεδίου που μετρήθηκαν στην αρχική και στη μετατοπισμένη θέση μαγνητομέτρου είναι 1,46%. Δεδομένου ότι η μόνη πηγή αβεβαιότητας που ποσοτικοποιείται μέσω αυτής της διαδικασίας είναι η σχετική απόσταση μεταξύ των διπολικών πηγών και των μαγνητόμετρων και άλλες πιθανές πηγές αβεβαιότητας (π.χ. θόρυβος μαγνητόμετρου, θερμοκρασία, υγρασία, θόρυβος περιβάλλοντος κλπ.) δεν λαμβάνονται υπόψη, θεωρείται ότι μέγιστο ποσοστό παραμόρφωσης της τάξης του 5% επαρκεί για την προσομοίωση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τις διαδικασίες μέτρησης [5]. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη λαμβάνεται υπόψη ένα μέγιστο ποσοστό παραμόρφωσης 10% για την προσομοίωση ακραίων σεναρίων, όπου στις μετρήσεις ενσωματώνεται υπερβολικός θόρυβος και δεν μπορεί να διαχωριστεί από το χρήσιμο σήμα.

Επιπλέον, οι παραπάνω μετρητικές διατάξεις ελέγχθηκαν παρουσία αθροιστικού θορύβου περιβάλλοντος μαζί με τις παραμορφωμένες τιμές μαγνητικού πεδίου της εξίσωσης (4.1) και οδηγεί σε προσομοιώσεις μαγνητικών μετρήσεων. Ο θόρυβος περιβάλλοντος ελήφθη από κανονική κατανομή με μέση $\mu = 0$ και τυπική απόκλιση $\sigma = 1$ nT, αντανακλώντας πραγματικό θόρυβο μέτρησης στην περιοχή των 250 pT - 1 nT και είναι διαφορετικός για τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου που υπολογίζονται σε κάθε μαγνητόμετρο.

4.4 Κριτήρια αξιολόγησης των λύσεων

Κατά τη διάρκεια της μελέτης δοκιμάστηκαν όλες οι πιθανές διατάξεις σε περιπτώσεις των προσομοιωμένων μαγνητικών μετρήσεων. Έμφαση δίνεται στα αποτελέσματα προσομοίωσης στα πλαίσια αυτών των σεναρίων, αφού η βέλτιστη μετρητική διάταξη θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τις πραγματικές μετρήσεις. Επιπλέον, εξετάστηκε η πιθανότητα απόκτησης πολλαπλών στιγμιότυπων κατά τη διάρκεια κάθε μέτρησης ως πιθανή διαδικασία αποθρομβοποίησης. Η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων ελέγχθηκε σε διάφορες περιπτώσεις σχετικά με τον αριθμό των μαγνητομέτρων και τις διατάξεις. Για να προσδιοριστεί αν μια λύση είναι αποδεκτή ή όχι, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κριτήρια αξιολόγησης:

1. Η σχετική απόκλιση μεταξύ των συνολικών μετρούμενων και των μοντελοποιημένων μαγνητικών πεδίων μπορεί να περιγραφεί:

$$C_1 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_{mag}} (\Delta B_{x_j}^2 + \Delta B_{y_j}^2 + \Delta B_{z_j}^2)}{\sum_{j=1}^{N_{mag}} (B_{x_j}^2 + B_{y_j}^2 + B_{z_j}^2)}} \quad (4.2)$$

όπου $B_{x_j}, B_{y_j}, B_{z_j}$ αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου στο j σημείο παρατήρησης και $\Delta B_{x_j}, \Delta B_{y_j}, \Delta B_{z_j}$ υποδηλώνουν τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων συνιστωσών του πεδίου και αυτών που παράγονται από το πολλαπλό διπολικό μοντέλο. Το κριτήριο αυτό ονομάζεται και καταλληλότητα προσρμογής (Goodness of fit).

2. Απόκλιση μεταξύ της θέσης των διπολικών πηγών που προκύπτει από τη διαδικασία μοντελοποίησης από τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου και της πραγματικής θέσης του αντικειμένου δοκιμής σε σχέση με τα μαγνητόμετρα. Αυτό ισοδυναμεί με τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής θέσης και της υπολογιζόμενης θέσης του μοντέλου

$(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ και υπολογίζεται ως εξής:

$$C_2 = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (4.3)$$

Οι ακόλουθοι περιορισμοί των κριτηρίων αξιολόγησης κρίνονται επαρκείς για την προσαρμογή του μοντέλου στα μετρούμενα δεδομένα της μαγνητικής υπογραφής:

- $C_1 < 10\%$
- $C_2 < 5 \text{ mm}$

υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο πολλαπλών μαγνητικών διπόλων μπορεί ουσιαστικά να αντιπροσωπεύει τη μετρηθείσα μαγνητική υπογραφή μιας μονάδας εξοπλισμού.

4.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Ως αντικείμενα δοκιμής, οι περιπτώσεις που εξετάζονται περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται σε:

- ένα δίπολο με μικρή μαγνητική ροπή (περίπου 2 mAm^2).
- 2 δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές (περίπου 30 mAm^2 η καθεμία), χωρισμένα κατά 20 cm .
- 2 δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές (περίπου 30 mAm^2 η καθεμία), χωρισμένα κατά 20 cm .
- 2 διπόλα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές διαχωρισμένα κατά 7 mm , δίνοντας μια μαγνητική τετραπολική ροπή περίπου 0.15 mAm^3 .
- Ένα πηνίο τροφοδοσίας ρεύματος (το ρεύμα του πηνίου τροφοδοτείται από ζεύγος συνεστραμμένων συρμάτων) που παράγει μαγνητική διπολική ροπή περίπου 69 mAm^2 .

Χρησιμοποιούνται εικονικές πηγές διπόλου προκειμένου να δημιουργηθεί το θεωρητικό μαγνητικό πεδίο στα σημεία παρατήρησης, το οποίο έπειτα παραμορφώνεται μέσω της εξίσωσης (4.1). Επιπροσθέτως, ο αυθροιστικός θόρυβος περιβάλλοντος υπερκαλύπτει τις τιμές των παραμορφωμένων μαγνητικών πεδίων, καταλήγοντας στις προσομοιώσεις μαγνητικών μετρήσεων. Αυτές οι “μετρήσεις” στη συνέχεια τροφοδοτούνται σε έναν αλγόριθμο για την πρόβλεψη των παραμέτρων του διπολικού μοντέλου. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μη γραμμικές στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης (PSO) και η εφαρμογή του στο πρόβλημα

πρόβλεψης πολλαπλών διπόλων παρουσιάζεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το εκτιμώμενο μοντέλο πολλαπλών διπόλων στη συνέχεια αξιολογείται με βάση τα κριτήρια που παρουσιάζονται στην προηγούμενη υποενότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θεωρητικές παράμετροι των εικονικών διπόλων (θέσεις και ροπές των μαγνητικών πηγών) που χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις αυτές είναι ενδεικτικές. Παρόμοια συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων διατάξεων επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους εικονικών διπόλων.

Όσον αφορά την έννοια της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων των δοκιμών, ορισμένες παράμετροι των εικονικών μαγνητικών διπόλων μεταβάλλονται προκειμένου να εξεταστεί η ικανότητα των προτεινόμενων διατάξεων να προβλέψουν με ακρίβεια τη μαγνητική συμπεριφορά τους σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, οι θέσεις των μαγνητικών πηγών αντλούνται από από μια κανονική κατανομή μέσα στο διάστημα $[-20, 20]$ cm, διατηρώντας παράλληλα τις μαγνητικές ροπές τους σταθερές. Επιπλέον, ο θόρυβος περιβάλλοντος και η σχετική παραμόρφωση ποικίλλουν σε κάθε περίπτωση. Τα ποσοστά επιτυχίας για όλες τις προτεινόμενες ρυθμίσεις σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Αριθμός Διατάξης	C_1	C_2
1	100	98
2	96	96
3	98	98
4	100	98
5	96	100
6	100	98

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Ποσοστά επαναληψιμότητας του μοντέλου χρησιμοποιώντας τις μετρητικές διατάξεις υπό εξέταση.

Τα ποσοστά επαναληψιμότητας του προβλεπόμενου μοντέλου είναι ικανοποιητικά για όλες τις μετρητικές διατάξεις υπό εξέταση και η σύγκριση μεταξύ τους, όσον αφορά την επαναληψιμότητα της μοντελοποίησης, δεν εξάγει κάποιο σημαντικό συμπέρασμα. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι διατάξεις 5, 6 μπορούν να υλοποιηθούν με τον ίδιο σχεδιασμό αλλά απαιτούν πιο πολύπλοκη μηχανική κατασκευή, ενώ οι διατάξεις δοκιμών 1 και 2 είναι απλούστερης κατασκευής. Μία ακόμη παρατήρηση είναι ότι η αξιολόγηση των προαναφερθέντων ρυθμίσεων δίνεται στις έξι πιθανές διατάξεις σχετικά και όχι απόλυτα, με βάση όχι μόνο τα κριτήρια πρόβλεψης μοντέλου, αλλά και κριτήρια όπως ευκολία στη χρήση, πολυπλοκότητα της κατασκευής, κ.ά. Τα συμπεράσματα της παραπάνω ανάλυσης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής (Πίνακας 4.2):

- Όλες οι ρυθμίσεις δοκιμής παρέχουν ικανοποιητική πρόβλεψη του μοντέλου.

- Όλες οι διατάξεις δοκιμής δείχνουν συνέπεια όσον αφορά την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών.
- Οι διατάξεις δοκιμής 5 και 6 είναι πιο σύνθετες μηχανολογικές κατασκευές που οδηγούν σε μικρότερη ευκολία χρήσης από τον χειριστή.
- Η διάταξη δοκιμής 1 δεν παρέχει ευελιξία για μελλοντική χρήση.
- Οι διατάξεις δοκιμής 2 και 4 φαίνεται να είναι οι πιο αποτελεσματικές.

Αριθμός Διάταξης	1	2	3	4	5	6
Κριτήριο						
Ακρίβεια του υπολογιζόμενου μοντέλου	20	20	20	20	20	20
Επαναληψιμότητα του υπολογιζόμενου μοντέλου	10	20	10	15	10	10
Ευκολία στη χρήση (εργονομία)	6	12	12	12	6	9
Χρόνος προετοιμασίας για τη ρύθμιση της διάταξης	10	8	8	8	8	8
Δομική ακαμψία της κατασκευής	25	20	20	20	20	20
Κόστος κατασκευής	15	12	12	12	12	12
Πολυπλοκότητα της κατασκευής	20	20	12	16	12	12
Χρόνος για την ανάπτυξη της κατασκευής	12	12	12	12	9	9
Συντήρηση της κατασκευής	10	8	8	8	6	6
Ογκομετρική τρισδιάστατη κάλυψη γύρω από την περιοχή του EUT	4	12	12	16	16	16
Συνολική βαθμολογία	132	144	126	139	119	117
Συνολική βαθμολογία (ποσοστό)	73%	80%	70%	77%	66%	65%

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: Σύγκριση των διατάξεων υπό εξέταση.

4.6 Κατασκευή πολλαπλών μαγνητομέτρων

Με βάση την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, στην οποία εντοπίστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των πιθανών διατάξεων μαγνητομέτρων, αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε μια πρωτότυπη εγκατάσταση πολλαπλών μαγνητόμετρων (Multi Magnetometer Facility - proto MMF), προκειμένου να γίνει εφικτή η εφαρμογή πολλών διατάξεων. Τα κύρια στοιχεία της εγκατάστασης είναι:

- Όργανα μέτρησης που αποτελούνται από 12 αισθητήρες ροής Fluxgate Magnetometers και το απαιτούμενο σύστημα DAQ για τη συλλογή των μετρήσεων μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής υπό εξέταση.
- Το μηχανικό σύστημα στήριξης αποτελείται από μια δομή κοινού πάνελ για την υποστήριξη όλων των μηχανικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την υποδοχή των μαγνητομέτρων και την παροχή της ακτινικής και κατακόρυφης ικανότητας κίνησης τους και, επίσης, το τραπέζι τοποθέτησης της συσκευής.
- Μια εφαρμογή λογισμικού για τον έλεγχο της λειτουργίας της εγκατάστασης και για την παροχή του υπολογιζόμενου πολλαπλού διπολικού μοντέλου.

4.6.1 Μεθοδολογία Μέτρησης και Συλλογής Δεδομένων

Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας μέτρησης της εγκατάστασης αυτής είναι η καταγραφή του στιγμιότυπου του μαγνητικού πεδίου μιας μονάδας εξοπλισμού παρουσία του μαγνητικού πεδίου της Γης και η παροχή αυτών των δεδομένων μέτρησης σε έναν αλγόριθμο MDM ώστε να υπολογίσει το πολλαπλό μοντέλο μαγνητικών διπόλων. Για να επιτευχθεί αυτό, ο συνολικός χρόνος μέτρησης είναι πολύ μικρός (λιγότερο από 1 min συνολικά) έτσι ώστε να αποφευχθούν σημαντικές μεταβολές του πεδίου περιβάλλοντος. Γενικά, η διαδικασία μέτρησης αποτελείται από μια σειρά από τις ακόλουθες μετρήσεις (A - B - A):

- Μέτρηση μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος χωρίς την παρουσία της συσκευής (Ambient before).
- Τοποθέτηση της συσκευής και μέτρηση της μαγνητικής της υπογραφής μαζί με το πεδίο περιβάλλοντος (EUT + Ambient).
- Απομάκρυνση της συσκευής και μέτρηση μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος (Ambient after)

. Παίρνοντας λοιπόν τη μέση τιμή του θορύβου περιβάλλοντος πριν και μετά την πραγματική μέτρηση (Ambient before + Ambient after/2), ο εξωτερικός θόρυβος κατά τη διάρκεια μέτρησης του μαγνητικού πεδίου της συσκευής μπορεί να αφαιρεθεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Αυτές οι τρεις διαδοχικές μετρήσεις θα πρέπει να εκτελούνται όσο το δυνατόν ταχύτερα για να μειωθούν οι επιδράσεις της μεταβολής του περιβάλλοντος χώρου στο αποτέλεσμα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου κάποιας μονάδας ή εξοπλισμού. Η εγκατάσταση πολλαπλών μαγνητομέτρων MMF συλλέγει μετρήσεις από όλα τα μαγνητόμετρα μέσα σε 1 sec για κάθε μία από τις παραπάνω μετρήσεις. Η τοποθέτηση και η αφαίρεση της συσκευής στο τραπέζι στήριξης θα πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα για να διατηρηθεί το σύντομο χρονικό διάστημα μέτρησης.

Με βάση τη φιλοσοφία της διαδικασίας μέτρησης και τη θεωρητική ανάλυση, τα μαγνητόμετρα είναι τριών αξόνων, παρέχοντας τις 3 συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου B_x , B_y , B_z σε ξεχωριστές εξόδους. Τα χρησιμοποιούμενα μαγνητόμετρα είναι αισθητήρες ροής υψηλής απόδοσης με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά και παρέχουν μετρήσεις ακριβείας σε στατικά και εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία. Τροφοδοτούνται από ειδικές μονάδες που περιέχουν επίσης το απαραίτητο κύκλωμα διέγερσης. Οι εξοδοί τους έχουν τη μορφή τριών αναλογικών τάσεων από 0 έως ± 10 V, ανάλογες με τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου B_x , B_y και B_z . Συγκεκριμένα, οι προδιαγραφές των 12 μαγνητόμετρων που είναι ενσωματωμένα στην κατασκευή είναι:

- Τύπος και Μοντέλα: Tri-axial Fluxgate Bartington Mag-03 MS100 (10 μονάδες) και Bartington Mag-03 MSL100 (2 μονάδες).
- Εύρος μέτρησης: ± 100 μ T.
- Ευαισθησία (εσωτερικός θόρυβος): 6 έως ≤ 10 $\text{pT}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$ σε 1 Hz (για μονάδες σειράς MS) και <6 $\text{pT}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$ σε 1 Hz (για μονάδες σειράς MSL).

Το σύστημα απόκτησης δεδομένων (DAQ) της εγκατάστασης πολλαπλών μαγνητόμετρων αποτελείται από δύο πανομοιότυπες μονάδες λήψης δεδομένων πολλαπλών λειτουργιών και έχει προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της διαδικασίας μέτρησης. Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Υποστηρίζει την απόκτηση δεδομένων από τα κανάλια αναλογικής εισόδου 12×3 , συνολικά 36.
- Παρέχει ανάλυση 18 bit.
- Δείκτης δειγματοληψίας ενός καναλιού 625 kSamples/s.
- Υποστηρίζει πολλαπλές λήψεις στιγμιότυπων μέσα σε 1 sec.
- Στέλνει τα δεδομένα στην εφαρμογή λογισμικού για την πρόβλεψη μοντέλου.

Με βάση τον παραπάνω εξοπλισμό, η ευαισθησία και ανάλυση της εγκατάστασης για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής είναι στο εύρος του 1 nT.

4.6.2 Μηχανικό σύστημα υποστήριξης

Ο στόχος της μηχανικής υποστήριξης των μαγνητομέτρων και του περιστρεφόμενου τραπέζιου είναι να παρέχει μια σταθερή και ακριβή λειτουργία με αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα

μετρήσεων. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει ένα κοινό πάνελ (βασισμένο σε άκαμπτο πλαίσιο) που φέρει τους μηχανισμούς μετατόπισης των μαγνητομέτρων και της περιστρεφόμενης τράπεζας που τοποθετείται η συσκευή υπό μέτρηση. Τα κύρια χαρακτηριστικά της μηχανικής κατασκευής είναι:

- Υποστηρίζει 12 μαγνητόμετρα σε προκαθορισμένες γωνίες (60° μεταξύ διαδοχικών ζευγών μαγνητομέτρων) για την υλοποίηση μιας συγκεκριμένης διάταξης μαγνητομέτρων. Τα μαγνητόμετρα μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε θέση πάνω ή κάτω από το επίπεδο του περιστρεφόμενου τραπέζιου.
- Υποστηρίζει ακτινική κίνηση των μαγνητομέτρων: $\sim 0-100$ cm σε σχέση με το κέντρο του τραπέζιου.
- Υποστηρίζει κάθετη κίνηση των μαγνητομέτρων στον άξονα z :
 - Από $z = 0$ έως το ύψος της συσκευής + 10 cm.
 - Από $z = 0$ έως $z = -20$ cm.
- Υποστηρίζει το τραπέζι στήριξης της συσκευής με κίνηση άξονα $z \pm 10$ cm και επίσης περιστρέφεται ανεξάρτητα από την μετατόπιση του άξονα z .
- Το τραπέζι στήριξης είναι εφοδιασμένο με πλέγμα από οπές με σπείρωμα διαχωρισμένες κατά 5 cm σε κάθε κατεύθυνση, επιτρέποντας την ακριβή τοποθέτηση της συσκευής.
- Η διάμετρος του τραπέζιου στήριξης είναι 50,5 cm.
- Οι μέγιστες διαστάσεις της συσκευής που μπορεί να τοποθετηθεί στο τραπέζι είναι $60 \times 60 \times 30$ cm³.
- Το μέγιστο βάρος της συσκευής μπορεί να είναι μέχρι 20 kg. Ωστόσο, είναι προτιμότερο οι βαρύτερες συσκευές να τοποθετούνται με το κέντρο βάρους τους πιο κοντά στο κέντρο του τραπέζιου. Ειδικές ράβδοι στήριξης περιστρεφόμενης πλάκας μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικά για την αύξηση της ικανότητας βάρους έως 50 kg.
- Το σύστημα συντεταγμένων της εγκατάστασης (Test Coordinate System) είναι ορθογώνιο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων, με άξονες που φέρουν τους x , y και z . Ο z άξονας είναι κατακόρυφος, κάθετος με την επιφάνεια της γης και προσανατολισμένος προς τα πάνω.
- Τα στοιχεία μηχανικής υποστήριξης για τα μαγνητόμετρα και το τραπέζι του EUT είναι κατασκευασμένα από μη μαγνητικά υλικά για την αποφυγή μαγνητικών διαταράξεων κατά τη διαδικασία της μέτρησης.

4.6.3 Ρεαλιστικές διατάξεις μαγνητομέτρων στην εγκατάσταση MMF

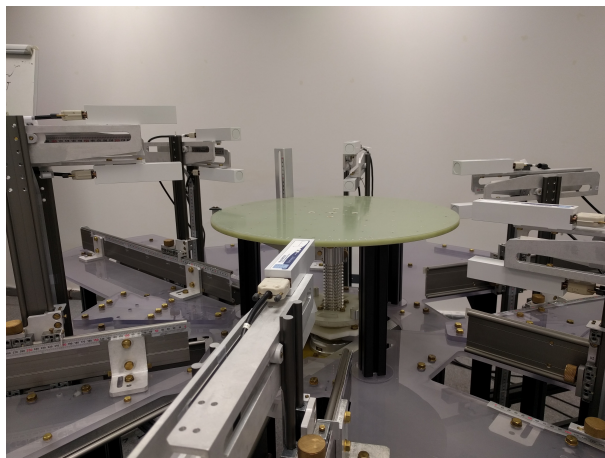
Παρακάτω παρουσιάζονται οι ρεαλιστικές διατάξεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν με την εγκατάσταση πολλαπλών μαγνητομέτρων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη θεωρητική ανάλυση καθώς και τους μηχανικούς περιορισμούς της κατασκευής.

- Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε δύο κύκλους με ίσες ακτίνες σε διαφορετικά ύψη, ουσιαστικά πραγματοποιώντας τη Διάταξη 2. Κάθε ζεύγος μαγνητομέτρων χωρίζεται από το επόμενο με γωνία 60° , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



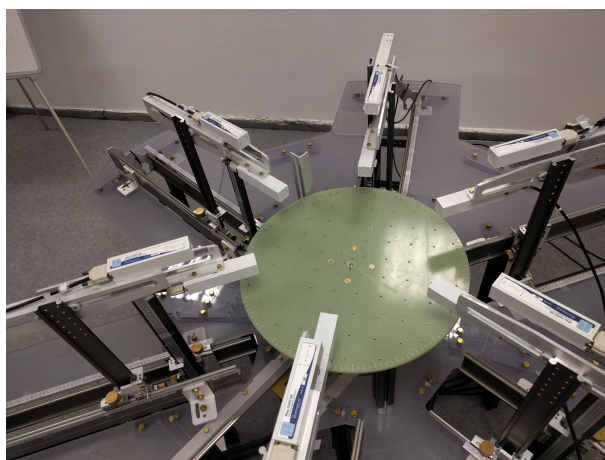
ΣΧΗΜΑ 4.7: Διάταξη με 12 μαγνητόμετρα και ακτίνα $r = 20$ cm.

- Μια διαφορετική διάταξη μέτρησης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8. Τα μαγνητόμετρα σχηματίζουν μια έλικα με ακτίνα $r = 30$ cm και τα αντίστοιχα ύψη είναι $z = 0, 4, 8, 12, 16, 20$ cm για τα 6 μαγνητόμετρα με προσανατολισμό προς τα πάνω και $z = -10, -6, -2, 2, 6, 10$ cm για τα μαγνητόμετρα με προσανατολισμό προς τα κάτω κύκλο, αποτελώντας μια παραλλαγή της μετρητικής διάταξης 6.



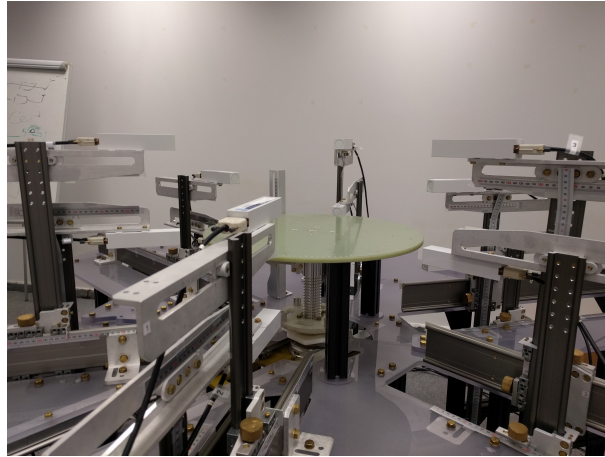
ΣΧΗΜΑ 4.8: Ελικοειδής διάταξη με 12 μαγνητόμετρα και ακτίνα $r = 30$ cm.

- Η διάταξη μέτρησης που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9 είναι ουσιαστικά η εφαρμογή της θεωρητικής διάταξης 4. Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε δύο κύκλους με διαφορετικές ακτίνες $r_1 = 20$ και $r_2 = 30$ cm σε δύο διαφορετικά ύψη $z = 10$ και $z = 20$ cm αντίστοιχα. Η τοποθέτηση των μαγνητομέτρων στους δύο διαφορετικούς κύκλους επιτρέπει τον υπολογισμό του τανυστή της βάθμωσης του μαγνητικού πεδίου από τις μετρήσεις κοντινών ζευγών μαγνητομέτρων.



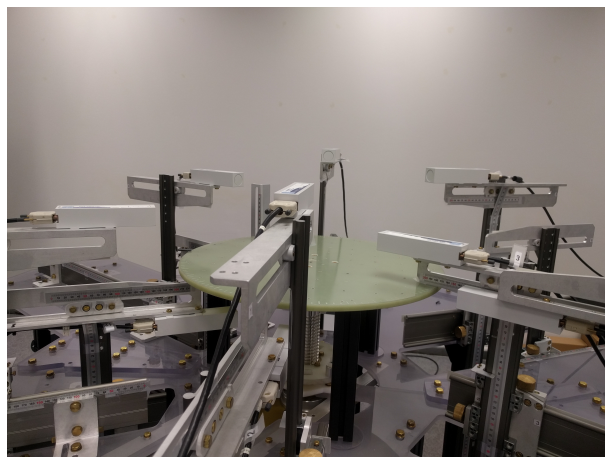
ΣΧΗΜΑ 4.9: Διάταξη με 12 μαγνητόμετρα και ακτίνες των δύο κύκλων $r_1 = 20$ και $r_2 = 30$ cm.

- Η διάταξη μέτρησης που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10 αποτελεί μια παραλλαγή της θεωρητικής μετρητικής διάταξης 3. Τα μαγνητόμετρα σχηματίζουν 4 κύκλους ακτίνας $r = 30$ cm ανά τριάδες και τα αντίστοιχα ύψη είναι $z = -10, 0, 10, 20$ cm.



ΣΧΗΜΑ 4.10: Διάταξη με 12 μαγνητόμετρα τοποθετημένα σε 4 κύκλους ακτίνας $r = 30$ cm.

- Τέλος, η ευελιξία στην ακτινική και κατακόρυφη κίνηση των μαγνητομέτρων επιτρέπει την πραγματοποίηση διαφόρων μη συμμετρικών διατάξεων μέτρησης. Μία τέτοια διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11, όπου τα μαγνητόμετρα βρίσκονται τοποθετημένα σε διάφορες ακτινικές αποστάσεις και σε διάφορα ύψη σχετικά με το κέντρο του τραπεζιού. Η παρούσα ρύθμιση επιβεβαιώνει την ευελιξία της εγκατάστασης MMF στη δημιουργία μιας μετρητικής διάταξης ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε συσκευής (διαστάσεις, χαμηλές τιμές μαγνητικής υπογραφής, κ.ά.).



ΣΧΗΜΑ 4.11: Διάταξη με 12 μαγνητόμετρα τοποθετημένα σε διάφορες ακτίνες και ύψη.

4.7 Συμπεράσματα

Η εγκατάσταση πολλαπλών μαγνητομέτρων MMF θεωρείται αποτελεσματική ως προς τη λειτουργικότητά της (ειδικά όσον αφορά τη λειτουργία μηχανικών εξαρτημάτων), αλλά επίσης

ως προς τη χρηστικότητα της και την ευελιξία της. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι η εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη ενός πολλαπλού μαγνητικού διπολικού μοντέλου με μεγάλη ακρίβεια, βελτιώνοντας την ακρίβεια των μαγνητικών μετρήσεων από ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις MCF και εξαλείφοντας τις διαταράξεις του μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος στη διάρκεια της περιστροφής.

Κεφάλαιο 5

Πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης

5.1 Εισαγωγή

Οι δοκιμαστικές περιπτώσεις που μετρήθηκαν και μοντελοποιούνται προκειμένου να επικυρωθεί και να επαληθευτεί η λειτουργία της κατασκευής MMF περιλαμβάνουν:

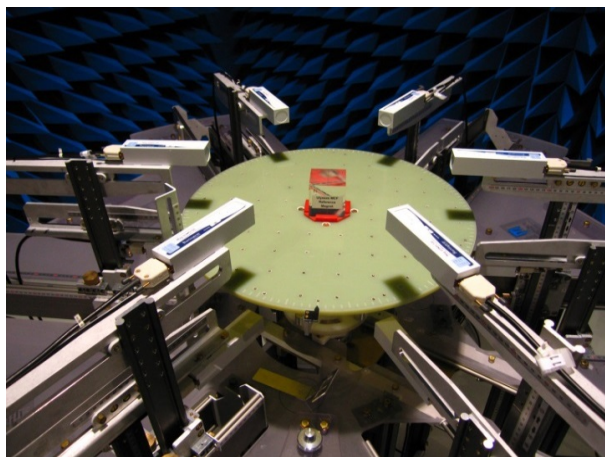
- Ένα δίπολο με μικρή μαγνητική ροπή (περίπου 2 mAm^2).
- Ένα δίπολο με ισχυρή μαγνητική ροπή - μαγνητικό δίπολο αναφοράς του Ulysses-MCF.
- Δύο δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές (περίπου 30 mAm^2 η καθεμία) που έχουν απόσταση μεταξύ τους 20 cm .
- Δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές (περίπου 30 mAm^2 η καθεμία) διαχωρισμένα κατά 20 cm .
- Ένα πηνίο τροφοδοσίας ρεύματος (το ρεύμα του πηνίου τροφοδοτείται από ζεύγος συνεστραμμένων συρμάτων) που παράγει μαγνητική διπολική ροπή περίπου 69 mAm^2 .
- Δύο διπόλα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές διαχωρισμένα κατά 7 mm που δίνουν μια μαγνητική τετραπολική ροπή περίπου 0.15 mAm^3 .

Τέλος, τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά, υπό την έννοια ότι όλες οι προαναφερθείσες μαγνητικές πηγές μετρήθηκαν επανειλημμένα και χαρακτηρίστηκαν σε διάφορες θέσεις πάνω στην περιστρεφόμενη τράπεζα για να διερευνηθεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Προφανώς, τα προκύπτοντα μοντέλα για όλα τα δίπολα και τα

τετράπολα των δοκιμαστικών αυτών πηγών είναι παρόμοια και κοντά στις πραγματικές τιμές όσον αφορά τη θέση τους (x, y, z) , ενώ είναι συνεπείς ως προς την εκτιμώμενη διπολική ροπή (m_x, m_y, m_z) . Επιπλέον, τα κριτήρια αξιολόγησης C_1 και C_2 πληρούνται σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμών.

5.2 Αποτελέσματα πραγματικών μετρήσεων

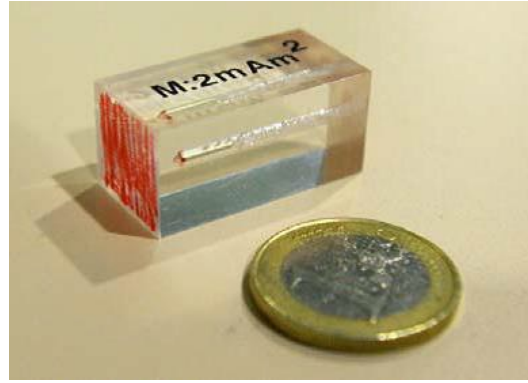
Η διάταξη 2 χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις με τη χρήση 12 μαγνητομέτρων. Η ακτίνα επιλέγεται να είναι αρχικά 20 cm από το κέντρο του περιστρεφόμενου τραπέζιου και για τους δύο κύκλους, ενώ τα ύψη είναι $z = 10$ cm και $z = -10$ cm για τους δύο κύκλους αντίστοιχα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Ασφαλώς, ανάλογα με τη μαγνητική υπογραφή της πηγής που πρόκειται να μετρηθεί, η διάταξη των μαγνητομέτρων ενδέχεται να αλλάξει για σηματοθορυβικούς λόγους. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι δεν εφαρμόζεται καμία διαδικασία βαθμονόμησης για τη θέση των 12 μαγνητομέτρων.



ΣΧΗΜΑ 5.1: Διάταξη 2 με 12 μαγνητόμετρα και ακτίνα $r = 20$ cm.

5.2.1 Δίπολο με ασθενή μαγνητική υπογραφή

Προκειμένου να μετρηθεί η ασθενής μαγνητική υπογραφή του διπόλου που φαίνεται στο Σχήμα 5.2, οι ακτίνες επιλέγονται σε απόσταση 10 cm από το κέντρο του περιστρεφόμενου τραπέζιου και για τους δύο κύκλους, ενώ τα ύψη είναι $z = 10$ cm και $z = -10$ cm για τον άνω και κάτω κύκλο αντίστοιχα. Στην παρούσα υποενοότητα παρουσιάζονται εκτεταμένα αποτελέσματα για μια μετρούμενη δοκιμαστική περίπτωση, εστιάζοντας στη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των μοντελοποιημένων μαγνητικών πεδίων, καθώς και στη διαφορά μεταξύ του θεωρητικού και του υπολογιζόμενου μοντέλου.



ΣΧΗΜΑ 5.2: Μαγνητικό δίπολο με ασθενή μαγνητική υπογραφή.

Η συγκεκριμένη μαγνητική πηγή είναι βαθμονομημένη έτσι ώστε η ροπή της να είναι προσανατολισμένη σε έναν άξονα μόνο (στη συγκεκριμένη μέτρηση ως προς τον άξονα z) και μηδενική ως προς τις άλλες κατευθύνσεις, έχοντας απόλυτη τιμή 2 mAm^2 .

Το μοντέλο που προκύπτει με τη χρήση του αλγορίθμου της PSO από τις μετρήσεις κοντινού πεδίου φαίνεται στον Πίνακα 5.1 και η προσαρμογή του μοντέλου (κριτήριο C_1) στον Πίνακα 5.2. Η εκτιμώμενη θέση του διπολικού μοντέλου είναι εμφανώς κοντά στην αντίστοιχη θεωρητική, έχοντας μέγιστη διαφορά 1 mm στους x και y άξονες, ενώ η πρόβλεψη του μοντέλου έχει επιτύχει συνολική καταλληλότητα προσαρμογής 2.1 % (κριτήριο C_1).

	Παράμετροι του διπόλου	Υπολογιζόμενο μοντέλο
x [cm]	7.5	7.4
y [cm]	2.5	2.6
z [cm]	0.9	0.9
m_x [mAm ²]	0	-0.003
m_y [mAm ²]	0	-0.002
m_z [mAm ²]	-2	-1.94
$ m $ [mAm ²]	-2	1.94

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: Πρόβλεψη μοντέλου - Δίπολο με ασθενή μαγνητική υπογραφή.

Προσαρμογή του μοντέλου (Goodness of fit)	
Συνολικό RMS των υπολοίπων [%]	2.1
Συνολικό RMS των υπολοίπων [nT]	1.531

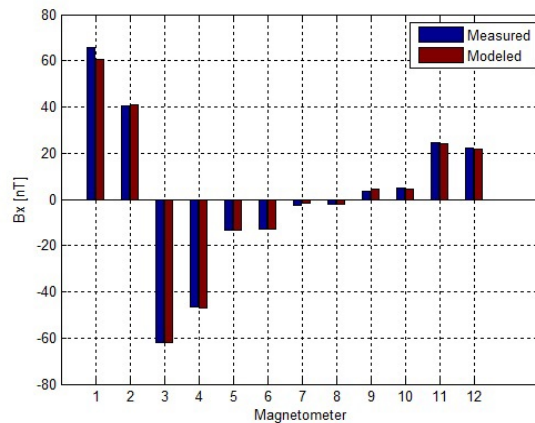
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: Δίπολο με ασθενή μαγνητική υπογραφή - Κριτήριο C_1 .

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι αναλυτικές τιμές της μετρούμενης μαγνητικής υπογραφής του διπόλου καθώς και το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το διπολικό μοντέλο. Είναι φανερό ότι οι τιμές του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου είναι πολύ χαμηλές σε ορισμένα μαγνητόμετρα και είναι συγκρίσιμες με το θόρυβο (τυπικές τιμές θορύβου για σταθερά μαγνητικά πεδία είναι της τάξης του 0.1 - 1 nT). Εντούτοις, η λογική και φιλοσοφία του αλγορίθμου τον ενθαρρύνει να αξιοποιεί τις ισχυρές τιμές του μαγνητικού πεδίου για να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα στη διαδικασία πρόβλεψης.

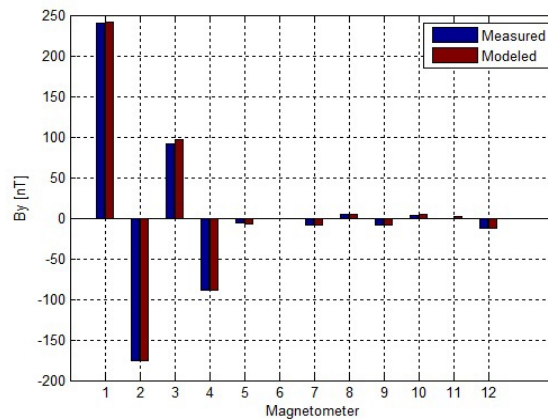
	B_x [nT]		B_y [nT]		B_x [nT]		B_{tot} [nT]	
	Μετρ.	Μοντ.	Μετρ.	Μοντ.	Μετρ.	Μοντ.	Μετρ.	Μοντ.
Μαγν. 1	65.8	60.6	240.6	242.1	186.5	183.6	311.4	309.8
Μαγν. 2	40.4	41	-176	-176	-115.9	-115.9	214.6	214.7
Μαγν. 3	-62.1	-61.8	91.9	96.2	118.2	118.6	162.1	164.8
Μαγν. 4	-46.7	-47.1	-88.9	-88.9	-87.2	-85.7	133	132.2
Μαγν. 5	-13.1	-13.4	-5.4	-6.7	33.9	33.7	36.7	36.9
Μαγν. 6	-12.9	-12.8	-0.5	-1.3	-30.8	-31.7	33.4	34.2
Μαγν. 7	-2.8	-1.8	-8.3	-9.1	18.3	19.1	20.3	21.2
Μαγν. 8	-2	-1.9	4.6	4.7	-19	-19.3	19.7	20
Μαγν. 9	3.7	4.3	-8.4	-9.2	20.5	21.5	22.5	23.8
Μαγν. 10	4.9	4.4	3.2	4.1	-20.9	-21.5	21.7	22.3
Μαγν. 11	24.4	24	-0.9	1.8	50.5	48.9	56.1	54.5
Μαγν. 12	22.4	21.9	-12	-12.2	-40.8	-43.3	48.1	50

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του διπόλου με ασθενή μαγνητική υπογραφή στα 12 μαγνητόμετρα.

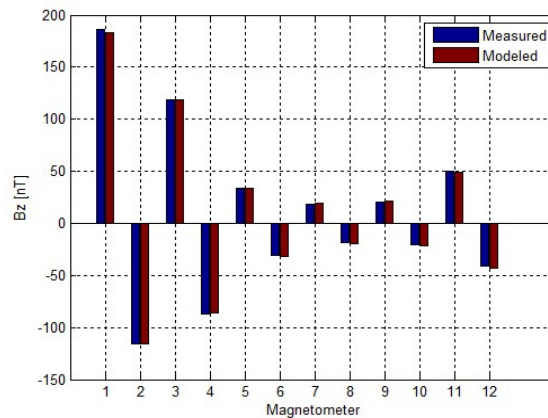
Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά και στα Σχήματα 5.3 - 5.5. Είναι φανερό ότι το εκτιμώμενο διπολικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να αναπαράγει με ακρίβεια τη μαγνητική υπογραφή του αρχικού διπόλου και στις τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου.



ΣΧΗΜΑ 5.3: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του διπόλου με ασθενή μαγνητική υπογραφή - x συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.4: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του διπόλου με ασθενή μαγνητική υπογραφή - y συνιστώσα.

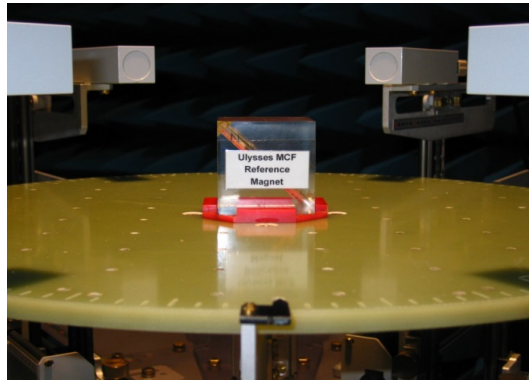


ΣΧΗΜΑ 5.5: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του διπόλου με ασθενή μαγνητική υπογραφή - z συνιστώσα.

5.2.2 Δίπολο με ισχυρή μαγνητική υπογραφή

Ο μαγνήτης αναφοράς της διαστημικής αποστολής Ulysses-MCF χρησιμοποιείται ως αντικείμενο δοκιμής και μέτρησης. Αυτός ο διπολικός μαγνήτης, που έχει ισχυρή μαγνητική ροπή προσανατολισμένη προς όλες τις κατευθύνσεις (m_x, m_y, m_z), φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Τα μαγνητόμετρα σχηματίζουν δύο κύκλους πάνω και κάτω από τον περιστρεφόμενο δίσκο και οι ακτίνες τους επιλέγονται 20 cm από το κέντρο του περιστρεφόμενου τραπέζιου, ενώ τα ύψη είναι $z = 10$ cm και $z = -10$ cm για τον άνω και κάτω κύκλο αντίστοιχα. Ο μαγνήτης αναφοράς Ulysses MCF μετρήθηκε πολλές φορές, τοποθετημένος σε διαφορετικές θέσεις στο τραπέζι, προκειμένου να διασφαλιστεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Τα προκύπτοντα μοντέλα από τις 10 μετρήσεις δεν αποκλίνουν σημαντικά από τις θεωρητικές τιμές

όσον αφορά τη θέση του διπόλου (x, y, z) και δείχνουν συνέπεια ως προς την προβλεπόμενη μαγνητική ροπή (m_x, m_y, m_z) .



ΣΧΗΜΑ 5.6: Μαγνητικό δίπολο με ισχυρή μαγνητική υπογραφή.

Το μοντέλο που προκύπτει για μια δοκιμαστική περίπτωση με τη χρήση της στοχαστικής PSO μεθόδου από τις μετρήσεις κοντινού πεδίου φαίνεται στον Πίνακα 5.4 και η προσαρμογή του μοντέλου (κριτήριο C_1) στον Πίνακα 5.5.

	Παράμετροι του διπόλου	Υπολογιζόμενο μοντέλο
x [cm]	0	0
y [cm]	0	0
z [cm]	3.3	3.2
m_x [mAm ²]	άγνωστη	501
m_y [mAm ²]	άγνωστη	-491.4
m_z [mAm ²]	άγνωστη	415
$ m $ [mAm ²]	άγνωστη	815.3

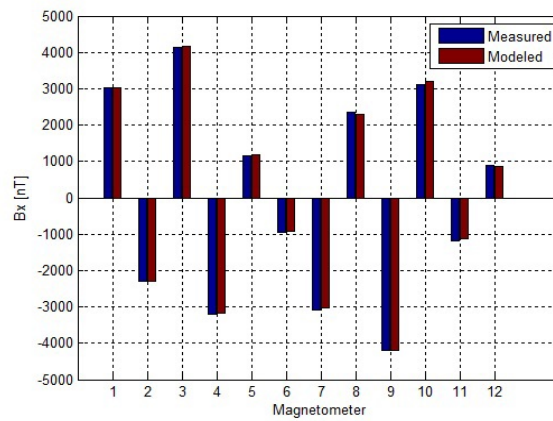
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: Πρόβλεψη μοντέλου - Δίπολο με ισχυρή μαγνητική υπογραφή.

Προσαρμογή του μοντέλου (Goodness of fit)	
Συνολικό RMS των υπολοίπων [%]	2.4
Συνολικό RMS των υπολοίπων [nT]	109.14

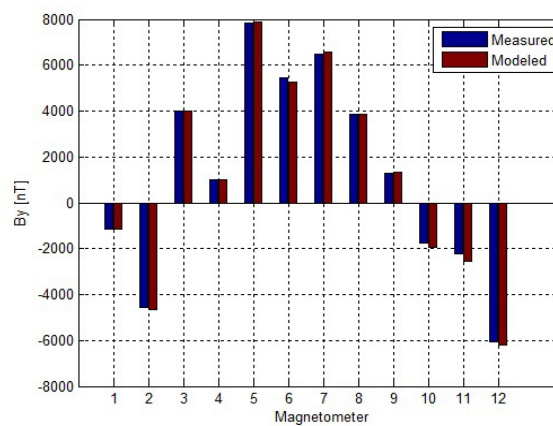
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: Δίπολο με ισχυρή μαγνητική υπογραφή - Κριτήριο C_1 .

Η εκτιμώμενη θέση του διπόλου είναι κοντά στην αντίστοιχη πραγματική, έχοντας μέγιστη διαφορά 1 mm στον z άξονα, ενώ η εκτιμώμενη μαγνητική ροπή έχει μεγάλες τιμές προς όλους τους προσανατολισμούς, όπως αναμενόταν. Η πρόβλεψη του μοντέλου έχει επιτύχει συνολική καταλληλότητα προσαρμογής 2.4 % (κριτήριο C_1) και τα αποτελέσματα για

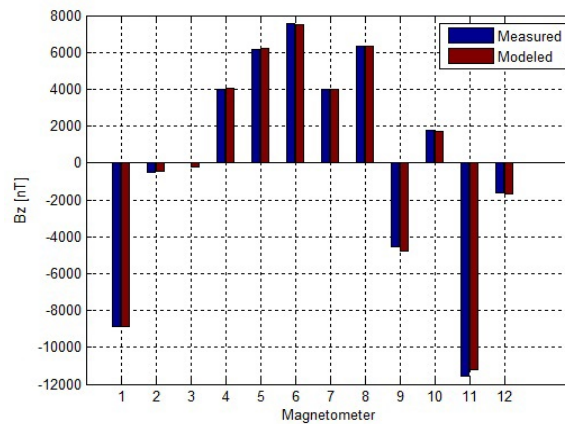
τις διαφορές μεταξύ μετρούμενου και μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 5.7 - 5.9 και για τις τρεις συνιστώσες.



ΣΧΗΜΑ 5.7: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο διπόλου με ισχυρή μαγνητική υπογραφή - x συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.8: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο διπόλου με ισχυρή μαγνητική υπογραφή - y συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.9: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο διπόλου με ισχυρή μαγνητική υπογραφή - z συνιστώσα.

5.2.3 Δύο δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές

Δύο δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές, χωρισμένα κατά περίπου 20 cm χρησιμοποιούνται ως αντικείμενο δοκιμής, μετρούνται και μοντελοποιούνται. Τα δύο δίπολα είναι όμοια και έχουν μέγιστη μαγνητική ροπή περίπου $30 \text{ mA}\cdot\text{m}^2$ προσανατολισμένη ως προς τον z άξονα. Εκτεταμένα αποτελέσματα για μια δοκιμαστική περίπτωση (συνολικά τα δύο δίπολα χαρακτηρίστηκαν 10 φορές ως αντικείμενο δοκιμής) παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.6 και 5.7.

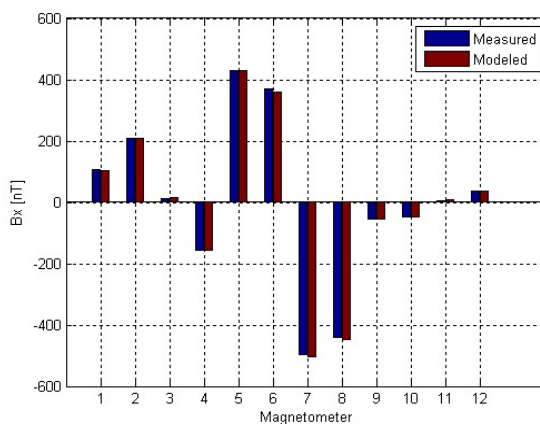
	Παράμετροι του διπόλου 1	Παράμετροι του διπόλου 2	Υπολογιζόμενο μοντέλο	
x [cm]	7.5	-12.5	7.3	-12.5
y [cm]	7.5	7.5	7.6	7.3
z [cm]	0.1	0.1	0.2	0.1
m_x [$\text{mA}\cdot\text{m}^2$]	άγνωστη	άγνωστη	4.847	0.66
m_y [$\text{mA}\cdot\text{m}^2$]	άγνωστη	άγνωστη	1.467	-1.123
m_z [$\text{mA}\cdot\text{m}^2$]	άγνωστη	άγνωστη	-28.11	-31.39
$ m $ [$\text{mA}\cdot\text{m}^2$]	άγνωστη	άγνωστη	28.57	31.41

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: Πρόβλεψη μοντέλου - Δύο δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές.

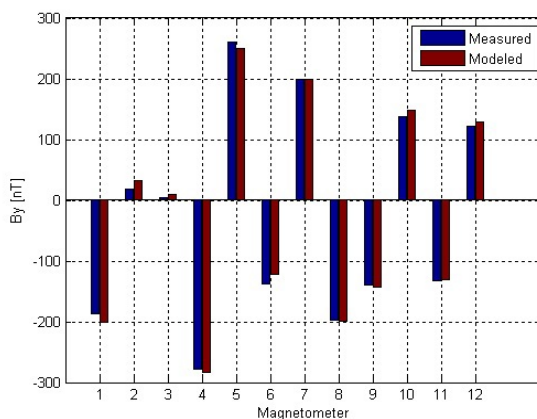
Προσαρμογή του μοντέλου (Goodness of fit)	
Συνολικό RMS των υπολοίπων [%]	1.4
Συνολικό RMS των υπολοίπων [nT]	6.631

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: Δύο δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές - Κριτήριο C_1 .

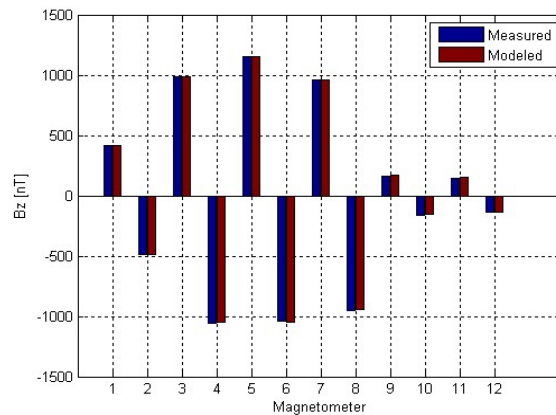
Όπως είναι εμφανές από τα αποτελέσματα η σχετική απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων μαγνητικών πεδίων και των υπολογιζόμενων από το πολλαπλό διπολικό μοντέλο είναι μικρότερη από 2% σε όλες τις περιπτώσεις. Επιπλέον, η απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης θέσης των δύο διπόλων κυμαίνεται μεταξύ 0 και 2 mm. Οι διαφορές μεταξύ μετρούμενου και μοντελοποιημένου μαγνητικών τιμών για τις τρεις συνιστώσες του πεδίου παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 5.10 - 5.12.



ΣΧΗΜΑ 5.10: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με παράλληλες μαγνητικές ροπές - x συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.11: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με παράλληλες μαγνητικές ροπές - y συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.12: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με παράλληλες μαγνητικές ροπές - z συνιστώσα.

5.2.4 Δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές

Τα ίδια δύο δίπολα χρησιμοποιούνται ως αντικείμενο δοκιμής με τη διαφορά ότι το ένα έχει τον αντίθετο προσανατολισμό ως προς τον άξονα z , καταλήγοντας σε σχηματισμό δύο διπόλων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές, χωρισμένα κατά 20 cm. Τα αποτελέσματα από 10 δοκιμαστικές μετρήσεις του συγκεκριμένου σχηματισμού διπόλων είναι συνεπή όσον αφορά τις τιμές του κριτηρίου ($\approx 2\%$) και την απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της μοντελοποιημένης θέσης των διπόλων (≈ 5 mm). Το προκύπτον μοντέλο για μια δοκιμαστική περίπτωση δίνεται στον Πίνακα 5.8, ενώ το κριτήριο αξιολόγησης καταλληλότητας προσαρμογής εμφανίζεται στον Πίνακα 5.9.

	Παράμετροι του διπόλου 1	Παράμετροι του διπόλου 2	Υπολογιζόμενο μοντέλο	
x [cm]	7.5	-12.5	7.4	-12.2
y [cm]	-2.5	-2.5	-2.4	-2.6
z [cm]	0.1	0.1	0.2	0.1
m_x [mAm ²]	άγνωστη	άγνωστη	0.211	0.758
m_y [mAm ²]	άγνωστη	άγνωστη	-3.149	3.734
m_z [mAm ²]	άγνωστη	άγνωστη	-31.81	28.23
$ m $ [mAm ²]	άγνωστη	άγνωστη	31.97	28.49

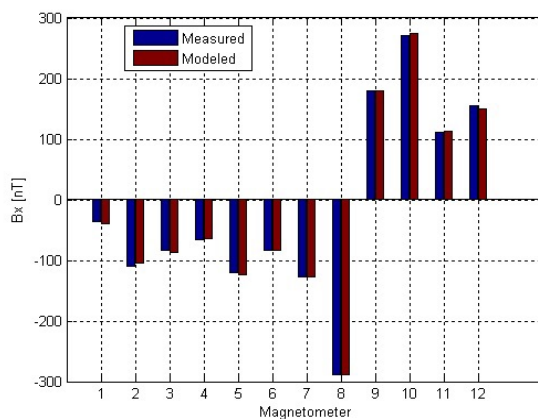
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: Πρόβλεψη μοντέλου - Δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές.

Τα αποτελέσματα δείχνουν σαφώς την αποτελεσματική διαδικασία της μεθόδου μοντελοποίησης, καθώς η σχετική απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων μαγνητικών πεδίων και των υπολογιζόμενων από το πολλαπλό διπολικό μοντέλο είναι μικρότερη από 2%. Επιπλέον, η μέγιστη απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης θέσης των δύο διπόλων είναι 3 mm. Τέλος, όσον αφορά τις μαγνητικές ροπές των δύο αντικειμένων δοκιμής, τα μοντέλα που προκύπτουν σε αυτή τη δοκιμαστική περίπτωση είναι όμοια με τα μοντέλα των

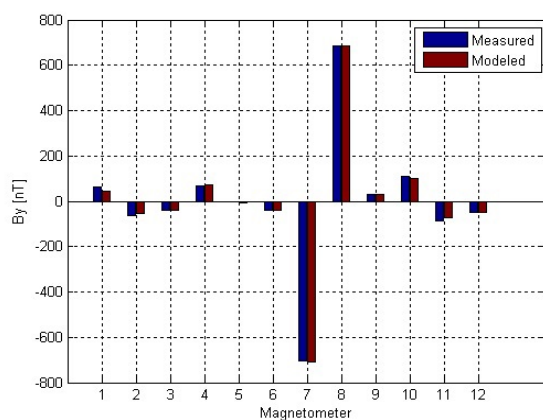
Προσαρμογή του μοντέλου (Goodness of fit)	
Συνολικό RMS των υπολοίπων [%]	1.6
Συνολικό RMS των υπολοίπων [nT]	5.92

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: Δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές - Κριτήριο C_1 .

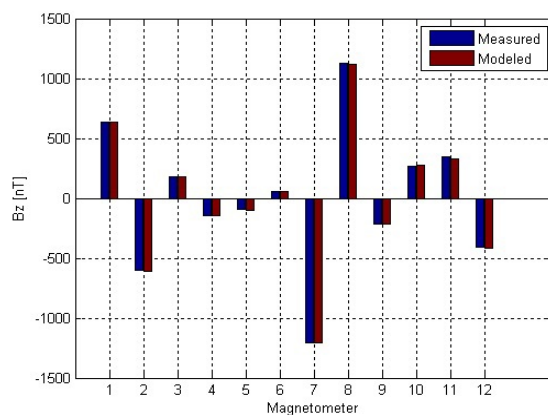
δύο δίπολων με παράλληλες μαγνητικές ροπές, γεγονός που επικυρώνει την επαλήθευση της κατασκευής πολλαπλών μαγνητομέτρων. Οι διαφορές μεταξύ μετρούμενου και μοντελοποιημένου μαγνητικών τιμών για τις τρεις συνιστώσες του πεδίου παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 5.13 - 5.15 και για τα 12 μαγνητόμετρα, όπου είναι εμφανές ότι το πολλαπλό δίπολικό μοντέλο μπορεί να αντιπροσωπεύσει ικανοποιητικά τα αντικείμενα δοκιμής.



ΣΧΗΜΑ 5.13: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο δίπολων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές - x συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.14: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές - y συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.15: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο δύο διπόλων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές - z συνιστώσα.

5.2.5 Πηνίο τροφοδοτούμενο από ηλεκτρικό ρεύμα

Το πηνίο τροφοδοσίας ρεύματος που φαίνεται στο Σχήμα 5.16 έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Κυκλικό σχήμα.
- Εσωτερική διάμετρο $D_i = 54$ mm και εξωτερική διάμετρο $D_o = 54$ mm.
- Μήκος ~ 4 mm.
- Στροφές $N = 280$ ($\pm 1\%$)

και το ρεύμα παρέχεται από ζεύγος συνεστραμμένων συρμάτων. Η θεωρητική ανάλυση υποδεικνύει ότι το πηνίο παράγει μια μαγνητική διπολική ροπή που μπορεί να εκφραστεί:

$$m = \frac{NI\pi(r_i^2 + r_i r_o + r_o^2)}{3} \quad (5.1)$$

όπου r_i και r_o είναι η εσωτερική και η εξωτερική ακτίνα του πηνίου αντίστοιχα και I είναι το ρεύμα τροφοδοσίας. Συνεπώς, όταν το πηνίο τροφοδοτείται με $I = 100$ mA, παράγει μια μαγνητική ροπή περίπου $68,7$ mAm². Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το πηνίο τοποθετείται στο xy επίπεδο πάνω στο τραπέζι και η μαγνητική ροπή του πηνίου είναι προσανατολισμένη προς την κατεύθυνση z και αναμένεται να είναι κατά προσέγγιση αμελητέα στις κατευθύνσεις x, y .



ΣΧΗΜΑ 5.16: Πηνίο τροφοδοτούμενο από ρεύμα.

Τα αποτελέσματα για μια μετρούμενη δοκιμαστική περίπτωση παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.10 και 5.11, εστιάζοντας στη διαφορά μεταξύ των μετρημένων και των διαμορφωμένων τιμών του μαγνητικού πεδίου, καθώς και της διαφοράς μεταξύ των πραγματικών παραμέτρων του πηνίου και των εκτιμήσεων του μοντέλου μαγνητικού διπόλου.

	Παράμετροι του πηνίου	Υπολογιζόμενο μοντέλο
x [cm]	-12.5	-12.4
y [cm]	7.5	7.3
z [cm]	2.1	2
m_x [mAm ²]	0	-0.064
m_y [mAm ²]	0	0.522
m_z [mAm ²]	68.7	68.65
$ m $ [mAm ²]	68.7	68.65

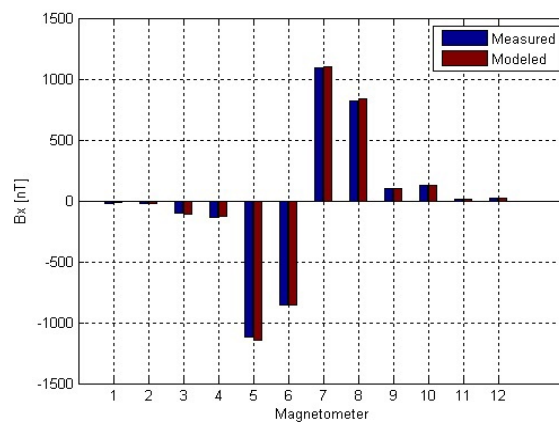
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10: Πρόβλεψη μοντέλου - Πηνίο τροφοδοτούμενο με σταθερό ρεύμα.

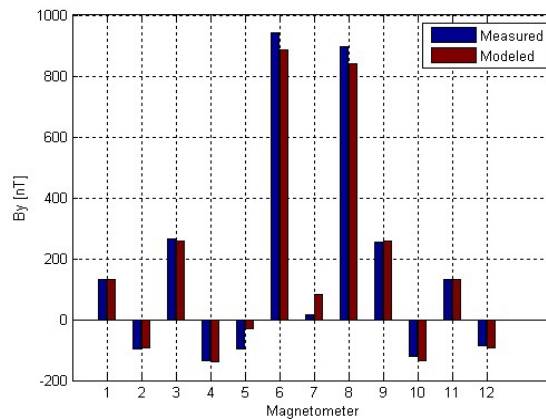
Οι παράμετροι του μοντέλου προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις ιδανικές θεωρητικές παραμέτρους του πηνίου, εφόσον η μέγιστη απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης θέσης είναι 2 mm και η καταλληλότητα της προσαρμογής είναι 3.1%. Το πηνίο που

Προσαρμογή του μοντέλου (Goodness of fit)	
Συνολικό RMS των υπολοίπων [%]	3.1
Συνολικό RMS των υπολοίπων [nT]	23.982

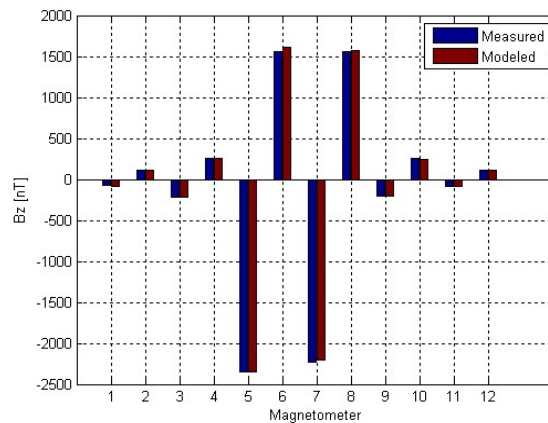
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11: Πηγίο τροφοδοτούμενο με σταθερό ρεύμα - Κριτήριο C_1 .

τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα μετρήθηκε πολλές φορές, τοποθετημένο σε διαφορετικές θέσεις του περιστρεφόμενου τραπεζιού, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επαναληψιμότητα των παραγόμενων μοντέλων. Σε όλες τις περιπτώσεις τα μοντέλα που προκύπτουν πλησιάζουν τις θεωρητικές τιμές από την άποψη της θέσης (x, y, z) και της μαγνητικής ροπής (m_x, m_y, m_z) . Επιπλέον, η σχετική απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων και των διαμορφωμένων τιμών του μαγνητικού πεδίου είναι μικρότερη από 5% σε όλες τις περιπτώσεις δοκιμής. Οι διαφορές μεταξύ μετρούμενου και μοντελοποιημένου μαγνητικών τιμών για τις τρεις συνιστώσες του πεδίου παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 5.17 - 5.19 και για τα 12 μαγνητόμετρα.

ΣΧΗΜΑ 5.17: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του πηγίου το οποίο τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα - x συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.18: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του πηνίου το οποίο τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα - y συνιστώσα.

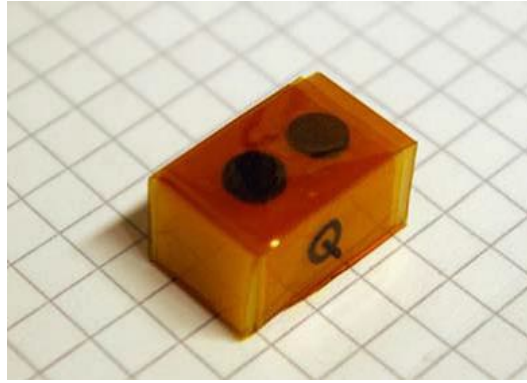


ΣΧΗΜΑ 5.19: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο του πηνίου το οποίο τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα - z συνιστώσα.

5.2.6 Μαγνητικό τετράπολο

Τέλος, χρησιμοποιείται ως αντικείμενο δοκιμής ο σχηματισμός δύο διπόλων με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές, χωρισμένα κατά περίπου 7 mm, σχηματίζοντας έτσι ένα μαγνητικό δίπολο και ένα τετράπολο. Ο σχηματισμός των δύο διπόλων φαίνεται στο Σχήμα 5.20. Οι μαγνητικές ροπές των δύο διπόλων είναι προσανατολισμένες προς την κατεύθυνση z , ενώ ο διαχωρισμός μεταξύ τους αρχικά επιλέγεται ως προς την κατεύθυνση x . Προκειμένου να μετρηθεί η ασθενής μαγνητική τους υπογραφή, οι ακτίνες των μαγνητομέτρων επιλέγονται να ρυθμίζονται στα 10 cm από το κέντρο του περιστρεφόμενου τραπέζιου, ενώ τα ύψη παραμένουν στα $z = 10$ cm και $z = -10$ cm για τον άνω και κάτω κύκλο αντίστοιχα.

Τα εκτεταμένα αποτελέσματα για μια μετρούμενη περίπτωση δοκιμής παρουσιάζονται στους



ΣΧΗΜΑ 5.20: Σχηματισμός μαγνητικού τετραπόλου αποτελούμενος από δύο δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές σε κοντινή απόσταση.

Πίνακες 5.12 και 5.13, εστιάζοντας στη διαφορά μεταξύ των πραγματικών και μοντελοποιημένων θέσεων των δύο διπόλων, καθώς και στη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των μοντελοποιημένων τιμών του μαγνητικού πεδίου.

	Παράμετροι του διπόλου 1	Παράμετροι του διπόλου 2	Υπολογιζόμενο μοντέλο διπόλου		Υπολογιζόμενο μοντέλο τετραπόλου
x [cm]	-0.35	0.35	0.1	x [cm]	0.1
y [cm]	0	0	0	y [cm]	0
z [cm]	0.9	0.9	0.8	z [cm]	0.8
m_x [mAm ²]	άγνωστη	άγνωστη	-2.598	Q_{11} [mAm ³]	-0.008
m_y [mAm ²]	άγνωστη	άγνωστη	-2.588	Q_{12} [mAm ³]	-0.009
m_z [mAm ²]	άγνωστη	άγνωστη	-0.611	Q_{13} [mAm ³]	-0.095
$ m $ [mAm ²]	άγνωστη	άγνωστη	3.718	Q_{22} [mAm ³]	0
				Q_{23} [mAm ³]	0
				q [mAm ³]	0.096
				n [mAm ³]	0.995

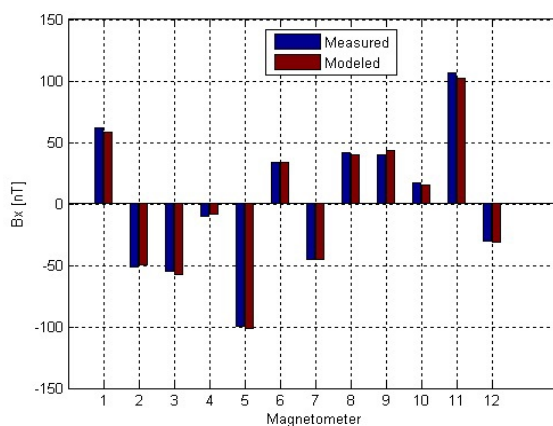
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12: Πρόβλεψη μοντέλου - Μαγνητικό δίπολο και τετραπόλο.

Τα αποτελέσματα επικυρώνουν καθαρά την επιτυχή πρόβλεψη της μαγνητικής πηγής από την άποψη της θέσης του μοντέλου (x, y, z) και του σφάλματος RMS μεταξύ των μετρούμενων και μοντελοποιημένων τιμών του μαγνητικού πεδίου. Ο σχηματισμός μαγνητικού διπόλου και τετραπόλου μετρήθηκε πολλές φορές, τοποθετημένος σε διαφορετικές θέσεις στο τραπέζι, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Τα αποτελέσματα είναι συνεπή ως προς την εκτιμώμενη διανυσματική διπολική ροπή (m_x, m_y, m_z) και τον ταυιστή τετραπολικής ροπής ($Q_{11}, Q_{12}, Q_{13}, Q_{22}, Q_{23}$). Οι διαφορές

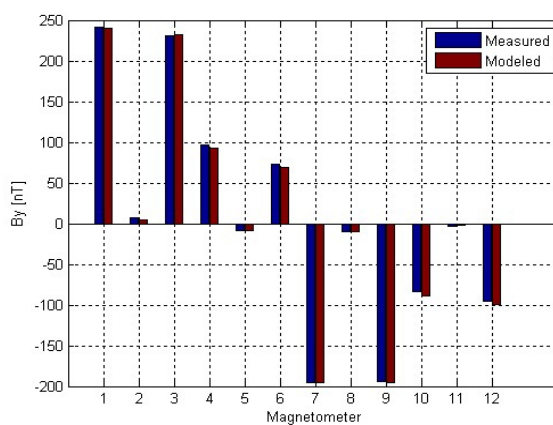
Προσαρμογή του μοντέλου (Goodness of fit)	
Συνολικό RMS των υπολοίπων [%]	2.3
Συνολικό RMS των υπολοίπων [nT]	2.419

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13: Μαγνητικό δίπολο και τετράπολο - Κριτήριο C_1 .

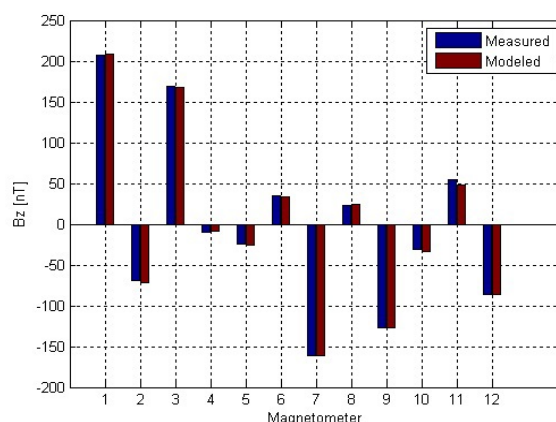
μεταξύ μετρούμενου και μοντελοποιημένου μαγνητικών τιμών για τις τρεις συνιστώσες του πεδίου παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 5.21 - 5.23 και για τα 12 μαγνητόμετρα.



ΣΧΗΜΑ 5.21: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο μαγνητικού τετραπόλου - x συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.22: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο μαγνητικού τετραπόλου - y συνιστώσα.



ΣΧΗΜΑ 5.23: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο μαγνητικό πεδίο μαγνητικού τετραπόλου - z συνιστώσα.

5.3 Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα και τις δοκιμές μέτρησης, η πρωτότυπη εγκατάσταση πολλαπλών μαγνητομέτρων MMF λειτουργεί εξαιρετικά καλά όσον αφορά την ακρίβεια των προβλεπόμενων μοντέλων. Με βάση τα εκτιμώμενα μοντέλα χρησιμοποιώντας τις περιπτώσεις επαλήθευσης δοκιμών με τις βαθμονομημένες μαγνητικές πηγές (τροφοδοτούμενο πηνίο και μικρός διπολικός μαγνήτης), φαίνεται ότι η θέση των προβλεπόμενων μοντέλων καθώς και η σχετική απόκλιση μεταξύ του συνολικού μετρούμενου και μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου, συμμορφώνονται σε όλες τις περιπτώσεις με τις αυστηρές απαιτήσεις των κριτηρίων αξιολόγησης.

Η απλούστευση των μαγνητικών μετρήσεων και η ακριβής πρόβλεψη διπολικών μοντέλων οδηγεί στη χρήση της παρούσας εγκατάστασης πολλαπλών μαγνητομέτρων MMF και της αντίστοιχης μεθοδολογίας μετρήσεων, μετά από λεπτομερείς δοκιμές και αξιολόγηση, ως πρότυπη μέθοδο δοκιμής για σκοπούς μαγνητικών μετρήσεων και μοντελοποίησης εξοπλισμού διαστημικών σκαφών για σταθερά, αλλά και για αργά μεταβαλλόμενα πεδία, στο πλαίσιο των εφαρμογών της μαγνητικής καθαρότητας.

Κεφάλαιο 6

Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου σε απομακρυσμένες αποστάσεις

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα εισάγεται μια νέα τεχνική για την ακριβή πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής υπό εξέταση, που αποτελείται από πολλαπλές μαγνητικές πηγές, σε διαφορετικές θέσεις από τα σημεία παρατήρησης. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα σύνολο μετρήσεων κοντινού μαγνητικού πεδίου για τη δημιουργία διαφόρων μοντέλων πολλαπλών μαγνητικών διπόλων της συσκευής. Η μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από όλα τα εκτιμώμενα διπολικά μοντέλα χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της μαγνητικής συμπεριφοράς της συσκευής σε απομακρυσμένα σημεία, στα οποία προδιαγραφές για μαγνητική καθαρότητα απαιτούνται. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αξιολογείται μέσω προσομοιώσεων και επαληθεύεται με πραγματικά μετρούμενα δεδομένα. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν σαφώς την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην ακριβή πρόβλεψη μιας σύνθετης μαγνητικής συμπεριφοράς και, ως εκ τούτου, αποτρέπει την υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του μακρινού πεδίου μιας συσκευής στις θέσεις των ευαίσθητων μαγνητομέτρων στις διαστημικές αποστολές.

6.2 Μέθοδος πρόβλεψης πολλαπλών μοντέλων

Γενικά, όταν μια συσκευή αποτελείται από μία ή δύο μαγνητικές πηγές, το υπολογιζόμενο πολλαπλό διπολικό μοντέλο είναι συνήθως ακριβές. Παρ' όλα αυτά, εκτεταμένες προσομοιώσεις δείχνουν ότι όταν η μοντελοποίηση απαιτεί περισσότερα από δύο δίπολα, ενδέχεται να προκύψουν περισσότερες από μία πιθανές λύσεις. Επιπλέον, αυξάνεται δραματικά η πολυπλοκότητα του προβλήματος και ο αριθμός των μεταβλητών που πρόκειται να καθοριστούν,

π.χ. 30 μεταβλητές για 5 μαγνητικά δίπολα. Συνεπώς, όταν πρόκειται για σύνθετες συσκευές (αποτελούμενες από πολλές μαγνητικές πηγές), εντελώς διαφορετικά μοντέλα που προβλέπονται από στοχαστικές μεθόδους μπορούν να παράγουν το ίδιο μαγνητικό πεδίο στα σημεία παρατήρησης (μαγνητόμετρα). Ωστόσο, η συμπεριφορά τους σε διαφορετικές αποστάσεις μπορεί να διαφέρει σημαντικά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά μοντέλα που προκύπτουν από τις στοχαστικές μεθόδους, το μαγνητικό πεδίο σε απομακρυσμένες αποστάσεις μπορεί να εκτιμηθεί, προκειμένου να προβλεφθεί με ακρίβεια η μαγνητική συμπεριφορά μιας σύνθετης συσκευής. Η τεχνική πρόβλεψης αρχικά χρησιμοποιεί τις μετρήσεις κοντινού μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής αποτελούμενης από πολλαπλές μαγνητικές πηγές και τις αξιοποιεί για την πρόβλεψη πολλών διπολικών μοντέλων. Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλός σηματοθορυβικός λόγος SNR, τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται κοντά στη συσκευή υπό μέτρηση, αλλά σε μεγαλύτερη απόσταση σε σύγκριση με την απόσταση μεταξύ των μαγνητικών πηγών που την συνθέτουν. Για τη δημιουργία πολλαπλών διαφορετικών μοντέλων, δύο τεχνικές χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της μεθόδου [43].

Η πρώτη τεχνική περιλαμβάνει τεχνητή διαταραχή κάποιας συνιστώσας του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου σε ένα τυχαίο σημείο παρατήρησης (μαγνητόμετρο), η τιμή της οποίας παραμορφώνεται κατά ένα μέγιστο 5%:

$$B_{value} = B_{value} \cdot q(rand - rand) + B_{value} \quad (6.1)$$

όπου q αντιπροσωπεύει το μέγιστο ποσοστό διατάραξης του μαγνητικού πεδίου και το $rand$ παίρνει τυχαίες τιμές μέσα στο διάστημα $[0,1]$, ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή. Όπως αναφέρθηκε ήδη, διαφορετικά σύνολα μετρήσεων στο κοντινό πεδίο της συσκευής παράγουν διαφορετικά μοντέλα λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα του αλγορίθμου επίλυσης (PSO, Γενετικοί Αλγόριθμοι, κ.ά.). Επομένως, από κάθε ξεχωριστή διαταραχή μιας τυχαίας τιμής του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου παράγεται και τελείως διαφορετικό μοντέλο πολλαπλών διπόλων. Τα μοντέλα που πληρούν τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθούν στην προτεινόμενη μέθοδο πρέπει να είναι αποδεκτά όσον αφορά το σχετικό σφάλμα RMS (μικρότερο από 5%) σε σχέση με το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο.

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους των προβλεπόμενων διπολικών μοντέλων και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.3), το μαγνητικό πεδίο στα επιθυμητά απομακρυσμένα σημεία παρατήρησης μπορεί να υπολογιστεί. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από πολλαπλά μοντέλα της ίδιας συσκευής στην επιθυμητή απόσταση πρόβλεψης. Ο μέσος όρος των μαγνητικών πεδίων τελικά χρησιμοποιείται στην προτεινόμενη μέθοδο υπό την έννοια της επικρατούσας

τιμής, η οποία σε επαρκώς μεγάλο αριθμό δειγμάτων κατανέμεται περίπου κανονικά. Επομένως, η επικρατούσα τιμή συμπίπτει με τη μέση τιμή. Τόσο οι θέσεις των διπόλων, όσο και οι μαγνητικές ροπές των προβλεπόμενων μοντέλων, διαφέρουν σημαντικά και αποκλίνουν σαφώς από το πραγματικό θεωρητικό μοντέλο, υποδηλώνοντας ότι δεν μπορούν να βρεθούν όρια εύρους για τις εφικτές πολλαπλές λύσεις. Επιπροσθέτως, εφόσον οι εξισώσεις (3.3) είναι μη γραμμικές σε συνάρτηση με τη θέση των διπολικών πηγών, ο μέσος όρος των παραμέτρων των παραγόμενων μοντέλων δεν είναι εφικτή προσέγγιση. Ως εκ τούτου, η μόνη εύλογη μέθοδος είναι η μέση τιμή των παραγόμενων μαγνητικών πεδίων σε απομακρυσμένα σημεία παρατήρησης από όλα τα διαφορετικά διπολικά μοντέλα.

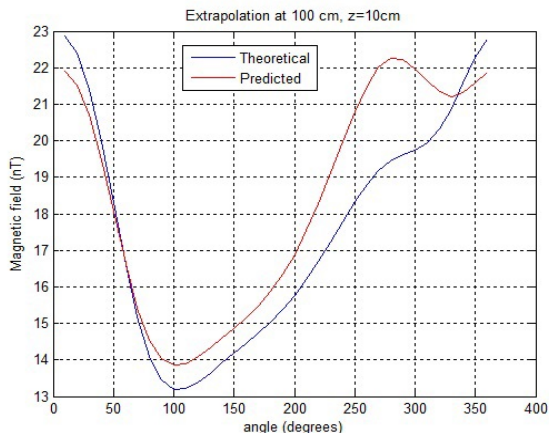
Η δεύτερη τεχνική συνεπάγεται πολλαπλές μετρήσεις της μαγνητικής υπογραφής της συσκευής, η οποία γενικά απαιτεί περισσότερο χρόνο. Παρομοίως, αυτές οι πολλαπλές μετρήσεις παράγουν διαφορετικές προβλέψεις μοντέλων. Ουσιαστικά, και οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε διαφορετικά πολλαπλά μαγνητικά μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου.

6.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά, δημιουργούνται προσομοιωμένες μετρήσεις μιας συσκευής αποτελούμενης από 5 μαγνητικά δίπολα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.3) σε σημεία παρατήρησης της Διάταξης 2, δηλαδή δύο κύκλων κάτω και πάνω από το τραπέζι ακτίνας 20 cm που βρίσκονται σε ύψη $z = 10$ και $z = -10$ cm αντίστοιχα. Το θεωρητικό μαγνητικό πεδίο στα σημεία παρατήρησης διαταράσσεται τυχαία κατά μέγιστο 5%, προκειμένου να συμπεριληφθεί πραγματικός θόρυβος στη διαδικασία των μετρήσεων, όπως περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, οι παράμετροι του μοντέλου υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις τιμές των προσομοιωμένων μετρήσεων και εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO). Με την υλοποίηση της προτεινόμενης τεχνικής, μια τυχαία μέτρηση μαγνητικού πεδίου διαταράσσεται τεχνητά κάθε φορά και διάφορα μοντέλα προκύπτουν από το ίδιο σύνολο μετρήσεων.

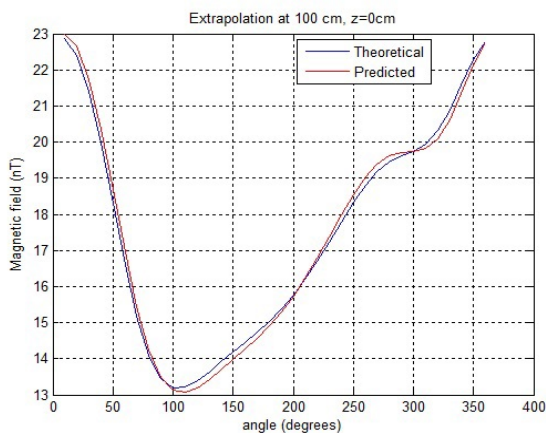
Στο Σχήμα 6.1 απεικονίζεται το υπολογιζόμενο (προβλεπόμενο) μέτρο του μαγνητικού πεδίου ενός ενδεικτικού εκτιμώμενου μοντέλου σε ένα κύκλο ακτίνας 1 m σε σχέση με το θεωρητικό μαγνητικό πεδίο των 5 διπόλων. Προφανώς, υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ της θεωρητικής και της προβλεπόμενης μαγνητικής συμπεριφοράς, που οδηγεί σε υποεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου.

Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζεται η μέση τιμή του μέτρου του μαγνητικού πεδίου 30 διαφορετικών μοντέλων σε σχέση με το θεωρητικό μαγνητικό πεδίο. Όπως εύκολα παρατηρείται, η τεχνική επιτυγχάνει μια καλή προσέγγιση της μαγνητικής συμπεριφοράς των 5 διπόλων



ΣΧΗΜΑ 6.1: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικού και υπολογιζόμενου (από ένα μοντέλο) μαγνητικού πεδίου σε ένα κύκλο με ακτίνα 1 m.

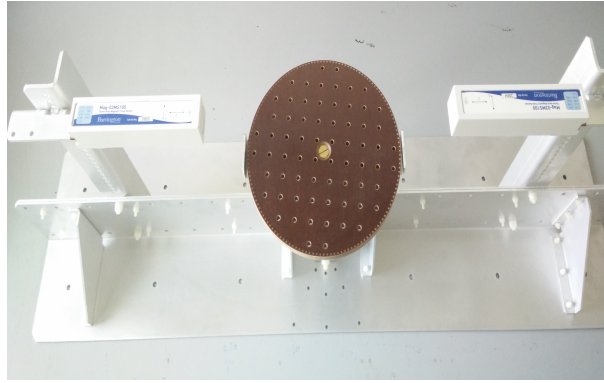
στην απόσταση του 1 m. Συγκεκριμένα, η σχετική απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των θεωρητικών μαγνητικών πεδίων στα 36 σημεία παρατήρησης είναι μικρότερη από 5%.



ΣΧΗΜΑ 6.2: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικού και υπολογιζόμενου (μέση τιμή των 30 μοντέλων) μαγνητικού πεδίου σε ένα κύκλο με ακτίνα 1 m..

6.4 Πραγματικές μετρήσεις

Η μέθοδος πρόβλεψης επαληθεύεται περαιτέρω χρησιμοποιώντας μετρήσεις από πραγματικές μαγνητικές πηγές. Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται η εγκατάσταση για την απόκτηση μαγνητικής υπογραφής ενός σχηματισμού μαγνητικών πηγών που αποτελείται από 5 δίπολα. Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται στα (10, 0, 8) και (-15, 0, 7) cm σε σχέση με το κέντρο του περιστρεφόμενου τραπέζιου.

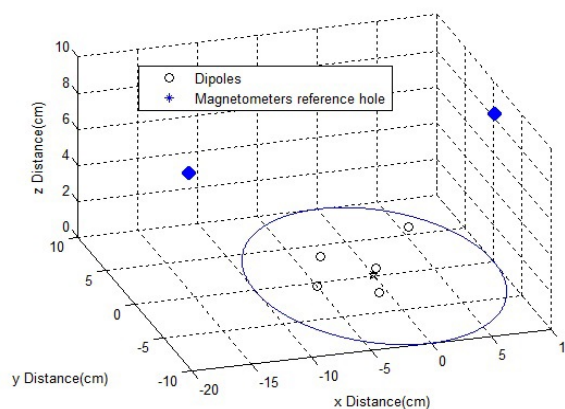


ΣΧΗΜΑ 6.3: Εγκατάσταση δύο μαγνητομέτρων για τη μέτρηση μαγνητικής υπογραφής μίας συσκευής.

Στον Πίνακα 6.1, η θέση κάθε διπόλου x, y, z μαζί με την αντίστοιχη μαγνητική ροπή m_x, m_y, m_z καταγράφονται. Αυτά τα δίπολα συνθέτουν τις θεωρητικές παραμέτρους της συσκευής υπό μέτρηση. Το Σχήμα 6.4 απεικονίζει την τοποθέτηση των 5 μαγνητικών διπόλων στην εγκατάσταση μέτρησης.

	Διπόλο 1	Διπόλο 2	Διπόλο 3	Διπόλο 4	Διπόλο 5
x [cm]	0.1	5.2	-1.1	-5.2	-3.1
y [cm]	0	4.9	-3.1	-0.9	3
z [cm]	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2
m_x [mAm ²]	-33.977	5.953	-10.184	-1.07	-1.22
m_y [mAm ²]	-10.957	12.453	6.237	-1.417	0.516
m_z [mAm ²]	376.64	164.977	-166.52	-31.295	-33.731

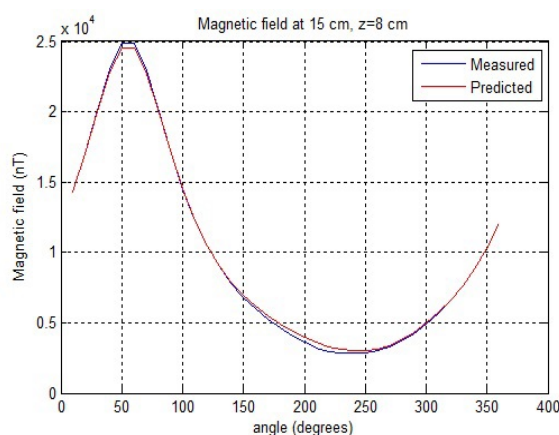
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: Παράμετροι του σχηματισμού των 5 μαγνητικών πηγών.



ΣΧΗΜΑ 6.4: Απεικόνιση της τοποθέτησης των 5 μαγνητικών διπόλων στην εγκατάσταση μέτρησης.

Πολλές μετρήσεις σε διαφορετικές γωνίες λαμβάνονται με περιστροφή του τραπεζιού με βήμα 30° (12 μετρήσεις ανά μαγνητόμετρο). Προκειμένου να δημιουργηθούν διαφορετικά

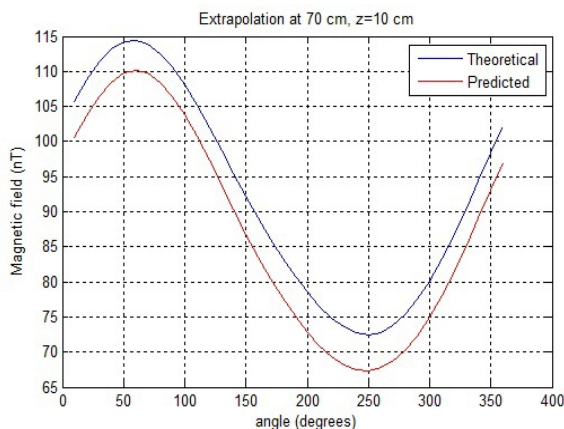
μοντέλα, το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυχαίο σημείο παρατήρησης (μαγνητόμετρο) παραμορφώνεται κατά ένα μέγιστο 5%. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται 29 φορές. Όλα τα 30 προβλεπόμενα διπολικά μοντέλα έχουν σχετικό σφάλμα RMS μικρότερο από 5%, επικυρώνοντας έτσι την μέθοδο πρόβλεψης ακόμα και σε απαιτητικές περιπτώσεις, όπου ο αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν από τον αλγόριθμο είναι μεγάλος. Στο Σχήμα 6.5, το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου συγκρίνεται με το μέτρο του προβλεπόμενου μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα από τα 30 προκύπτοντα μοντέλα. Προφανώς, το αποτέλεσμα προσαρμογής του μοντέλου στις μετρήσεις που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος PSO είναι ακριβές κοντά στα σημεία παρατήρησης όσον αφορά τη σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου.



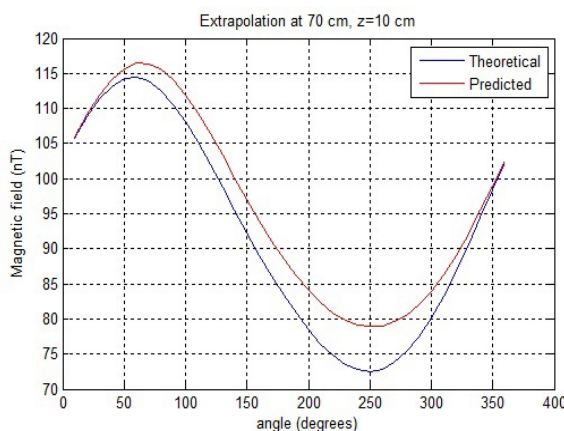
ΣΧΗΜΑ 6.5: Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου στα σημεία μέτρησης.

Ωστόσο, όταν επιχειρείται πρόβλεψη σε διαφορετική απόσταση των 70 cm, όπου μπορεί να έχει τοποθετηθεί ευαίσθητος μετρητικός εξοπλισμός, η μαγνητική συμπεριφορά του παραπάνω μοντέλου διαφέρει σημαντικά από την θεωρητική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.6, με αποτέλεσμα υποεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου.

Ομοίως, η απόκλιση από τη θεωρητική μαγνητική συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7, όπου χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό εκτιμώμενο μοντέλο για πρόβλεψη στην απόσταση των 70 cm. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η υπερεκτίμηση όσο και η υποεκτίμηση της μαγνητικής υπογραφής είναι εξίσου ανεπιθύμητες για λόγους μαγνητικής καθαρότητας.

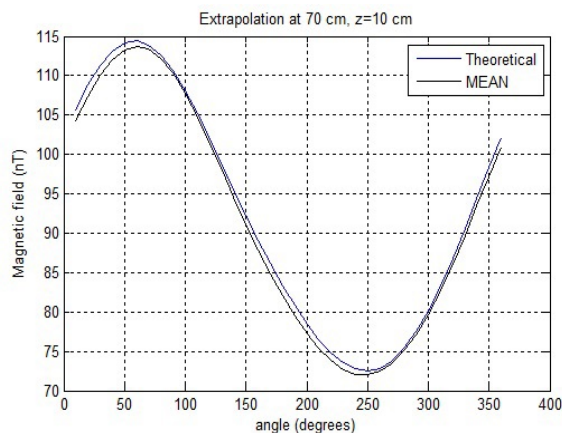


ΣΧΗΜΑ 6.6: Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου σε κύκλο ακτίνας 70 cm.



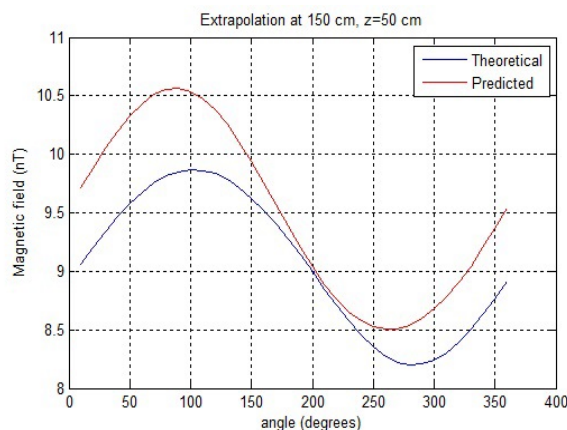
ΣΧΗΜΑ 6.7: Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου (από διαφορετικό διπολικό μοντέλο) μαγνητικού πεδίου σε κύκλο ακτίνας 70 cm.

Η προτεινόμενη τεχνική, χρησιμοποιώντας όλα τα 30 μοντέλα που παράγονται για την πρόβλεψη του πεδίου στα απομακρυσμένα σημεία ενδιαφέροντος και υπολογίζοντας τη μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από αυτά, καταλήγει σε μια μαγνητική συμπεριφορά ακριβέστερη από οποιαδήποτε από τα μεμονωμένα μοντέλα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8.

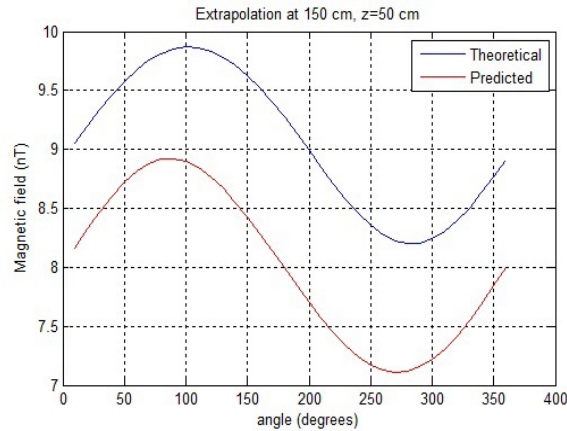


ΣΧΗΜΑ 6.8: Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και της μέσης τιμής των μοντελοποιημένων μαγνητικών πεδίων σε κύκλο ακτίνας 70 cm.

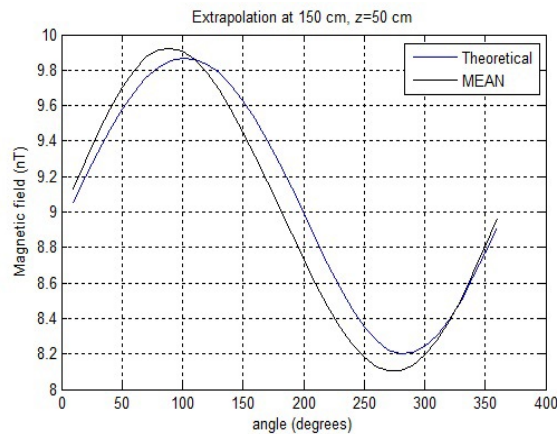
Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν σε διαφορετική απόσταση παρατήρησης, π.χ. σε ένα κύκλο με ακτίνα 1,5 m, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.9 - 6.11, χρησιμοποιώντας τα ίδια μοντέλα με την προηγούμενη περίπτωση. Και τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν την ίδια προβληματική απόδοση όσον αφορά την πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου σε σημεία διαφορετικά από τα σημεία μέτρησης. Από την άλλη πλευρά, το μέσο μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.11, επιβεβαιώνει την ικανότητα πρόβλεψης της πολύπλοκης μαγνητικής συμπεριφοράς μιας συσκευής με μεγαλύτερη ακρίβεια από κάθε μεμονωμένο εκτιμώμενο μοντέλο.



ΣΧΗΜΑ 6.9: Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου μαγνητικού πεδίου σε κύκλο ακτίνας 150 cm - υπερεκτίμηση του πεδίου.



ΣΧΗΜΑ 6.10: Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου (από διαφορετικό διπολικό μοντέλο) μαγνητικού πεδίου σε κύκλο ακτίνας 150 cm - υποεκτίμηση του πεδίου.



ΣΧΗΜΑ 6.11: Σχετική απόκλιση μεταξύ του μετρούμενου και της μέσης τιμής των μοντελοποιημένων μαγνητικών πεδίων σε κύκλο ακτίνας 150 cm.

6.5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια νέα τεχνική για την ακριβή πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς σύνθετων μαγνητικών πηγών σε διαφορετικά σημεία παρατήρησης από τα σημεία μέτρησης. Η μέθοδος αξιολογείται τόσο με προσομοιώσεις όσο και με πραγματικές μετρήσεις. Δεδομένου ότι η πρόβλεψη του μοντέλου προέρχεται από στοχαστικούς αλγόριθμους (PSO, GA, κλπ.), είναι πιθανό να υπάρξουν πολλαπλές λύσεις όσον αφορά τις παραμέτρους του, ειδικά σε περιπτώσεις που εξετάζονται πολλαπλές διπολικές πηγές. Ωστόσο, αν το κάθε μεμονωμένο μοντέλο είναι αποδεκτό από την άποψη του RMS, πρέπει να συμπεριληφθεί στο σύνολο των λύσεων. Τα αποτελέσματα της τεχνικής επιβεβαιώνουν ότι η μέθοδος υπερνικά την ανακρίβεια της πρόβλεψης της μαγνητικής υπογραφής σύνθετων

μαγνητικών πηγών αποτελούμενων από περισσότερα από 3 δίπολα από την άποψη του προβλεπόμενου μαγνητικού πεδίου σε απομακρυσμένα σημεία ενδιαφέροντος. Ως εκ τούτου, η προτεινόμενη προσέγγιση ενισχύει την ακρίβεια στη μελέτη μαγνητικά καθαρών σημείων σε διαστημικές αποστολές.

Κεφάλαιο 7

Μέθοδοι Μοντελοποίησης Μαγνητικών Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας

7.1 Εισαγωγή

Πρόσφατες και μελλοντικές διαστημικές αποστολές (BepiColombo, Solar Orbiter, JUICE), έχουν αυστηρές απαιτήσεις για μαγνητική καθαρότητα αργά χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων [24, 32]. Το εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος τυπικά έχει ένα ανώτερο όριο αρκετών δεκάδων kHz, ενώ το κατώτερο όριο βρίσκεται κάτω από την περιοχή των mHz με χρονικές περιόδους ωρών ή περισσότερο και εκτείνεται ουσιαστικά σε χρονικά σταθερά μαγνητικά φαινόμενα. Συνεπώς, αυτές οι αυστηρές απαιτήσεις περιλαμβάνουν μετρήσεις και χαρακτηρισμό της χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής συμπεριφοράς διαστημικού εξοπλισμού [16] και αναπόφευκτα οδηγούν στην ανάπτυξη συμπληρωματικών μεθόδων επαλήθευσης μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας σε διαστημικές αποστολές [39]. Οι υπάρχουσες συμβατικές τεχνικές, ωστόσο, αντιμετωπίζουν τη χειρότερη περίπτωση ακτινοβολούμενων μαγνητικών εκπομπών μετρώντας το νόμο ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση παρατήρησης και συχνά αποτυγχάνουν να παρέχουν ακριβείς εκτιμήσεις [48]. Μετρήσεις και μοντελοποίηση χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και σε άλλες εφαρμογές, συγκεκριμένα στην πρόβλεψη της μαγνητικής υπογραφής κινούμενων οχημάτων όπως πλοία ή τρένα [4, 6].

Στην παρούσα διατριβή, οι υφιστάμενες μέθοδοι επαλήθευσης μαγνητικής καθαρότητας σταθερών μαγνητικών πεδίων επεκτείνονται για την κάλυψη των απαιτήσεων μαγνητικής καθαρότητας αργά μεταβαλλόμενων πεδίων. Συνεπώς, μια νέα μέθοδος εισάγεται για την επαλήθευση μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας σε επίπεδο μονάδας και συστήματος. Η

προτεινόμενη προσέγγιση χρησιμοποιεί την στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων PSO προκειμένου να εκτιμηθεί ένας μικρός αριθμός μαγνητικών πηγών τα οποία μπορούν να μιμηθούν με ακρίβεια το φάσμα του μετρηθέντος μαγνητικού πεδίου που ακτινοβολείται από μια συσκευή υπό εξέταση. Η προτεινόμενη προσέγγιση συνεπάγεται τον προσδιορισμό των παραμέτρων (διανύσματα θέσεων και μαγνητικών ροπών) ενός μοντέλου μαγνητικών πηγών στην περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος, με βάση ένα σύνολο μετρήσεων φάσματος μαγνητικού πεδίου. Το προκύπτον μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιπροσωπεύσει πραγματικό εξοπλισμό διαστημικών σκαφών.

7.2 Μαθηματικό υπόβαθρο

Προκειμένου να ληφθούν υπ' όψιν οι απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας για αργά μεταβαλλόμενα πεδία που καθορίζονται στις διαστημικές αποστολές, η εξεταζόμενη περιοχή συχνοτήτων αναμένεται να φθάσει τα 250 kHz. Χωρίς απώλεια της γενικότητας, υποτίθεται ότι ένα χωρικά περιορισμένο σύστημα φορτίων και ρευμάτων μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο και μπορεί να περιγραφεί από τη μαγνητική διπολική ροπή:

$$\mathbf{m}(\mathbf{r}', t) = \mathbf{m}(\mathbf{r}')e^{-i\omega t} \quad (7.1)$$

Δεδομένου ότι η συχνότητα $f = \omega/2\pi$ της μαγνητικής ροπής αναμένεται να φτάσει τα 250 kHz, καταλήγοντας σε μήκος κύματος 1,2 km ή μεγαλύτερο και τα σημεία παρατήρησης κατά τη διάρκεια μετρήσεων στο έδαφος (καθώς και σε πτήση) θα βρίσκονται πολύ κοντά στη συσκευή (συνήθως τάξης μεγέθους m), είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι το εκπεμπόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ημι-στατικό [27]. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από μια ημιτονοειδώς ταλαντούμενη μαγνητική ροπή σε ένα σημείο παρατήρησης \mathbf{r} μπορεί να εκφραστεί:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{e^{-i\omega t} \mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\mathbf{r} - \mathbf{r}')[(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdot \mathbf{m}]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^5} - \frac{\mathbf{m}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \right] \quad (7.2)$$

όπου \mathbf{r}' είναι η θέση της μαγνητικής ροπής \mathbf{m} στο σύστημα συντεταγμένων που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις και μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου. Προφανώς, το μαγνητικό πεδίο είναι το στατικό μαγνητικό διπολικό πεδίο, που ταλαντώνεται στο χρόνο με τη συχνότητα της μαγνητικής ροπής ω .

Δεδομένου ότι τα περισσότερα μαγνητόμετρα και πηνία αναζήτησης μετρούν τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου σε τρεις άξονες, η ανάλυση συνήθως πραγματοποιείται σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων. Τα σημεία μέτρησης (αισθητήρες) βρίσκονται στις θέσεις $\mathbf{r}_{0j} = (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j})$, $j = 1, 2, \dots, N_{mag}$. Επιπλέον, θεωρείται ότι η συσκευή υπό εξέταση

είναι τοποθετημένη στην αρχή των αξόνων και μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα σύνολο από M μαγνητικές διπολικές πηγές που βρίσκονται στο $\mathbf{r}'_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$, με μαγνητικές ροπές:

$$\mathbf{m}_i = m_{i_x} \hat{\mathbf{x}} + m_{i_y} \hat{\mathbf{y}} + m_{i_z} \hat{\mathbf{z}} \quad (7.3)$$

Για λόγους απλότητας, θεωρείται ότι ο αριθμός των μαγνητικών διπόλων M αντιστοιχεί επίσης στις συχνότητες ταλάντωσης ω_i των μαγνητικών ροπών των διπόλων και συνεπώς, κάθε μαγνητικό δίπολο παρουσιάζει μία ξεχωριστή συχνότητα ταλάντωσης. Οι χρονικά μεταβαλλόμενες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου που παράγονται από το μαγνητικό δίπολο i στο σημείο παρατήρησης j μπορούν να υπολογιστούν:

$$\begin{aligned} B_{x_{ij}}(t) &= \frac{\mu_0 e^{-i\omega_i t}}{4\pi} \left[\frac{3(x_{0j} - x_i)}{\rho_{ij}^5} L_{ij} - \frac{m_{i_x}}{\rho_{ij}^3} \right] \\ B_{y_{ij}}(t) &= \frac{\mu_0 e^{-i\omega_i t}}{4\pi} \left[\frac{3(y_{0j} - y_i)}{\rho_{ij}^5} L_{ij} - \frac{m_{i_y}}{\rho_{ij}^3} \right] \\ B_{z_{ij}}(t) &= \frac{\mu_0 e^{-i\omega_i t}}{4\pi} \left[\frac{3(z_{0j} - z_i)}{\rho_{ij}^5} L_{ij} - \frac{m_{i_z}}{\rho_{ij}^3} \right] \end{aligned} \quad (7.4)$$

όπου το εσωτερικό γινόμενο L_{ij} είναι:

$$L_{ij} = m_{i_x}(x_{0j} - x_i) + m_{i_y}(y_{0j} - y_i) + m_{i_z}(z_{0j} - z_i) \quad (7.5)$$

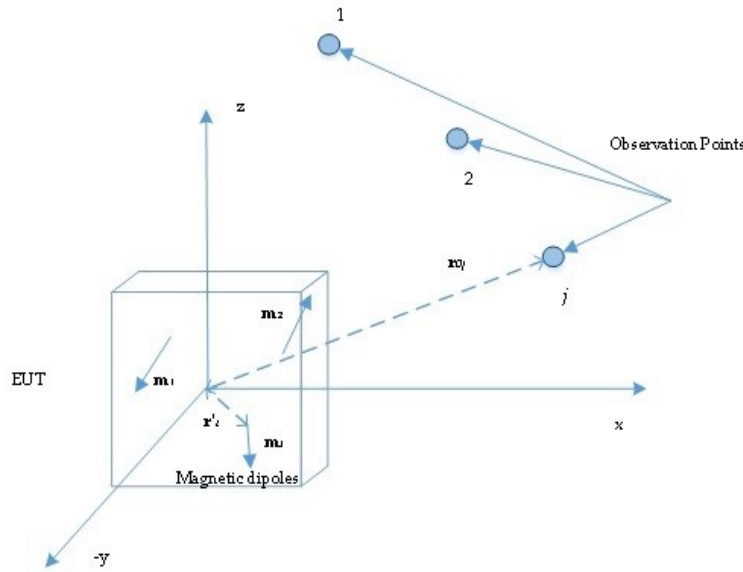
και ρ_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της πηγής:

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_{0j} - x_i)^2 + (y_{0j} - y_i)^2 + (z_{0j} - z_i)^2} \quad (7.6)$$

ακολουθώντας την ανάλυση για το στατικό μαγνητικό πεδίο. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο από τα M μαγνητικά δίπολα στο σημείο παρατήρησης j μπορεί να εκφραστεί ως υπέρθεση όλων των μεμονωμένων συνεισφορών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.1:

$$\mathbf{B}_j(t) = \sum_{i=1}^M e^{-i\omega_i t} B_{x_{ij}} \hat{\mathbf{x}} + \sum_{i=1}^M e^{-i\omega_i t} B_{y_{ij}} \hat{\mathbf{y}} + \sum_{i=1}^M e^{-i\omega_i t} B_{z_{ij}} \hat{\mathbf{z}} \quad (7.7)$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να μετασχηματιστεί στο πεδίο συχνότητας, μπορεί να διεξαχθεί ανάλυση Fourier και κάθε συχνотική συνιστώσα του προκύπτοντος φάσματος μαγνητικού πεδίου μπορεί να αντιμετωπιστεί χωριστά για σκοπούς μοντελοποίησης, όπως στην περίπτωση του στατικού πεδίου. Επομένως, το πεδίο που παράγεται από μια πηγή μαγνητικού διπόλου μπορεί να υπολογιστεί για κάθε μεμονωμένη συχνότητα (σταθερή κατάσταση -



ΣΧΗΜΑ 7.1: Απεικόνιση του προβλήματος.

AC steady state) με τη χρήση της εξίσωσης (7.4) χωρίς όμως τη χρονική εξάρτηση $e^{-i\omega t}$. Το συνολικό φάσμα του μαγνητικού πεδίου στα σημεία μέτρησης $\tilde{\mathbf{B}}_j(f)$ μπορεί στη συνέχεια να συναρμολογηθεί ως υπέρθεση των επιμέρους συχνοτικών συνιστωσών Fourier:

$$\tilde{\mathbf{B}}_j(t) = \sum_{i=1}^M B_{x_{ij}} \hat{x} + \sum_{i=1}^M B_{y_{ij}} \hat{y} + \sum_{i=1}^M B_{z_{ij}} \hat{z} \quad (7.8)$$

7.3 Περιγραφή της Μεθόδου

Αναφερόμενοι στο Σχήμα 7.1, τα σημεία παρατήρησης $j = 1, 2, \dots, N_{mag}$ θεωρείται ότι είναι μαγνητόμετρα ή πηνία αναζήτησης τριών αξόνων που καταγράφουν τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής $B(x_j)(t), B(y_j)(t), B(z_j)(t)$ στο πεδίο του χρόνου. Το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να αποθηκευτεί σε μια μήτρα $\mathbf{B}_t(t)$ με διαστάσεις $(3 \times N_{mag} \times t)$. Στη συνέχεια, μπορεί να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform - FFT), προκειμένου να εκτιμηθεί το φάσμα των συνιστωσών μαγνητικού πεδίου $\tilde{B}_{x_j}(f), \tilde{B}_{y_j}(f), \tilde{B}_{z_j}(f)$ στο j μαγνητόμετρο.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την ημι-στατική φύση του μαγνητικού πεδίου, η προτεινόμενη προσέγγιση περιλαμβάνει τη διερεύνηση μιας μοναδικής συχνότητας f_i , η οποία μπορεί να επεξεργαστεί παρόμοια με τη στατική περίπτωση DC και να μοντελοποιηθεί μεμονωμένα. Για κάθε συχνότητα f_i εισάγεται μία μήτρα B_{meas} με διαστάσεις $(3 \times N_{mag})$, που περιέχει τις τιμές των φασμάτων $\tilde{B}_{x_j}(f_i), \tilde{B}_{y_j}(f_i), \tilde{B}_{z_j}(f_i)$.

Αυτές οι τιμές στη συνέχεια μοντελοποιούνται με ένα δίπολο με μαγνητική ροπή που ταλαντώνεται στη συχνότητα f_i , δημιουργώντας έτσι ένα μοντέλο της μαγνητικής υπογραφής της συσκευής για τη συγκεκριμένη συχνότητα. Οι παράμετροι της μαγνητικής πηγής που πρέπει να εκτιμηθούν από την βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων PSO για τη συχνότητα f_i είναι η θέση του διπόλου (x_i, y_i, z_i) και η μαγνητική ροπή του $(m_{i_x}, m_{i_y}, m_{i_z})$, εφόσον κάθε συχνότητα θεωρείται ότι μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα μόνο δίπολο. Σε περιπτώσεις όπου το μαγνητικό πεδίο της συσκευής περιλαμβάνει αρκετές πηγές ακτινοβολίας στην ίδια συχνότητα, η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί ώστε να συμπεριλάβει τη μοντελοποίηση πολλαπλών διπόλων, όπως στις καθιερωμένες τεχνικές μοντελοποίησης πολλαπλών διπόλων για σταθερά μαγνητικά πεδία.

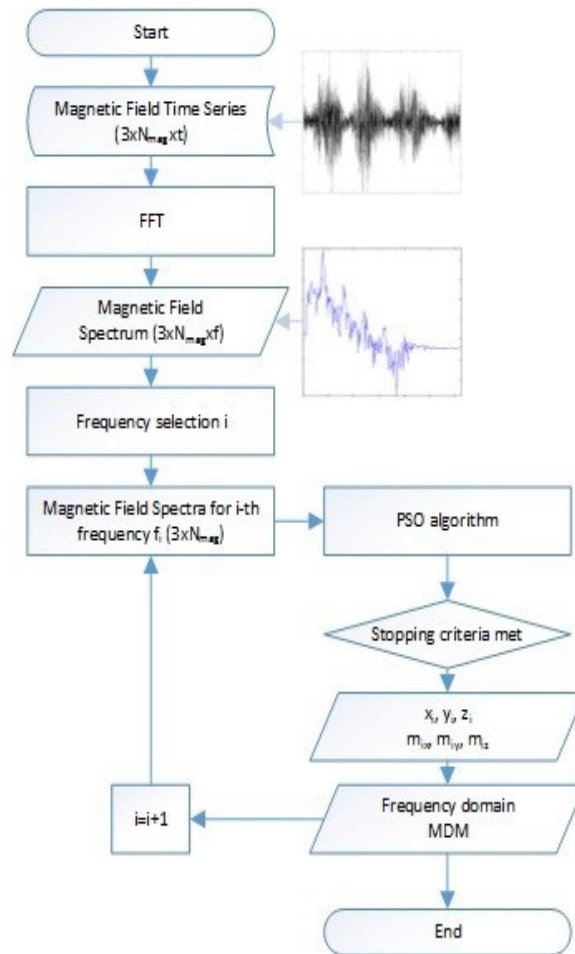
Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις διπολικές εξισώσεις (7.4) - (7.7) για να προσδιορίσει τις 6 παραμέτρους του μαγνητικού διπόλου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναδημιουργία του ακτινοβολούμενου μαγνητικού πεδίου της συσκευής για τη συχνότητα f_i . Μετά τη χρήση της (7.4) (χωρίς τη χρονική εξάρτηση), χρησιμοποιώντας τις θέσεις των σημείων παρατήρησης $\mathbf{r}_{0j} = (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j})$, $j = 1, 2, \dots, N_{mag}$ και τις αρχικά τυχαίες επιλεγμένες παραμέτρους του διπόλου, το μαγνητικό πεδίο στα σημεία παρατήρησης $B_{dx_j}, B_{dy_j}, B_{dz_j}$ υπολογίζεται για τη συγκεκριμένη συχνότητα f_i . Μια μήτρα \mathbf{B}_d διαστάσεων $(3 \times N_{mag})$ εισάγεται προκειμένου να συμπεριληφθεί το μαγνητικό πεδίο που παράγεται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου της PSO.

Καθώς ο αλγόριθμος εκτυλίσσεται, κάθε πράκτορας ενημερώνει τη θέση και την ταχύτητά του σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.7), (3.8) και στη συνέχεια η εξίσωση (7.4) χρησιμοποιείται για την ενημέρωση του πίνακα \mathbf{B}_d . Επιπλέον, εισάγονται δύο νέοι $(3 \times N_{mag})$ πίνακες \mathbf{B}_{pbest} και \mathbf{B}_{gbest} , οι οποίοι περιέχουν τις τιμές του μαγνητικού πεδίου που αντιστοιχούν στη βέλτιστη προσωπική ($pbest$) και στη βέλτιστη καθολική ($gbest$) λύση αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος PSO προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση G_i :

$$G_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{N_{mag}} (\mathbf{B}_{gbest_{kj}} - \mathbf{B}_{meas_{kj}})^2}{3 \cdot M}} \quad (7.9)$$

όπου k αντιπροσωπεύει τις συνιστώσες x, y, z . Ο αλγόριθμος σταματά όταν το G_i ελαχιστοποιηθεί (ή όταν ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ολοκληρωθεί από τον αλγόριθμο), υποδεικνύοντας ότι το μαγνητικό πεδίο του εκτιμώμενου διπόλου μπορεί ουσιαστικά να αντιπροσωπεύει τις μετρήσεις του πραγματικού εξοπλισμού στη συγκεκριμένη συχνότητα f_i . Οι εκτιμώμενες παράμετροι του διπόλου περιλαμβάνουν τη θέση x_i, y_i, z_i και τη μαγνητική ροπή $m_{i_x}, m_{i_y}, m_{i_z}$ για την επιλεγμένη συχνότητα f_i . Η διαδικασία μοντελοποίησης μπορεί να επαναληφθεί για πολλές διαφορετικές συχνότητες (στην περίπτωση εκπομπών μαγνητικού

πεδίου στενής ζώνης) ή εναλλακτικά για μεγαλύτερες περιοχές συχνοτήτων (σε περίπτωση εκπομπών ευρείας ζώνης). Το διάγραμμα ροής της μεθόδου απεικονίζεται στο Σχήμα 7.2.



ΣΧΗΜΑ 7.2: Διάγραμμα ροής της μεθόδου μοντελοποίησης χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων.

Για την αξιολόγηση της καλύτερης προβλεπόμενης λύσης g_{best} , υπολογίζεται επιπλέον:

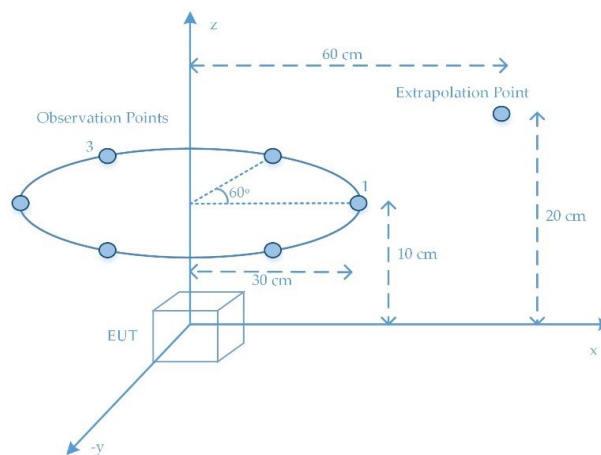
$$G_{rel}(f_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{N_{mag}} (\mathbf{B}_{g_{best}_{kj}} - \mathbf{B}_{meas_{kj}})^2}{\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{N_{mag}} (\mathbf{B}_{meas_{kj}})^2}} \quad (7.10)$$

Η συνάρτηση $G_{rel}(f_i)$ αντιπροσωπεύει τη σχετική απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων και των μοντελοποιημένων μαγνητικών πεδίων για κάθε συχνότητα f_i στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος μοντελοποίησης και χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την αξιολόγηση του προκύπτοντος μοντέλου (καταλληλότητα προσαρμογής - goodness of fit). Οι χαμηλές τιμές

του G_{rel} (συνήθως κάτω από το 10%) δείχνουν ότι το διπολικό μοντέλο μπορεί ουσιαστικά να αντιπροσωπεύει το μαγνητικό πεδίο της συσκευής υπό εξέταση.

7.4 Επαλήθευση της μεθόδου με προσομοιώσεις

Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα, η προτεινόμενη μέθοδος επαληθεύεται με προσομοιωμένες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου, που παράγονται από εικονικές πηγές μαγνητικού διπόλου που συνθέτουν μια συσκευή. Επιπλέον, η μετρητική διάταξη περιλαμβάνει 6 σημεία παρατήρησης ($N_{mag} = 6$) που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία μοντελοποίησης. Παρόλο που δύο σημεία παρατήρησης τριών αξόνων θεωρητικά επαρκούν για την πρόβλεψη ενός διπόλου (6 μεταβλητές), η χρήση περισσότερων προτιμάται συχνά για λόγους καλύτερης κάλυψης της μαγνητικής υπογραφής. Αυτά τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται σε έναν κύκλο ακτίνας $r_c = 0.3$ m και ύψους $z = 0,1$ m σε γωνίες $(N_{mag}-1) \cdot 60^\circ$, $N_{mag} = 1, 2, \dots, 6$, ομοιόμορφα γύρω από το τραπέζι που τοποθετείται η προς μέτρηση συσκευή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.3.



ΣΧΗΜΑ 7.3: Διάταξη για προσομοιώσεις αργά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων.

Ένας σύνθετος σχηματισμός μαγνητικών πηγών εξετάζεται, ο οποίος αποτελείται από τρεις εικονικές διπολικές πηγές. Το συνδυασμένο (θεωρητικό) μαγνητικό πεδίο στα σημεία παρατήρησης παράγεται στο πεδίο χρόνου, σύμφωνα με την εξίσωση (7.4) και μετασχηματίζεται στο πεδίο της συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στη συνέχεια, το φάσμα του μαγνητικού πεδίου παραμορφώνεται τυχαία για σκοπούς εισαγωγής αβεβαιότητας στη διαδικασία μέτρησης. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, πολλοί παράγοντες μπορεί να συμβάλουν στην αβεβαιότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης, συμπεριλαμβανομένης της ακρίβειας της θέσης των μαγνητομέτρων και των μαγνητικών πηγών (ή πιο συγκεκριμένα της σχετικής απόστασης μεταξύ των πηγών και των σημείων παρατήρησης), της θερμοκρασίας,

της υγρασίας κλπ. Οι συνιστώσες του φάσματος του μαγνητικού πεδίου παραμορφώνονται τυχαία από το μέγιστο ποσοστό παραμόρφωσης q και δημιουργούν τις προσομοιωμένες μετρήσεις, όπως και στην περίπτωση των στατικών μαγνητικών πεδίων.

Τα τρία εικονικά δίπολα που θεωρείται ότι συνθέτουν τη συσκευή υπό εξέταση βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις και, χωρίς απώλεια της γενικότητας, εμφανίζουν ημιτονοειδείς μαγνητικές ροπές σε διαφορετικές συχνότητες, προσανατολισμένες προς τον άξονα z . Οι ιδιότητες των μαγνητικών πηγών μπορούν να περιγραφούν:

- Ένα δίπολο που βρίσκεται στη θέση $(1, 1, 1)$ cm και έχει μια μαγνητική ροπή:

$$m_z = -30 \sin(2\pi f_2 t + \frac{\pi}{4}) - 40 \cos(2\pi f_3 t + \frac{\pi}{12}) \quad (7.11)$$

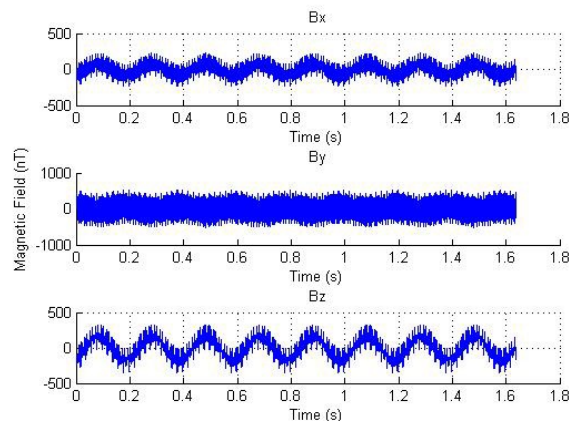
- Ένα δίπολο που βρίσκεται στη θέση $(10, 10, 5)$ cm και έχει μια μαγνητική ροπή:

$$m_z = 50 \cos(2\pi f_1 t + \frac{\pi}{6}) \quad (7.12)$$

- Ένα δίπολο που βρίσκεται στη θέση $(-10, 0, 0)$ cm και έχει μια μαγνητική ροπή:

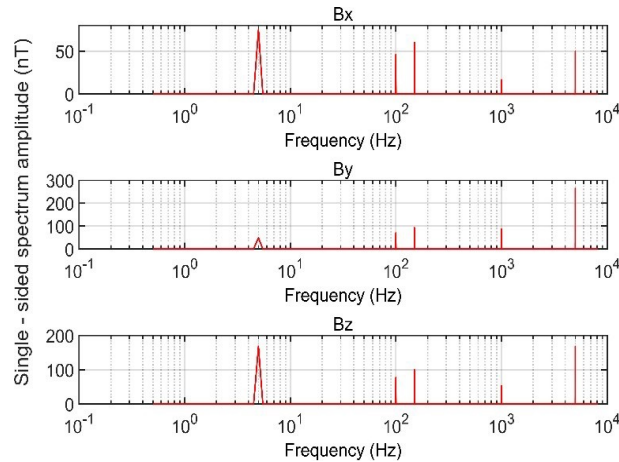
$$m_z = 60 \sin(2\pi f_5 t + \frac{\pi}{12}) + 20 \cos(2\pi f_4 t + \frac{\pi}{6}) \quad (7.13)$$

όπου οι συχνότητες $(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) = (5, 100, 150, 1000, 5000)$ Hz και η μαγνητική ροπή εκφράζονται σε mAm^2 . Το συνολικό παραμορφωμένο μαγνητικό πεδίο στο πεδίο του χρόνου (με μέγιστο ποσοστό παραμόρφωσης $q = 5\%$) στο σημείο παρατήρησης 3 του Σχήματος 7.3, το οποίο παράγεται από τη συνεισφορά και των τριών διπόλων φαίνεται στο Σχήμα 7.4, χρησιμοποιώντας συχνότητα δειγματοληψίας 16384 Hz.



ΣΧΗΜΑ 7.4: Παραμορφωμένο χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης 3.

Το προσομοιωμένο μετρούμενο φάσμα του μαγνητικού πεδίου στο ίδιο σημείο παρατήρησης απεικονίζεται στο Σχήμα 7.5.



ΣΧΗΜΑ 7.5: Παραμορφωμένο φάσμα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στο σημείο παρατήρησης 3.

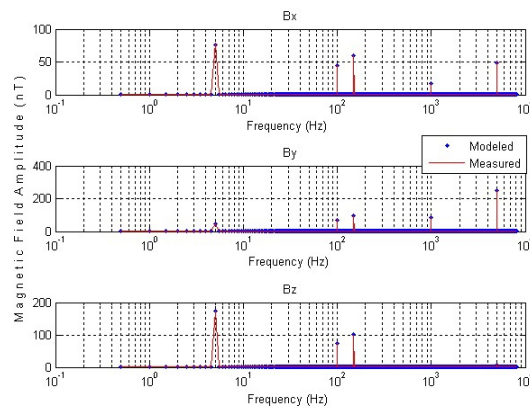
Προφανώς, οι κορυφές στο φάσμα του μαγνητικού πεδίου μπορούν να αναγνωριστούν εκ των προτέρων και οι τιμές φάσματος του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου μπορούν να αποθηκευτούν σε μια μήτρα \mathbf{B}_{meas} διαστάσεων $(3 \times N_{mag})$ για κάθε προσδιορισμένη συχνότητα. Επομένως, η διαδικασία μοντελοποίησης μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για αυτές τις συγκεκριμένες συχνότητες. Πρέπει να σημειωθεί ότι κανένας θόρυβος περιβάλλοντος δεν υπερτίθεται στο φάσμα του μαγνητικού πεδίου, δεδομένου ότι το επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος θεωρείται ότι είναι πολύ χαμηλό σε σύγκριση με το επίπεδο σήματος. Αυτή είναι μια λογική θεώρησης, λαμβάνοντας υπόψη ότι η απόσταση παρατήρησης είναι συνήθως όσο το δυνατόν πιο κοντά στην συσκευή (υψηλός σηματοθροβικός λόγος SNR). Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές για να αποκλειστεί ο θόρυβος περιβάλλοντος από τις μετρήσεις, π.χ. τεχνική δύο μαγνητομέτρων, κ.ά.

Κατά συνέπεια, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ξεχωριστών προβλημάτων στις προσδιορισμένες συχνότητες. Ο στοχαστικός αλγόριθμος PSO λαμβάνει ως είσοδο τις θέσεις των σημείων παρατήρησης (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) , $j = 1, 2, \dots, 6$ και τις παραμορφωμένες τιμές του φάσματος του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B}_{meas} για κάθε προσδιορισμένη συχνότητα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις 5 κορυφές συχνοτήτων του φάσματος, καταλήγοντας στην εκτίμηση διπολικού μοντέλου για κάθε επιλεγμένη συχνότητα. Στον Πίνακα 7.1, παρουσιάζονται τα προβλεπόμενα μοντέλα και για τις 5 συχνότητες. Προφανώς, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην πρόβλεψη των μαγνητικών διπόλων όσον αφορά τις θέσεις (x_i, y_i, z_i) και τις μαγνητικές ροπές τους $(m_{i_x}, m_{i_y}, m_{i_z})$.

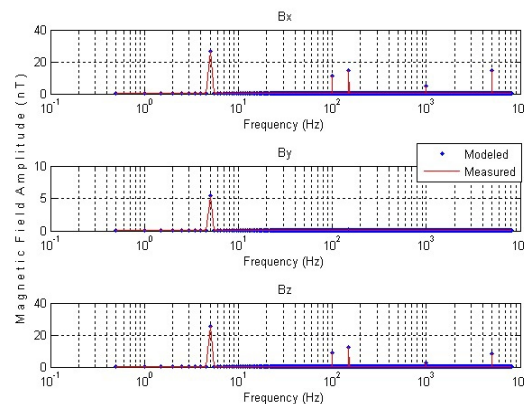
	Συχνότητα [Hz]	5	100	150	1000	5000
Θέσεις των διπόλων	x [cm]	10.0292	1.0624	1.0278	-9.9542	-9.8943
	y [cm]	10.0737	1.2156	0.9995	-0.1080	0.1614
	z [cm]	5.0220	1.0060	0.9946	-0.0433	-0.0097
Μαγνητική ροπή (απόλυτη τιμή)	m_x [mAm ²]	0.0328	0.0170	0.1994	0.1220	0.1110
	m_y [mAm ²]	0.1407	0.1909	0.0468	0.1369	0.5729
	m_z [mAm ²]	50.1207	29.7299	39.2995	20.1933	60.6072
	$ m $ [mAm ²]	50.12093	29.7305	39.3	20.1941	60.61

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: Εκτιμώμενα διπολικά μοντέλα για τις επιλεγμένες συχνότητες.

Ακολουθώντας τη μέθοδο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, μπορούν να υπολογιστούν τα φάσματα του μαγνητικού πεδίου από τα εκτιμώμενα μοντέλα. Επομένως, τα μετρούμενα φάσματα του μαγνητικού πεδίου μπορούν να συγκριθούν με τα εκτιμώμενα φάσματα που προκύπτουν από τη διαδικασία μοντελοποίησης. Στο Σχήμα 7.6 φαίνεται αυτή η σύγκριση για το σημείο μέτρησης 3 και στο Σχήμα 7.7 για ένα απομακρυσμένο σημείο ενδιαφέροντος. Όπως εύκολα παρατηρείται, οι εκτιμώμενες παράμετροι των μοντέλων στις προσδιορισμένες συχνότητες μπορούν να αντιπροσωπεύσουν αποτελεσματικά το μετρούμενο φάσμα του μαγνητικού πεδίου.



ΣΧΗΜΑ 7.6: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο φάσμα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στο σημείο μέτρησης 3.



ΣΧΗΜΑ 7.7: Μετρούμενο και μοντελοποιημένο φάσμα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου σε απομακρυσμένο σημείο παρατήρησης.

Τέλος, τα αντίστοιχα σφάλματα RMS που καταγράφονται στον Πίνακα 7.2 επιβεβαιώνουν την ικανότητα της μεθόδου να παράγει μοντέλα τα οποία μπορούν να αντιπροσωπεύουν αποτελεσματικά τη χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική συμπεριφορά μιας συσκευής υπό εξέταση.

Ακτινική απόσταση r [cm]	Ύψος z [cm]	Συνολικό RMS των υπολοίπων [nT]
30	10	1.2808
60	20	0.1486

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2: RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του μοντελοποιημένου φάσματος του μαγνητικού πεδίου.

7.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, η επέκταση των μεθόδων επαλήθευσης μαγνητικής καθαρότητας DC για την κατάλληλη ενσωμάτωση των απαιτήσεων μαγνητικής καθαρότητας χαμηλόσυχνων πεδίων πραγματοποιείται και επαληθεύεται με προσομοιώσεις. Η προτεινόμενη προσέγγιση χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της PSO για την πρόβλεψη διπολικών μοντέλων στο πεδίο της συχνότητας, με βάση ένα σύνολο μετρήσεων του φάσματος του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής υπό εξέταση. Συγκεκριμένα, η μέθοδος περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των παραμέτρων (διανύσματα θέσεων και μαγνητικών ροπών) των διπολικών πηγών που συνθέτουν τη συσκευή στην περιοχή συχνότητας ενδιαφέροντος. Οι υπολογιζόμενες παράμετροι των μοντέλων θα χρησιμοποιηθούν τελικά σε επίπεδο συστήματος για την πρόβλεψη του ακτινοβολούμενου μαγνητικού πεδίου της συσκευής στην απομακρυσμένη θέση των ευαίσθητων

μαγνητικών αισθητήρων του διαστημικού οχήματος, όπου απαιτείται AC μαγνητική καθαρότητα. Η προτεινόμενη τεχνική αξιολογείται μέσω προσομοιωμένων μετρήσεων που παράγονται από εικονικές πηγές μαγνητικού διπόλου, δηλαδή 3 δίπολα σε διαφορετικές θέσεις με μαγνητικές ροπές που ταλαντώνονται σε ξεχωριστές συχνότητες. Οι θεωρητικές τιμές των παραγόμενων μαγνητικών πεδίων από τις εικονικές πηγές διαταράσσονται τυχαία για σκοπούς εισαγωγής σφαλμάτων αβεβαιότητας και θορύβου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης. Τέλος, οι παραγόμενες εκπομπές μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας συγκρίνονται με τις εκτιμήσεις πεδίου που δημιουργούνται από τα προβλεπόμενα μοντέλα. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ικανότητα των εκτιμώμενων μοντέλων να εκπροσωπούν αποτελεσματικά τη μαγνητική συμπεριφορά μιας συσκευής στο πεδίο της συχνότητας.

Κεφάλαιο 8

Αποτελέσματα Μοντελοποίησης Χαμηλόσυχνων Μαγνητικών Πεδίων

8.1 Εισαγωγή

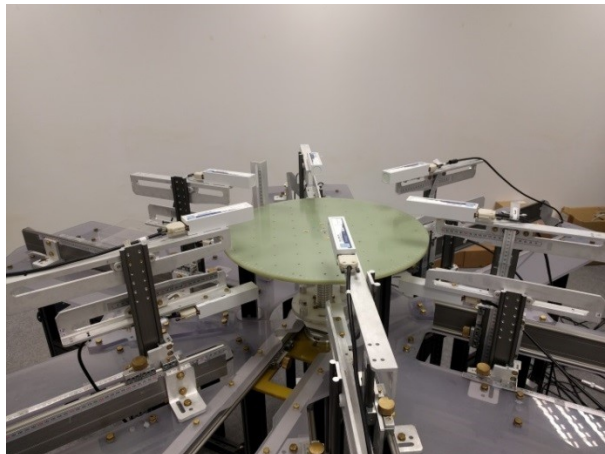
Στο παρόν κεφάλαιο η μέθοδος μοντελοποίησης μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας επικυρώνεται με μετρήσεις μιας πηγής με σαφώς καθορισμένη μαγνητική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται αναγνώριση των παραμέτρων ενός πηνίου τροφοδοσίας ρεύματος, με βάση ένα σύνολο μετρήσεων του κοντινού μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας. Ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων των πηγών θα επιτρέψει την εκτίμηση ενός αξιόπιστου μοντέλου που θα μπορεί να αντιπροσωπεύσει την αρχική πηγή.

8.2 Ρύθμιση της διάταξης και μεθοδολογία των μετρήσεων

Η Εγκατάσταση Πολλαπλών Μαγνητομέτρων (MMF) μπορεί να παρέχει ταυτόχρονες μετρήσεις χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων από τους 12 αισθητήρες ροής υψηλής απόδοσης. Η ευαισθησία αυτών των αισθητήρων κυμαίνεται συνήθως από DC έως περίπου 1 KHz.

Η διάταξη μαγνητομέτρων φαίνεται στο Σχήμα 8.1 και είναι ουσιαστικά η διάταξη μέτρησης 2. Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται σε δύο κύκλους πάνω και κάτω από το τραπέζι όπου τοποθετείται η συσκευή, προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης κάλυψη της μαγνητικής

υπογραφής της. Και οι δύο κύκλοι έχουν ακτίνα $r = 10$ cm και βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη ($z = 10$ και $z = -10$ cm). Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται σε σταθερές γωνίες 60° μεταξύ διαδοχικών ζευγών.



ΣΧΗΜΑ 8.1: Διάταξη μαγνητομέτρων για τις μετρήσεις χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ξεχωριστό χαρακτηριστικό αυτής της εγκατάστασης είναι η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου μιας συσκευής υπό την παρουσία του μαγνητικού πεδίου της Γης, σε αντίθεση με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις MCF που χρησιμοποιούν πηνία Helmholtz για να το αντισταθμίσουν. Η διαδικασία μέτρησης αποτελείται από τρεις διαδοχικές μετρήσεις (A - B - A):

- μέτρηση πεδίου περιβάλλοντος (\mathbf{B}_{before}).
- μέτρηση πεδίου της συσκευής μαζί με το πεδίο περιβάλλοντος ($\mathbf{B}_{EUT} + \mathbf{B}_{ambient}$).
- μέτρηση πεδίου περιβάλλοντος (\mathbf{B}_{after}).

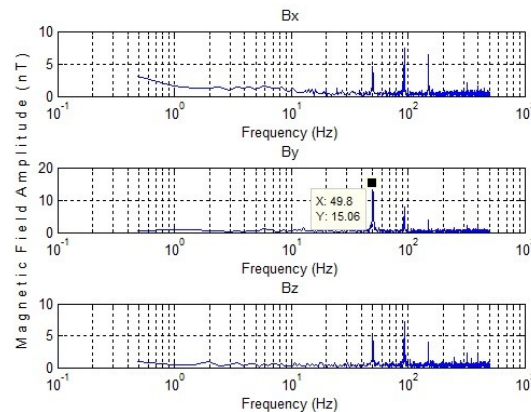
Ο συνολικός χρόνος μέτρησης διατηρείται πολύ μικρός (της τάξης του 1 min) προκειμένου να αποφευχθούν σημαντικές διακυμάνσεις του πεδίου περιβάλλοντος. Έπειτα, ο μέσος όρος των πεδίων περιβάλλοντος πριν και μετά τη μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής της συσκευής:

$$\frac{\mathbf{B}_{before} + \mathbf{B}_{after}}{2} \quad (8.1)$$

χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική ακύρωση του πεδίου περιβάλλοντος κατά τη μέτρηση της συσκευής.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια μέτρηση υποβάθρου χωρίς κάποια συσκευή εν λειτουργία προκειμένου να διερευνηθεί το προφίλ θορύβου κατά τη διάρκεια των πραγματικών μετρήσεων (background noise). Οι αισθητήρες μετρούν το μαγνητικό πεδίο στο πεδίο του χρόνου

με συχνότητα δειγματοληψίας 1 KHz. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο FFT για να μετασχηματίσει τη χρονική σειρά των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου για όλους τους 12 αισθητήρες στο πεδίο της συχνότητας. Το προφίλ θορύβου υποβάθρου για έναν αισθητήρα (παρόμοια προφίλ θορύβου λαμβάνονται για τους άλλους 11) απεικονίζεται στο Σχήμα 8.2.



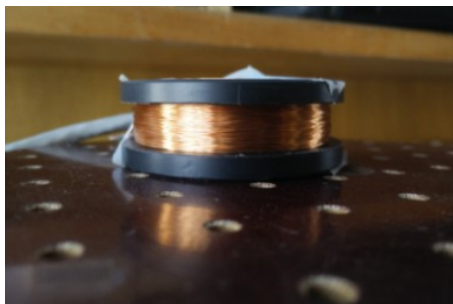
ΣΧΗΜΑ 8.2: Προφίλ του θορύβου υποβάθρου στη συχνοτική περιοχή ενδιαφέροντος.

Προφανώς, η μέτρηση θορύβου υποβάθρου επιβεβαιώνει την ικανότητα της μεθοδολογίας δοκιμής να ακυρώσει αποτελεσματικά το μαγνητικό πεδίο της Γης (κατά προσέγγιση πλάτους περίπου 50 μ T σε DC). Επιπλέον, οι εκπομπές που παρατηρούνται στη συχνότητα των 50 Hz και στις αρμονικές (100 και 150 Hz) προκαλούνται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή από άλλο κοντινό τεχνικό εξοπλισμό.

8.3 Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα μοντελοποίησης

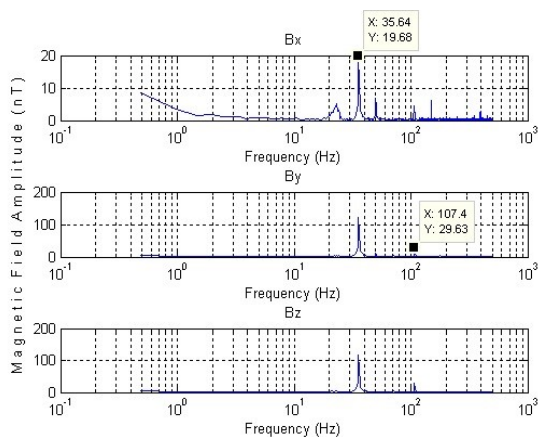
Ένα πηνίο τροφοδοσίας ρεύματος, που απεικονίζεται στο Σχήμα 8.3, χρησιμοποιείται ως EUT για την δημιουργία πραγματικών μετρήσεων και την επαλήθευση της μεθόδου. Οι παράμετροί του είναι (i) κυκλικό σχήμα, (ii) εσωτερική διάμετρος 50 mm, και (iii) 295 (\pm 5) περιστροφές. Το ρεύμα του πηνίου τροφοδοτείται από ζεύγος συνεστραμμένων συρμάτων και η συχνότητα λειτουργίας μπορεί να ρυθμιστεί σε μερικά Hz.

Συνεπώς, το πηνίο αναμένεται να παράγει μια ισοδύναμη μαγνητική ροπή περίπου 8.7 mAm² όταν τροφοδοτείται με ρεύμα 15 mA. Το πηνίο - EUT είναι τοποθετημένο σε $(x, y, z) = (5, -5, 1.3)$ cm πάνω στο τραπέζι και το εναλλασσόμενο ρεύμα λειτουργίας ρυθμίζεται περίπου στα 36 Hz. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θέση του πηνίου, η συχνότητα λειτουργίας και το επίπεδο πλάτους του ρεύματος είναι ενδεικτικά - παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με διαφορετικές παραμέτρους. Ακολουθώντας τη διαδικασία μέτρησης που



ΣΧΗΜΑ 8.3: Πηνίο τροφοδοτούμενο από ρεύμα και χρησιμοποιείται για την παραγωγή πραγματικών μετρήσεων.

περιγράφεται στην προηγούμενη υποενοότητα, οι 12 αισθητήρες μετράνε ταυτόχρονα το ακτινοβολούμενο μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Τα προκύπτοντα φάσματα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου απεικονίζονται στο Σχήμα 8.4 για τον αισθητήρα ροής που βρίσκεται σε (-5, 8,66, 10) cm.



ΣΧΗΜΑ 8.4: Μέτρηση στο πεδίο της συχνότητας της μαγνητικής υπογραφής του EUT - πηνίου.

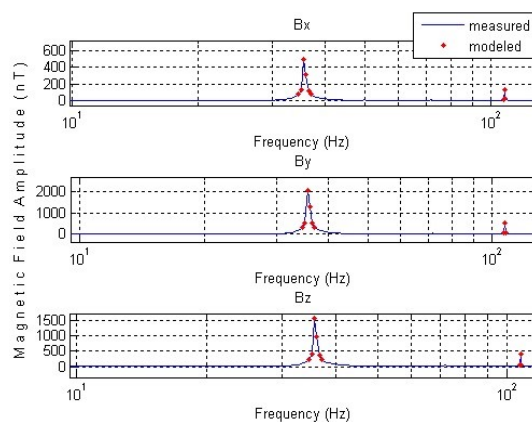
Σε σύγκριση με το φάσμα θορύβου υποβάθρου (Σχήμα 8.2), το φάσμα μαγνητικού πεδίου εμφανίζει δύο ξεχωριστές κορυφές στη βασική συχνότητα λειτουργίας του πηνίου (περίπου 36 Hz) και στην τρίτη αρμονική (περίπου 108 Hz), η οποία οφείλεται κατά κανόνα στη μη γραμμική συμπεριφορά του πηνίου.

Οι τιμές πεδίου από όλους τους αισθητήρες για τις συγκεκριμένες συχνότητες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια σύμφωνα με την προτεινόμενη προσέγγιση μοντελοποίησης που παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο για τη δημιουργία μοντέλων που μπορούν ουσιαστικά να αντιπροσωπεύουν τις μαγνητικές εκπομπές του πηνίου στο πεδίο της συχνότητας. Οι εκτιμώμενες παράμετροι των διπολικών μοντέλων MDM για τις προσδιορισμένες συχνότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1, μαζί με το κριτήριο αξιολόγησης της πρόβλεψης καλής αξιολόγησης (G_{rel} %).

Συχνότητα [Hz]	Θέση του προβλεπόμενου διπόλου [cm]			Μαγνητική ροπή (απόλυτη τιμή) [mA ^m]			G_{rel} [%]
	x	y	z	m_x	m_y	m_z	
34.668	5.26	-4.87	1.36	0.154	0.0798	1.1032	5.5
35.1563	5.27	-4.87	1.36	0.2796	0.141	1.9881	5.5
35.6445	5.27	-4.87	1.35	1.0517	0.531	7.5422	5.5
36.1328	5.27	-4.87	1.35	0.651	0.3277	4.6823	5.5
36.6211	5.26	-4.87	1.34	0.257	0.1264	1.8435	5.4
37.1094	5.27	-4.88	1.33	0.1607	0.0805	1.1607	5.5
106.9336	5.34	-4.83	1.49	0.0231	0.0159	0.1829	5.9
107.4219	5.35	-4.92	1.35	0.245	0.1201	1.9073	5.6
107.9102	5.29	-4.93	1.27	0.0434	0.0174	0.3279	5.7

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1: Εκτιμώμενες παράμετροι των διπολικών μοντέλων και προσαρμογή του μοντέλου (G_{rel}) για τις προσδιορισμένες συχνότητες.

Όπως παρατηρείται εμφανώς από τα αποτελέσματα, οι παράμετροι των εκτιμώμενων διπολικών μοντέλων είναι συνεπείς για τις διάφορες συχνότητες υπό εξέταση όσον αφορά τη θέση του προβλεπόμενου διπόλου σε σχέση με την πραγματική θέση του πηνίου. Η μέγιστη απόκλιση μεταξύ της εκτιμώμενης θέσης του αντικειμένου δοκιμής σε σχέση με τα μαγνητόμετρα και της πραγματικής του θέσης είναι περίπου 4 mm στη συχνότητα 106.9336 Hz. Επιπλέον, όσον αφορά την πρόβλεψη του πεδίου, το κριτήριο αξιολόγησης G_{rel} το οποίο εκφράζει την καταλληλότητα της προσαρμογής είναι της τάξης του 6% για όλες τις συχνότητες, το οποίο θεωρείται επαρκές για σκοπούς μοντελοποίησης. Οι μετρηθείσες και προβλεπόμενες τιμές φάσματος μαγνητικού πεδίου στον αισθητήρα που βρίσκεται στο (5, -8.66, 10) cm, ο οποίος είναι ο πλησιέστερος στο πηνίο, συγκρίνονται στο Σχήμα 8.5. Παρόμοια αποτελέσματα που λαμβάνονται για όλους τους 12 αισθητήρες επιβεβαιώνουν σαφώς την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης μοντελοποίησης για την αναπαραγωγή της μαγνητικής υπογραφής χαμηλής συχνότητας μιας συσκευής υπό εξέταση, προσδιορίζοντας τις παραμέτρους των διπολικών πηγών.



ΣΧΗΜΑ 8.5: Μετρούμενα και μοντελοποιημένα φάσματα των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στον πλησιέστερο αισθητήρα στο πηνίο.

8.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο επικυρώνεται η μέθοδος αναγνώρισης πηγής για εκπομπές χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων, επεκτείνοντας τις συμβατικές μεθόδους μαγνητικής καθαρότητας σταθερών μαγνητικών πεδίων, που στόχο έχει την κάλυψη των απαιτήσεων AC μαγνητικής καθαρότητας σε επίπεδο μονάδας, υποσυστήματος και συστήματος. Σε αυτές τις χρονικές κλίμακες, η φύση των ακτινοβολούμενων μαγνητικών πεδίων από διάφορες συσκευές είναι ημιστατική και συνεπώς η ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωριστά για κάθε συνιστώσα συχνότητας. Η μέθοδος επικυρώνεται μέσω μετρήσεων ενός πηνίου τροφοδοτούμενου από ρεύμα, χρησιμοποιώντας την κατασκευή πολλαπλών μαγνητόμετρων που αποτελείται από 12 μαγνητικούς αισθητήρες. Η διαδικασία μοντελοποίησης διεξάγεται στο πεδίο της συχνότητας και τα προκύπτοντα μοντέλα αξιολογούνται ως προς τη σχετική απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων και των μοντελοποιημένων μαγνητικών πεδίων. Σε όλες τις περιπτώσεις, η σχετική απόκλιση είναι της τάξης του 5%, γεγονός που επιβεβαιώνει την ακρίβεια του μοντέλου. Τέλος, η εκτιμώμενη θέση του αντικειμένου δοκιμής σε σχέση με την πραγματική του θέση στις συχνότητες ενδιαφέροντος δείχνει συνοχή με μέγιστη απόκλιση περίπου 4 mm. Τα αποτελέσματα εξασφαλίζουν σαφώς τη δυνατότητα της μεθόδου να αναπαράγει το μαγνητικό πεδίο χαμηλής συχνότητας μιας συσκευής υπό εξέταση, προσδιορίζοντας τις παραμέτρους της πηγής.

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα - Μελλοντική Εργασία

9.1 Συμπεράσματα

Η μέτρηση των μαγνητικών πεδίων που περιβάλλουν τη Γη, άλλους πλανήτες, κομήτες ή τον Ήλιο είναι ο πρωταρχικός στόχος πολλών διαστημικών αποστολών. Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου μπορεί να παρέχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με την εσωτερική δομή και τη σύνθεση αυτών των ουράνιων σωμάτων και μπορεί να βελτιώσει την κατανόηση των φυσικών μηχανισμών πίσω από τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μεταξύ τους. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν εντοπιστεί και διερευνηθεί διάφορα φυσικά φαινόμενα στο διάστημα λόγω προηγούμενων αποστολών στο διάστημα. Τυπικά παραδείγματα αυτών των φαινομένων είναι, μεταξύ άλλων, η αλληλεπίδραση του ηλιακού ανέμου με το γήινο μαγνητικό πεδίο, η έντονη μαγνητική δραστηριότητα των ηλιακών κηλίδων κλπ. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σταθερά (DC) καθώς και τα μεταβατικά (AC) φαινόμενα μαγνητικών πεδίων, συνήθως μέχρι συχνότητες 1 MHz.

Για τη μέτρηση των διαπλανητικών μαγνητικών πεδίων, σχεδόν κάθε διαστημικό σκάφος μεταφέρει ευαίσθητο εξοπλισμό μέτρησης, δηλαδή μαγνητόμετρα ροής, πηνία αναζήτησης ή μαγνητικούς βρόχους. Από τις πρώτες διαστημικές αποστολές, η ανάγκη καθορισμού μαγνητικά καθαρών σημείων στο διαστημόπλοιο προέκυψε. Οι μονάδες που τοποθετούνται επί του σκάφους και εξαρτήματα του διαστημοπλοίου εκπέμπουν ένα σύνθετο πεδίο στο χώρο των μαγνητομέτρων, παρεμβάλλοντας ουσιαστικά τις μετρήσεις. Επιπλέον, πολλοί μηχανισμοί διαστημικών σκαφών βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικές αρχές για ώθηση και επομένως εκπέμπουν μαγνητικά πεδία που μπορούν επίσης να διαταράξουν τις μετρήσεις.

Συνεπώς, έχει γίνει συνήθης πρακτική η εκτέλεση μετρήσεων μαγνητικού πεδίου πάνω στη Γη προκειμένου να καταγραφεί η μαγνητική συμπεριφορά των μεμονωμένων μονάδων και να χαρακτηριστούν. Τα μετρούμενα δεδομένα στη συνέχεια διαμορφώνονται με μοντέλο πολλαπλών μαγνητικών διπόλων (Multiple Magnetic Dipole Modeling - MDM) που παράγει το ίδιο μαγνητικό πεδίο με την αρχική μονάδα εξοπλισμού. Τα προγράμματα μαγνητικής καθαριότητας παρελθόντων ή σημερινών αποστολών για όλα τα διαστημικά οχήματα με μονάδες ή όργανα ευαίσθητα σε μαγνητικά πεδία έχουν βασιστεί στη μοντελοποίηση MDM σε επίπεδο μονάδας χρησιμοποιώντας τις εγκαταστάσεις Mobile Coil Facilities - (MCF). Αυτές οι εγκαταστάσεις τυπικά χρησιμοποιούν μικρό αριθμό μαγνητόμετρων και λαμβάνουν μαγνητική υπογραφή γύρω από μια συσκευή υπό εξέταση (Equipment Under Test - EUT) μέσω περιστροφικών μετρήσεων. Ωστόσο, οι μετρήσεις υπόκεινται σε σημαντικές περιβαλλοντικές διακυμάνσεις που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το πρώτο μέρος της παρούσας έρευνας, το οποίο οδήγησε σε μια Κατασκευή Πολλαπλών Μαγνητομέτρων (Multi Magnetometer Facility - MMF), αποσκοπεί στην εξάλειψη της αβεβαιότητας και των περιβαλλοντικών μεταβολών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων, καθώς και τα εκτιμώμενα διπολικά μοντέλα των EUT.

Αφού μετρηθούν και χαρακτηριστούν οι μονάδες που είναι τοποθετημένες στο διαστημικό σκάφος, μπορούν να διεξαχθούν προσομοιώσεις σχεδιασμού για την τοποθέτηση του εξοπλισμού σε σχέση με τα όργανα μέτρησης σε επίπεδο συστήματος, χρησιμοποιώντας τα μεμονωμένα μοντέλα μαγνητικού διπόλου κάθε μονάδας. Επομένως, η ακρίβεια των εκτιμώμενων μοντέλων καθώς και οι κατάλληλες τεχνικές πρόβλεψης του μαγνητικού πεδίου σε διάφορες αποστάσεις θα επιτρέψουν την ακριβή εκτίμηση του συνολικού μαγνητικού πεδίου στη θέση του ευαίσθητου εξοπλισμού. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου μέρους της παρούσας διατριβής, αναπτύσσεται μια αποτελεσματική μέθοδος για την ακριβή πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς μιας συσκευής στο χώρο, αποτρέποντας την υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου στη θέση των μαγνητομέτρων και επιτρέποντας τον προσδιορισμό μαγνητικά καθαρών σημείων κοντά στο διαστημικό σκάφος όπου ο ευαίσθητος εξοπλισμός μέτρησης μπορεί να τοποθετηθεί με ασφάλεια. Η τεχνική αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την ακριβή πρόβλεψη της μαγνητικής υπογραφής σύνθετων συσκευών που αποτελούνται από πολλαπλές μαγνητικές πηγές.

Τέλος, παρόλο που η καθιερωμένη μέθοδος πολλαπλών μαγνητικών διπόλων χρησιμοποιείται κατά κόρον για μετρήσεις σταθερών DC μαγνητικών πεδίων από διαστημικό εξοπλισμό, δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη μέθοδος επαλήθευσης της μαγνητικής καθαρότητας αργά μεταβαλλόμενων AC πεδίων. Στο τελευταίο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, οι καθιερωμένες τεχνικές για τις μεθόδους επαλήθευσης μαγνητικής καθαρότητας στατικών πεδίων επεκτείνονται για να καλύψουν τις απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας για επαλήθευση AC μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας σε επίπεδο μονάδας και συστήματος. Η

προτεινόμενη προσέγγιση χρησιμοποιεί στοχαστικές μεθόδους για τον εντοπισμό ενός μικρού αριθμού μαγνητικών διπόλων (τυπικά όχι περισσότερα από δύο) τα οποία μπορούν να μιμηθούν με ακρίβεια το φάσμα του μετρηθέντος μαγνητικού πεδίου που ακτινοβολείται από μια συσκευή, καταλήγοντας σε διπολικά μοντέλα στο πεδίο της συχνότητας. Η μέθοδος συνεπάγεται τον προσδιορισμό των παραμέτρων (θέσης και μαγνητικής ροπής) των διπολικών πηγών που συνθέτουν μια συσκευή στην περιοχή συχνοτικού ενδιαφέροντος, με στόχο την αναπαραγωγή του φάσματος του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι σύγχρονες μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής μπορούν να προσαρμοστούν αποτελεσματικά σε διάφορους επιστημονικούς τομείς. Συγκεκριμένα, η τεχνική MDM έχει ήδη εφαρμοστεί σε πολλές εφαρμογές, όπως η ανάλυση κοντινών πεδίων των κεραιών, η προσομοίωση ηλεκτροκαρδιογραφήματος και η μοντελοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στη μελέτη της ανθρώπινης εγκεφαλικής δραστηριότητας.

9.2 Μελλοντική Εργασία

Η μαγνητική καθαρότητα είναι μια κρίσιμη απαίτηση στις διαστημικές αποστολές, αλλά και σε προγράμματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αεροσκαφών. Τα επίπεδα της επιθυμητής μαγνητικής καθαρότητας καθίστανται όλο και πιο απαιτητικά και η ανάπτυξη νέων μεθόδων και τεχνικών για την ικανοποίηση των αυστηρών ορίων είναι επιτακτική. Παρόλο που αρκετές συζητημένες τεχνικές περιλαμβάνονται ήδη στην τυποποιημένη διαδικασία μετρήσεων Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, οι συμπληρωματικές μέθοδοι που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή πρέπει να επικυρωθούν πλήρως. Οι τεχνικές και οι μεθοδολογίες μέτρησης που αναπτύσσονται στην παρούσα εργασία, μετά από λεπτομερή και εκτεταμένη αξιολόγηση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπες μέθοδοι για μαγνητικές μετρήσεις και μοντελοποίηση εξοπλισμού διαστημικών σκαφών για σταθερά και αργά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία σε εφαρμογές μαγνητικής καθαρότητας. Επιπλέον, η ανάλυση θα πρέπει να επεκταθεί ώστε να συμπεριλάβει τις μεθόδους επαλήθευσης μαγνητικού πεδίου των διαστημικών σκαφών που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ως μαγνητικά δίπολα, π.χ. ηλιακές συστοιχίες, δρομολόγηση καλωδίων, ρόδες πτήσεων, κλπ. Στην πραγματικότητα, οι προαναφερθείσες πηγές εκπέμπουν σημαντικά μαγνητικά πεδία και ο χαρακτηρισμός και η μοντελοποίηση της συμβολής τους στο επίπεδο συστήματος για λόγους μαγνητικής καθαρότητας είναι απαραίτητη.

Βιβλιογραφία

- [1] Abkai, Ciamak and Jürgen Hesser: *Real-time ecg emulation: A multiple dipole model for electrocardiography simulation*. Studies in health technology and informatics, 142:7–9, 2009.
- [2] Acuna, Mario H: *Space-based magnetometers*. Review of scientific instruments, 73(11):3717–3736, 2002.
- [3] Balogh, AndrÚ: *Planetary magnetic field measurements: Missions and instrumentation*. Space science reviews, 152(1-4):23–97, 2010.
- [4] Bellan, D, P Betti, D Carillo, M D’Amore, M D’Arco, C De Capua, A Gaggelli, M Grandolfo, F Maradei, A Mariscotti, *et al.*: *Measurement and analysis of low-frequency magnetic-field emissions in rolling stock*. In *Proc. Eur. Symp. Electromagnetic Compatibility*, pages 1201–1204, 2002.
- [5] BIPM, IEC, ILAC IFCC, IUPAP IUPAC, and OIML ISO: *Evaluation of measurement data—guide for the expression of uncertainty in measurement. jcgim 100: 2008*. Citado en las, page 167, 2008.
- [6] Birsan, Marius: *Measurement of the extremely low frequency (elf) magnetic field emission from a ship*. Measurement Science and Technology, 22(8):085709, 2011.
- [7] Boschetti, D, G Gervasio, and I Marziali: *Montecarlo approach for magnetic cleanliness evaluation on spacecraft*. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on*, pages 1–3. IEEE, 2012.
- [8] Carrubba, Elisa, Axel Junge, Filippo Marliani, and Agostino Monorchio: *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.
- [9] Chen, D X and C Gu: *Ac susceptibilities of conducting cylinders and their applications in electromagnetic measurements*. IEEE transactions on magnetics, 41(9):2436–2446, 2005.

- [10] Diaz-Aguiló, Marc, Ignacio Mateos, Juan Ramos-Castro, Alberto Lobo, and Enrique García-Berro: *Design of the magnetic diagnostics unit onboard lisa pathfinder*. Aerospace science and technology, 26(1):53–59, 2013.
- [11] Dumond, O and R Berge: *Determination of the magnetic moment with spherical measurements and spherical harmonics modelling*. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on*, pages 1–5. IEEE, 2012.
- [12] ECSS-E-HB-20-07A: *Space engineering - electromagnetic compatibility handbook*. Technical report, Technical report, ESA Publication, 2012.
- [13] Elgallad, A, M El-Hawary, W Phillips, and A Sallam: *Pso-based neural network for dynamic bandwidth re-allocation [power system communication]*. In *Power Engineering 2002 Large Engineering Systems Conference on, LESCOPE 02*, pages 98–102. IEEE, 2002.
- [14] Endo, Hisashi, Toshiyuki Takagi, and Yoshifuru Saito: *A new current dipole model satisfying current continuity for inverse magnetic field source problems*. IEEE Transactions on Magnetics, 41(5):1748–1751, 2005.
- [15] Griffiths, David J and Mark A Heald: *Time-dependent generalizations of the biot-savart and coulomb laws*. American Journal of Physics, 59(2):111–117, 1991.
- [16] Güttler, C, O Hillenmaier, and U Auster: *Measurement of magnetic field emissions at low frequencies*. In *ESA Workshop on Aerospace EMC, Florence, Italy*, volume 30, 2009.
- [17] Jackson, John David: *Classical electrodynamics*. John Wiley & Sons, 2007.
- [18] Junge, A and F Marliani: *Verification of dc magnetic model predictions at spacecraft level*. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on*, pages 1–4. IEEE, 2012.
- [19] Junge, A, L Trougnou, and E Carrubba: *Measurements of induced equivalent magnetic dipoles moments for spacecraft units and components*. In *Proc. Workshop Aerosp. Eur. Space Agency (ESA)*, 2009.
- [20] Junge, Axel and 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.
- [21] Kakarakis, Sarantis Dimitrios J, Nicolas C Kapsalis, and Christos N Capsalis: *A semianalytical heuristic approach for prediction of eut’s multiple dipole model by reducing the number of heuristics*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 57(1):87–92, 2015.

- [22] Kakarakis, Sarantis Dimitrios J, Sotirios T Spantideas, Nicolas C Kapsalis, Christos N Capsalis, and Axel Junge: *A software-based calibration technique for characterizing the magnetic signature of euts in measuring facilities*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 59(2):334–341, 2017.
- [23] Kapsalis, Nikolaos C, Sarantis Dimitrios J Kakarakis, and Christos N Capsalis: *Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms*. Progress In Electromagnetics Research Letters, 34:111–122, 2012.
- [24] Kempkens, Klaus: *Emc issues on bepicolumbo spacecraft*. In *Electromagnetic Compatibility, Tokyo (EMC'14/Tokyo), 2014 International Symposium on*, pages 844–847. IEEE, 2014.
- [25] Kennedy, James: *Particle swarm optimization*. In *Encyclopedia of machine learning*, pages 760–766. Springer, 2011.
- [26] Knapp, David Goodwin: *On modeling magnetic fields on a sphere with dipoles and quadrupoles*. Technical report, US Govt. Print. Off., 1980.
- [27] Knoepfel, Heinz E: *Magnetic fields: a comprehensive theoretical treatise for practical use*. John Wiley & Sons, 2008.
- [28] Kort-Kamp, WJM and C Farina: *On the exact electric and magnetic fields of an electric dipole*. American Journal of Physics, 79(1):111–114, 2011.
- [29] Mehlem, K: *Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites*. IEEE Transactions on Magnetics, 14(5):1064–1071, 1978.
- [30] Mehlem, K, A Wiegand, and S Weickert: *New developments in magnetostatic cleanliness modeling*. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [31] Mikki, Said M and Yahia MM Antar: *Near-field analysis of electromagnetic interactions in antenna arrays through equivalent dipole models*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60(3):1381–1389, 2012.
- [32] Mueller, Daniel, Richard George Marsden, OC St Cyr, Holly Robin Gilbert, *et al.*: *Solar orbiter*. Solar Physics, 285(1-2):25–70, 2013.
- [33] Musmann, Günter: *Fluxgate magnetometers for space research*. BoD–Books on Demand, 2010.
- [34] Nara, Takaaki, Satoshi Suzuki, and Shigeru Ando: *A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients*. IEEE Transactions on Magnetics, 42(10):3291–3293, 2006.

- [35] Narvaez, P: *The magnetostatic cleanliness program for the cassini spacecraft*. In *The Cassini-Huygens Mission*, pages 385–394. Springer, 2004.
- [36] Pan, Siming, Jinguook Kim, Sungnam Kim, Jaesu Park, Heoncheol Oh, and Jun Fan: *An equivalent three-dipole model for ic radiated emissions based on tem cell measurements*. In *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 652–656. IEEE, 2010.
- [37] Paul, Clayton R: *Introduction to electromagnetic compatibility*, volume 184. John Wiley & Sons, 2006.
- [38] Primdahl, Fritz: *A Pedestrian's Approach to Magnetic Cleanliness*. Danish Space Research Institute, 1989.
- [39] Pudney, MA, CM Carr, SJ Schwartz, and SI Howarth: *Near-magnetic-field scaling for verification of spacecraft equipment*. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2(2):249–255, 2013.
- [40] Song, Hang, Jie Chen, Dongfang Zhou, Deting Hou, and Jingyu Lin: *An equivalent model of magnetic dipole for the slot coupling of shielding cavity*. In *Antennas, Propagation and EM Theory, 2008. ISAPE 2008. 8th International Symposium on*, pages 970–973. IEEE, 2008.
- [41] Spantideas, Sotirios, Nikolaos C Kapsalis, Sarantis Dimitrios J Kakarakis, and Christos N Capsalis: *A method of predicting composite magnetic sources employing particle swarm optimization*. *Progress In Electromagnetics Research M*, 39:161–170, 2014.
- [42] Spantideas, Sotirios T, Sarantis Dimitrios J Kakarakis, Nicolas C Kapsalis, and Christos N Capsalis: *Theoretical methods for studying distance and frequency scaling for ac magnetic fields in satellite missions*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(4):1–5, 2016.
- [43] Spantideas, ST, NC Kapsalis, S DJ Kakarakis, and CN Capsalis: *A novel technique for accurate extrapolation of complex magnetic sources*. In *Aerospace EMC (Aerospace EMC), 2016 ESA Workshop on*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [44] Stern, Theodore G and Scott DeLapp: *Techniques for magnetic cleanliness on spacecraft solar arrays*. In *2nd International Energy Conversion Engineering Conference*, page 5581, 2004.
- [45] Wang, J, B Yang, SH Wu, and JS Chen: *A novel binary particle swarm optimization with feedback for synthesizing thinned planar arrays*. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 25(14-15):1985–1998, 2011.

-
- [46] Weikert, S, K Mehlem, and A Wiegand: *Spacecraft magnetic cleanliness prediction and control*. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on*, pages 1–5. IEEE, 2012.
- [47] Wright, Sewall: *The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding, and selection in evolution*, volume 1. na, 1932.
- [48] Zacharias, Panagiotis P, Elpida G Chatzineofytou, Sotirios T Spantideas, and Christos N Capsalis: *Distance scaling method for accurate prediction of slowly varying magnetic fields in satellite missions*. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 5(2):281, 2016.