



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

**Ανάπτυξη Μεθόδων Μέτρησης και Ανάπτυξη
Αλγορίθμων Μοντελοποίησης και Ανάλυσης Μαγνητικής
Συμπεριφοράς Συσκευών για Επίτευξη Μαγνητικής
Καθαρότητας σε Διαστημικές Αποστολές**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σαράντης Δημήτριος Κακαράκης

Αθήνα, 2016



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

**Ανάπτυξη Μεθόδων Μέτρησης και Ανάπτυξη
Αλγορίθμων Μοντελοποίησης και Ανάλυσης Μαγνητικής
Συμπεριφοράς Συσκευών για Επίτευξη Μαγνητικής
Καθαρότητας σε Διαστημικές Αποστολές**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σαράντης Δημήτριος Κακαράκης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Χρήστος Ν. Καψάλης
Παναγιώτης Γ. Κωττής
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

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

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

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, 2016

.....
Σαράντης Δημήτριος Κακαράκης

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Σαράντης Δημήτριος Κακαράκης, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη στοχαστικών αλγορίθμων μοντελοποίησης και ανάλυσης μαγνητικής συμπεριφοράς συσκευών με χρήση σε μελέτες μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές. Επιπλέον, γίνεται μελέτη παραμέτρων σχετικά με τη διαδικασία της μέτρησης του μαγνητικού πεδίου της συσκευής προς μοντελοποίηση (EUT), αφού από το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο θα προκύψουν τα ισοδύναμα μοντέλα των συσκευών.

Αρχικά, στο κεφάλαιο 1, περιγράφεται η σημασία της μαγνητικής καθαρότητας στις διαστημικές αποστολές με αναφορά σε διαστημικές αποστολές του παρελθόντος όπου έγιναν προσπάθειες να επιτευχθεί. Επιπλέον παρουσιάζονται η διαδικασία και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε πιστοποιημένες εγκαταστάσεις καθώς και η προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την δημιουργία μοντέλων με ισοδύναμη μαγνητική συμπεριφορά με τον εξοπλισμό των διαστημικών αποστολών.

Στο κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται η αβεβαιότητα στην διαδικασία μετρήσεων αναλύοντας τα είδη αβεβαιότητας και τον τρόπο προσέγγισης και υπολογισμού με ενδεικτική εφαρμογή αναγνώρισης παραγόντων αβεβαιότητας στην διαδικασία μέτρησης μαγνητικού πεδίου σε μία πιστοποιημένη εγκατάσταση.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι δύο κατηγορίες στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης, PSO και GA, που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διατριβή για τη δημιουργία των αλγορίθμων που θα παράγουν τα ισοδύναμα μοντέλα του εξοπλισμού από μετρήσεις του κοντινού μαγνητικού πεδίου που παράγει.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο πρώτος στοχαστικός αλγόριθμος, που βασίζεται στην PSO, για δημιουργία μοντέλων με ισοδύναμη μαγνητική συμπεριφορά με ένα EUT. Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται το πρόβλημα, ο τρόπος προσέγγισης του αλγορίθμου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που παράγαγε ο αλγόριθμος με προσομοιωμένα EUT, επιβεβαιώνοντας την αποδοτικότητα του αλγορίθμου.

Ακολούθως, στα κεφάλαια 5 και 6 αναπτύσσονται δύο αλγόριθμοι, βασιζόμενοι στην προσέγγιση του κεφαλαίου 4, επικεντρωμένοι σε μεθοδολογία βαθμονόμησης (calibration) εγκαταστάσεων μέτρησης μαγνητικού πεδίου και σε δημιουργία

μοντέλου με ταυτόχρονη ύπαρξη διπόλου και τετραπόλου ενός EUT αντίστοιχα. Από τα αποτελέσματα των αλγορίθμων, επίσης, επιβεβαιώνεται η αποδοτικότητα τους.

Το κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τον δεύτερο στοχαστικό αλγόριθμο για μοντελοποίηση μαγνητικών πεδίων, με τον οποίο γίνεται μείωση του αριθμού των μεταβλητών προς υπολογισμό για την παραγωγή του μοντέλου. Ο αλγόριθμος αυτός έχει υλοποιηθεί και με PSO και με GA με αντίστοιχη αποδοτικότητα που επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα σε προσομοιωμένα EUT. Επιπλέον, με χρήση του αλγορίθμου αυτού, γίνεται μελέτη διατάξεων τοποθέτησης μαγνητομέτρων με σκοπό την πληρέστερη λήψη του μαγνητικού πεδίου ενός EUT δοκιμάζοντας 4 διαφορετικές διατάξεις και αξιολογώντας την ακρίβεια τους στη μοντελοποίηση ενός EUT.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8, οι αλγόριθμοι των κεφαλαίων 4 και 7 δοκιμάζονται σε πραγματικές μετρήσεις μαγνητικών πεδίων από EUT και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, επιβεβαιώνοντας εκ νέου την ικανότητα τους στην λύση του προβλήματος, ενώ στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής και τις μελλοντικές εργασίες.

Λέξεις κλειδιά: Μαγνητική καθαρότητα, Μοντελοποίηση με Πολλαπλά Δίπολα - Multiple Dipole Modeling (MDM), Αβεβαιότητα Μετρήσεων, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Βελτιστοποίηση Σμήνους Μονάδων, Μαγνητικό Δίπολο, Μαγνητικό Τετράπολο, Βαθμονόμηση.

Abstract

The present PhD thesis aims at the development of stochastic algorithms for modeling and analyzing the magnetic behavior of equipment for magnetic cleanliness study in space missions. Additionally, several parameters of the magnetic field's measuring procedure of Equipment under test (EUT) is studied, since the modeling of an EUT is based on the measured magnetic field it produces.

At first, in chapter 1, the importance of the magnetic cleanliness in space missions is explained with reference to older space missions where it was attempted. Moreover, the procedure and the equipment that is been used for magnetic field measurements in certified facilities are presented along with the approach used for extracting models with equivalent magnetic behavior to the EUTs in a spacecraft.

In chapter 2 the uncertainty in the measuring process is presented, analyzing its 2 types and the way to approach and calculate them with an indicative application of identifying uncertainty factors in the measuring process of a magnetic field in a certified facility.

In chapter 3, the two stochastic optimization methods, PSO and GA, which are used in the present thesis for the development of the algorithms that will produce the equivalent models of EUTs by using the magnetic field measurements it produces, are presented.

Chapter 4 presents the first stochastic algorithm, based on PSO, for modeling EUT. In this chapter the problem and the approach this thesis follows are described and the results that are produced for simulated EUTs are presented, confirming the algorithms performance.

Afterwards, in chapters 5 and 6, two algorithms are developed, based on the approach in chapter 4, that are focused on a calibration method for magnetic field's measuring facilities and on the modeling of EUT using simultaneously a dipole and a quadrupole to comprise the model respectively. Their performance is confirmed from the results that are produced and also presented in the chapter.

Chapter 7 includes the second stochastic algorithm for modeling magnetic fields, in which the number of variables, to be determined for the model, is reduced. This

algorithm has been developed with GA, initially, and then with PSO and both implementations have similar performance on simulated EUTs with accurate results. Additionally in this chapter, using the aforementioned algorithm, four multi-magnetometer setups are studied in order to propose a more capable setup in obtaining a more “complete” magnetic signature of EUTs for the modeling.

Finally, in chapter 8, the algorithms presented in chapters 4 and 7 are tested with real EUTs’ magnetic fields’ measurements and from the produced results their performance is, again, confirmed while, chapter 9 consists of the thesis conclusion and future work.

Key words: Magnetic Cleanliness, Multiple Dipole Modeling (MDM), Uncertainty, Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Magnetic Dipole, Magnetic Quadrupole, Calibration.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή είναι προϊόν πολυετών μελετών και εργασιών, οι οποίες δε θα ήταν δυνατές ή τουλάχιστον οι ίδιες, χωρίς τη συνεισφορά, τη διαρκή στήριξη και παρουσία σημαντικών προσώπων και ξεχουσών προσωπικοτήτων τόσο σε επιστημονικό, όσο και σε προσωπικό επίπεδο και σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε καθένα από αυτά τα πρόσωπα.

Κατ' αρχάς, ένα μεγάλο ευχαριστώ και ευγνωμοσύνη οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον Καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Χρήστο Καψάλη. Από την πρώτη στιγμή που με δέχτηκε στο Εργαστήριο του με εμπιστεύθηκε και με έκανε να νιώσω μέλος αυτής της οικογένειας στην οποία δεν είναι μόνο «Δάσκαλος», όπως τον αποκαλούμε, αλλά και δεύτερος πατέρας μας. Με την ξεχωριστή του προσωπικότητα, που συνδυάζει την σοβαρότητα και τον δυναμισμό με φιλικό προφίλ και ευχάριστη διάθεση, με βοήθησε σε κάθε βήμα της πορείας μου στο Εργαστήριο και με συμβούλεψε σωστά όποτε χρειάστηκε οδηγώντας με στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής και βελτιώνοντάς με ως άνθρωπο. Το μεγαλύτερο μέρος της διατριβής νιώθω πως οφείλεται στον «Δάσκαλο».

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου στο Εργαστήριο, με τους οποίους συνεργάστηκα όλα αυτά τα χρόνια, δέθηκα φιλικά μαζί τους και όποτε χρειάστηκα την βοήθειά τους ή και τις συμβουλές τους ήταν εκεί για να με στηρίξουν. Είναι οι άνθρωποι με τους οποίους γίναμε μια ομάδα, πιστέψαμε στο Εργαστήριο και προσπαθήσαμε να το κάνουμε ακόμα καλύτερο. Ζήσαμε μαζί ευχάριστες και δυσάρεστες καταστάσεις, επαγγελματικές και επιστημονικές, παρόλα αυτά μείναμε δεμένοι και με αμοιβαία αλληλοεκτίμηση. Εύχομαι να είστε καλά και να συνεχίσετε την επιτυχημένη πορεία σας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς μου επιτροπής, τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Παναγιώτη Κωττή και τον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, οι οποίοι είτε άμεσα είτε έμμεσα συνεισέφεραν στην εκπόνηση και βελτίωση των επιστημονικών μου εγχειρημάτων.

Φυσικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που είναι πάντα δίπλα μου. Τους ευχαριστώ για όλα όσα μου έχουν προσφέρει από τότε που γεννήθηκα, παρά τις όποιες δυσκολίες στην πορεία, για τις αξίες που μου δίδαξαν, τη μόρφωση που μου επέτρεψαν οι θυσίες τους να λάβω και τη στήριξη με κάθε τρόπο σε κάθε είδους πρόβλημα που συνάντησα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου, με στήριξαν, άκουσαν τα προβλήματά μου, με συμβούλεψαν, μου είπαν όσα δεν ήθελα να ακούσω, αλλά τα είπαν με αγάπη.

Στους γονείς και τους φίλους μου

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	1
1.1. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα και Μαγνητική καθαρότητα.....	1
1.2. Multiple Magnetic Dipole Modeling (MDM).....	8
1.3. Magnetic Coil Facilities (MCF)	9
1.3.1. Σύστημα πηνίων.....	10
1.3.2. Περιστρεφόμενο Τραπέζι.....	10
1.3.3. Τροφοδοσία.....	11
1.3.4. Σύστημα μαγνήτισης/απομαγνήτισης (PERM/DEPERM)	11
1.3.5. Μαγνητόμετρα	11
1.3.6. Σύστημα λήψης δεδομένων	12
1.4. Εφαρμογές του MDM σε διαστημικές αποστολές.....	15
1.4.1. Giotto	15
1.4.2. Ulysses	16
1.4.3. Cluster και ClusterII.....	17
1.4.4. Cassini.....	17
Κεφάλαιο 2 - Αβεβαιότητα Μετρήσεων.....	21
2.1 Εισαγωγή.....	21
2.2 Είδη αβεβαιότητας	22
2.3 Μοντελοποίηση μέτρησης	23
2.4 Υπολογισμός αβεβαιότητας τύπου A.....	24
2.5 Υπολογισμός αβεβαιότητας τύπου B	25
2.5.1 Κανονική κατανομή	26
2.5.2 Τριγωνική κατανομή.....	26
2.5.3 Ομοιόμορφη κατανομή	27
2.6 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας.....	27

2.7	Εντοπισμός παραγόντων αβεβαιότητας σε MCF εγκατάσταση.....	29
2.8	Στατιστική ανάλυση αβεβαιότητας σε πραγματικές μετρήσεις	29
Κεφάλαιο 3 - Στοχαστικοί αλγόριθμοι		33
3.1.	Εισαγωγή.....	33
3.2.	Γενετικοί αλγόριθμοι.....	34
3.3.	Βελτιστοποίηση σμήνους μονάδων - Particle swarm optimization (PSO) ...	38
3.3.1	Η πρώτη υλοποίηση	38
3.3.2	Υλοποίηση με χρήση Βάρους Αδράνειας.....	41
3.3.3	Περιοριστικός Παράγοντας	41
3.3.4	Εφαρμογές	42
3.4.	Συμπεράσματα	42
Κεφάλαιο 4 - Πρόβλεψη των παραμέτρων μοντέλων πολλαπλών μαγνητικών διπόλων από μετρήσεις του κοντινού μαγνητικού πεδίου με χρήση στοχαστικών αλγορίθμων.		45
4.1.	Εισαγωγή.....	45
4.2.	Μαθηματική ανάλυση του προβλήματος.....	46
4.3.	Εφαρμογή της PSO στο MDM πρόβλημα	48
4.4.	Αριθμητικά αποτελέσματα.....	49
4.4.1	Ένα δίπολο	49
4.4.2	Τρία δίπολα.....	51
4.5.	Συμπεράσματα	53
Κεφάλαιο 5 - Τεχνική βαθμονόμησης (calibration) βασισμένη σε αλγόριθμο για μετρητικές εγκαταστάσεις καθορισμού της μαγνητικής υπογραφής ενός EUT		57
5.1.	Εισαγωγή.....	57
5.2.	Ανάλυση της μεθόδου βαθμονόμησης.....	59
5.2.1	Μαθηματικό υπόβαθρο και περιγραφή αλγορίθμου	59
5.2.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης	61

5.3. Διαδικασία βαθμονόμησης σε πραγματικές εφαρμογές	63
5.4. Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις.....	64
5.5. Συμπεράσματα	70
Κεφάλαιο 6 - Μαγνητικό τετράπολο (Quadrupole).....	75
6.1. Εισαγωγή.....	75
6.2. Μαθηματική ανάλυση του προβλήματος.....	77
6.3. Εφαρμογή της PSO στο πρόβλημα	78
6.4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	79
6.4.1 Περίπτωση Α	79
6.4.2 Περίπτωση Β	81
6.4.3 Περίπτωση Γ.....	83
6.5. Συμπεράσματα	84
Κεφάλαιο 7 - Νέα ημι-αναλυτική ευριστική προσέγγιση για την πρόβλεψη του μοντέλου πολλαπλών διπόλων ενός EUT - Μελέτη διατάξεων τοποθέτησης των μαγνητομέτρων	87
7.1. Εισαγωγή.....	88
7.2. Μαθηματική ανάλυση του προβλήματος.....	89
7.3. Αλγόριθμος.....	90
7.4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	93
7.4.1 Περίπτωση Α:	93
7.4.2 Περίπτωση Β:.....	95
7.4.3 Περίπτωση Γ:	96
7.5. Υλοποίηση με PSO	98
7.6. Μελέτη διατάξεων τοποθέτησης των μαγνητομέτρων	103
7.6.1 Διάταξη 1	105
7.6.2 Διάταξη 2.....	106
7.6.3 Διάταξη 3.....	107

7.6.4 Διάταξη 4	107
7.6.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	108
7.7 Συμπεράσματα	111
Κεφάλαιο 8 - Εφαρμογή σε πραγματικές μετρήσεις	113
8.1. Εισαγωγή.....	113
8.2. Υπολογισμός MDM με χρήση του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 4	114
8.2.1 Περίπτωση 1	114
8.2.2 Περίπτωση 2	115
8.2.3 Περίπτωση 3	117
8.2.4 Περίπτωση 4	119
8.2.5 Περίπτωση 5	121
8.3. Υπολογισμός MDM με χρήση του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 7	123
8.3.1 Περίπτωση 1	123
8.3.2 Περίπτωση 2	124
8.3.3 Περίπτωση 3	126
8.3.4 Περίπτωση 4	128
8.3.5 Περίπτωση 5	130
8.4. Συμπεράσματα	131
Κεφάλαιο 9 - Συμπεράσματα – Σημεία στα οποία προάγεται η επιστήμη – Μελλοντική εργασία.....	133
9.1. Συμπεράσματα	133
9.2. Μελλοντική εργασία	136
Ευρετήριο εικόνων.....	137
Ευρετήριο πινάκων	141
Κατάλογος δημοσιεύσεων	143

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα και Μαγνητική καθαρότητα

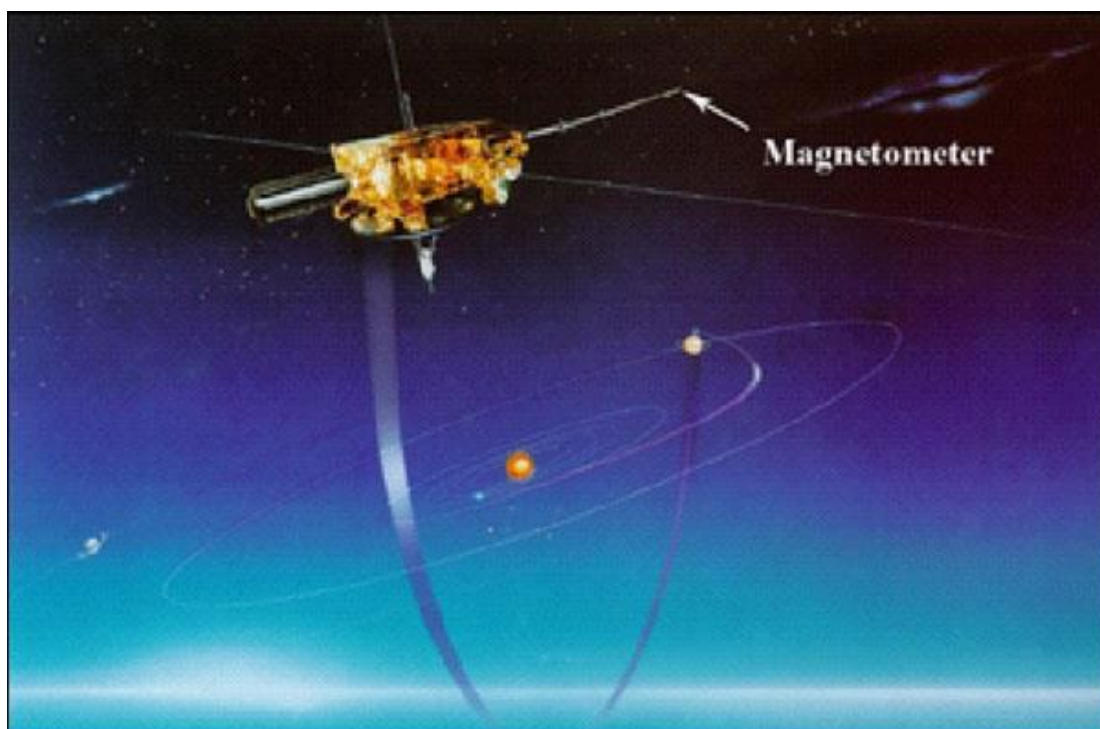
Η διαδεδομένη χρήση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε εφαρμογές πληροφορικής, επικοινωνιών, αυτοματισμού και γενικά σε κάθε τεχνολογική εφαρμογή έχει κάνει αναγκαία την ταυτόχρονη λειτουργία πολλών τέτοιων κυκλωμάτων σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτό το γεγονός επηρεάζει την σωστή λειτουργία των κυκλωμάτων λόγω των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από το κάθε ένα κύκλωμα στα υπόλοιπα και αυτό επεκτείνεται σε επίπεδο συσκευών. Επιπλέον, όσο προχωράει η τεχνολογία και το μέγεθος των κυκλωμάτων μικραίνει όλο και περισσότερο, περισσότερα κυκλώματα βρίσκονται σε μικρότερο χώρο και το πρόβλημα γίνεται όλο και πιο έντονο.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η σχεδίαση και η κατασκευή των συσκευών πρέπει να γίνεται με μεγαλύτερη προσοχή έτσι ώστε να λειτουργούν το ίδιο σωστά και εκτός των ιδανικών συνθηκών των εργαστηρίων, κοντά σε άλλες συσκευές και επιπλέον να ακολουθούν τους κανονισμούς ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που επιβάλλονται ανάλογα την περίπτωση. Αυτό σημαίνει ότι ο εξοπλισμός θα πρέπει να μην επηρεάζεται από άλλες συσκευές και επίσης να μην είναι ο ίδιος πηγή παρεμβολής για άλλες συσκευές.[1]

Ένα πολύ απαιτητικό κομμάτι της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι η μαγνητική καθαρότητα. Μαγνητικά καθαρό περιβάλλον θεωρείται ένα περιβάλλον στο οποίο ο μαγνητικός θόρυβος βρίσκεται κάτω από ένα κατώφλι. Η μαγνητική καθαρότητα απαιτείται σε πολλές εφαρμογές αλλά κυρίως στην αεροναυτική και πιο συγκεκριμένα στον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη λειτουργία διαστημικών αποστολών. Στις περισσότερες διαστημικές αποστολές ένας βασικός στόχος είναι η μέτρηση μαγνητικών πεδίων πλανητών ή/και κομητών από απόσταση μέσω μαγνητομέτρων υψηλής ακρίβειας που είναι τοποθετημένα λίγο έξω (1-12m) από το διαστημόπλοιο επάνω σε ιστό (Εικόνα 1.1). Οι τιμές αυτών των πεδίων είναι πολύ

μικρές (της τάξεως μερικών nT) οπότε η ανάγκη για μαγνητικά καθαρό περιβάλλον στις θέσεις που είναι τοποθετημένα τα μαγνητόμετρα είναι επιτακτική [2].

Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου ενός πλανήτη, ή κάθε ουράνιου σώματος, χρειάζεται για να οργανωθούν και να κατανοηθούν οι μετρήσεις των ενεργητικά φορτισμένα σωματιδίων και του πλάσματος και έπειτα να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον του πλανήτη αυτού. Τα φορτισμένα σωματίδια κινούνται μέσα σε μαγνητικά πεδία λόγω της δύναμης Lorentz. Γνωρίζοντας λοιπόν τη γεωμετρία του μαγνητικού πεδίου είναι ισοδύναμο με ένα χάρτη διαδρομών του κέντρου που οδηγεί τα σωματίδια.



Εικόνα 1.1 - Διαστημόπλοιο μαζί με μαγνητόμετρο

Η μέτρηση μαγνητικού πεδίου είναι επίσης ένας από τους ελάχιστους τρόπους λήψης πληροφορίας σχετικά με το εσωτερικό ενός πλανήτη από απόσταση και όχι μόνο της επιφάνειας ή/και της ατμόσφαιράς του, που γίνεται και με όργανα πολυφασματικής απεικόνισης. Τα μαγνητικά πεδία πλανητών όπως της Γης, του Δία και του Κρόνου παράγονται από ρεύματα μέσα στα υγρά μέταλλα στον πυρήνα ή στον πυρήνα-μανδύα τους. Η κύρια πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί αυτές τις “γεννήτριες” είναι η θερμική διάδοση των ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών οδηγούμενα από την εσωτερική ροή θερμότητας και την πλανητική περιστροφή. Οι πιο απόμακροι πλανήτες γίγαντες

Ουρανός και Ποσειδώνας δεν θεωρείται ότι έχουν σχηματισμένους μεταλλικούς πυρήνες και τα μαγνητικά τους πεδία παράγονται πιο κοντά στην επιφάνεια καθώς τα ρεύματα διαρρέουν υψηλής αγωγιμότητας κρυσταλλικούς ωκεανούς. Η Αφροδίτη δεν έχει εσωτερικό πεδίο ενώ ο Ερμής πιστεύεται ότι μαγνητίζεται από τα υπολείμματα κάποιας αρχαίας πηγής που φθίνει (η μελέτη του είναι ένας πρωταρχικός στόχος των αποστολών MESSENGER και Bepi Colombo).

Η ύπαρξη εσωτερικού πεδίου στον Άρη είναι ένα μεγάλο θέμα συζήτησης. Μετρήσεις από το Mars Global Surveyor (MGS) όχι μόνο απέδειξαν ότι δεν έχει εσωτερικό πεδίο αλλά έκαναν δυνατή τη μεγάλη ανακάλυψη ισχυρών κρυσταλλικών μαγνητικών πεδίων παλαιομαγνητικής προέλευσης. Σε πολλές περιοχές το πεδίο οργανώνεται σε γραμμικές δομές και είναι άμεσα συσχετισμένο με την ηλικία του κρυσταλλικού εδάφους. Η Lunar Prospector (LP) αποστολή έδωσε νέα και λεπτομερή εικόνα των κρυσταλλικών μαγνητικών πεδίων της Σελήνης που είχαν ανακαλυφθεί από τις αποστολές Apollo.

Η παρατήρηση των μετρήσεων των μαγνητικών πεδίων των αποστολών MGS και LP προσέφερε νέα προοπτική σχετικά με την πρόσφατη ιστορία και τη θερμική εξέλιξη του Άρη και της Σελήνης και αναθεώρησε την οπτική σχετικά με τις μαγνητικές ανωμαλίες της Γης και την προέλευση τους. Επιπλέον, έχει επιτευχθεί ένα παραπάνω βήμα στην (περιορισμένη) κατανόηση των διαδικασιών κατά το σχηματισμό και την αρχική εξέλιξη του ηλιακού συστήματος και του αντίκτυπου τους.

Πολλές αποστολές (Voyager, Helios, Ulysses κ.α.) έχουν κάνει μετρήσεις σε πολύ κοντινή απόσταση ή ακόμα και πάνω σε πλανήτες και αστεροειδείς με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον αστεροειδή 433 Eros, ο οποίος αποδείχθηκε ότι δεν έχει μαγνητικό πεδίο αστεροειδούς προέλευσης (σε αντίθεση με τις προσδοκίες από τις μετρήσεις και την ανάλυση των αστεροειδών Braille και Gaspa) κάνοντας τον ένα αξιοσημείωτο μη μαγνητικό, αδιαφοροποίητο πρωτόγονο αντικείμενο.

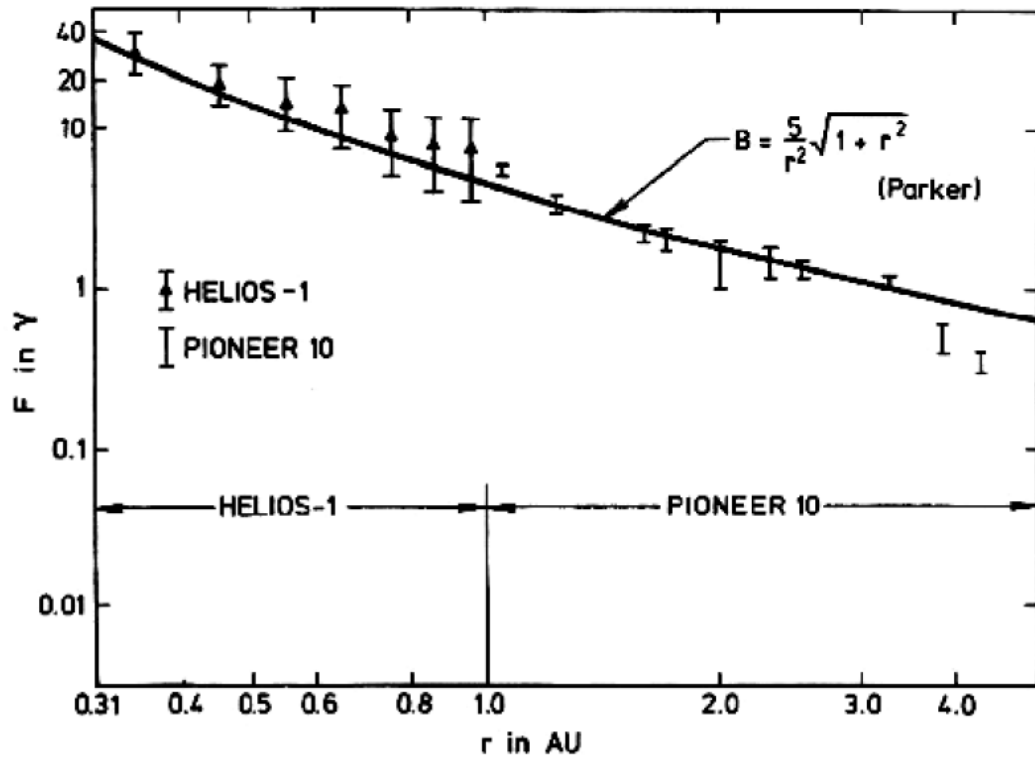
Μετρήσεις μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούνται επίσης σε αποστολές γύρω από τη Γη για μηχανικές εφαρμογές όπως καθορισμό και έλεγχο ύψους και τον προσανατολισμό των επιστημονικών οργάνων και γενικά του σκάφους με σημαντικά πλεονεκτήματα σε κόστος, απλότητα και ακρίβεια, σε σχέση με άλλα συστήματα, χρησιμοποιώντας σαν αναφορά το μαγνητικό πεδίο της Γης. Μια συνήθης εφαρμογή μαγνητομέτρων σε σκάφη γεωστατικής τροχιάς είναι ο έλεγχος ηλεκτρομαγνητών, οι

οποίοι, όταν ενεργοποιούνται, παράγουν ροπή στο σκάφος μέσω αλληλεπίδρασης με το μαγνητικό πεδίο της Γης και έτσι κατευθύνουν το σκάφος προς την επιθυμητή διεύθυνση.

Τέλος, από την έρευνα των πηγών, της γεωμετρίας και της χρονικής συμπεριφοράς των μαγνητικών πεδίων του ηλιακού συστήματος έχουν γίνει πολλές ανακαλύψεις σχετικά με τον «διαστημικό καιρό». Ηλιακά φαινόμενα όπως η στεμματική εκτόξευση μάζας, η ηλιακή έκλαμψη και τα μαγνητικά σύννεφα μπορούν να επηρεάσουν τα διαστημόπλοια σε τροχιά καθώς και τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιόπιστη λειτουργία των σύγχρονων επικοινωνιών, GPS και των στρατηγικών δορυφόρων εξαρτάται από τη γνώση των συνθηκών του «διαστημικού καιρού». [3]

Οι μετρήσεις των μαγνητικών πεδίων στις διαστημικές αποστολές πρέπει να γίνονται με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια έτσι ώστε η μελέτη τους να οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα. Για να συμβεί αυτό όμως θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι στη θέση των μαγνητομέτρων το περιβάλλον είναι όσο πιο μαγνητικά καθαρό γίνεται δεδομένου ότι τα μαγνητόμετρα στις διαστημικές αποστολές έχουν ακρίβεια της τάξεως του 0.1 nT. Ενδεικτικά, το μαγνητικό πεδίο μεταξύ του Πλούτωνα και του Ερμή είναι της τάξεως των 0.1-20 nT (Εικόνα 1.2), και η προδιαγραφή για μαγνητικά καθαρό σημείο (θέση μαγνητομέτρου) των διαπλανητικών αποστολών είναι της τάξεως 0.1-1 nT. [1], [4]

Για την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας σε ένα διαστημικό σκάφος πρέπει αρχικά να εντοπιστούν οι πηγές παρεμβολών. Οι πηγές αυτές είναι κυρίως τα συστήματα του σκάφους (συστήματα ελέγχου, όργανα μετρήσεων κ.α.), τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα (εξοπλισμός και σκάφος) και η καλωδίωση όλου του σκάφους. Πρώτο βήμα κατά τον σχεδιασμό είναι η επιλογή μη-μαγνητικών υλικών (τιτάνιο, συγκεκριμένα κράματα αλουμινίου κ.α.) για την κατασκευή του σκάφους και των συσκευών. Φυσικά η χρήση μαγνητικών υλικών δεν γίνεται να αποφευχθεί αλλά ο αρχικός στόχος είναι ο περιορισμός τους.



Εικόνα 1.2 - Επίπεδα διαπλανητικών μαγνητικών πεδίων

Στη συνέχεια, η καλωδίωση όλων των συστημάτων πρέπει να γίνει προσεκτικά έτσι ώστε να μην δημιουργούνται βρόχοι (που συμπεριφέρονται ως μαγνητικά δίπολα όταν διαρρέονται από ρεύμα) και επίσης η οδήγηση του ρεύματος σε μία συσκευή να βρίσκεται μαζί με την επιστροφή του (twisted pair) έτσι ώστε να αλληλοαναιρούνται τα πεδία που παράγονται από τα καλώδια καθώς διαρρέονται από το ρεύμα. Υπάρχουν πολλές επιπλέον τεχνικές θωράκισης καλωδίων αλλά λόγω της πολυπλοκότητας της καλωδίωσης ενός διαστημικού σκάφους είναι πρακτικά αδύνατο να κατασταλούν τα μαγνητικά πεδία που προκαλούν παρεμβολές ολοκληρωτικά.

Τέλος, η βασική πηγή παρεμβολών εντός ενός σκάφους είναι τα ηλεκτρονικά συστήματα και συσκευές που λειτουργούν ταυτόχρονα για την παραγωγή ισχύος, τον έλεγχο και πλοήγηση, τον έλεγχο του περιβάλλοντος και τη λήψη, καταγραφή και επεξεργασία των μετρήσεων. Κάθε συσκευή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε ένα διαστημικό σκάφος υποβάλλεται σε έλεγχο σε ειδικές εγκαταστάσεις για να εξασφαλιστεί εάν πληροί τις προϋποθέσεις σχετικά με τη μαγνητική εκπομπή. Ο τελικός στόχος είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός και τοποθέτηση όλων των συστημάτων έτσι ώστε στη θέση που θα τοποθετηθούν οι συσκευές μέτρησης που

είναι ευαίσθητες στις μαγνητικές παρεμβολές να είναι μαγνητικά καθαρή και το πεδίο εκεί να βρίσκεται εντός των καθορισμένων ορίων και να είναι σταθερό και γνωστό.

Η πρώτη εφαρμογή από τη NASA για αντιμετώπιση των μαγνητικών ιδιοτήτων των διαστημικών σκαφών πραγματοποιήθηκε στην αποστολή OSO (Orbiting Solar Observatory). Ο τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος της παρεμβολής λόγω του μαγνητικού πεδίου που παρήγαγε το σκάφος (συνολικά) ήταν η τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης έξω από αυτό, επάνω σε ιστούς μερικών μέτρων. Έπειτα έγινε κατανοητό ότι ο σωστός σχεδιασμός και η επιλογή υλικών και συσκευών συνεχούς ρεύματος (DC-direct current) του διαστημικού σκάφους σχετικά με τις μαγνητικές τους ιδιότητες έχει μεγάλη σημασία στην επιτυχία των διαστημικών αποστολών. Οι πρώτες τεχνικές διαδικασίες ήταν η μαγνήτιση και απομαγνήτιση κάθε επιμέρους συσκευής και μετρήσεις του πεδίου που παραγόταν σε αποστάσεις 3-6 φορές τη μέγιστη διάσταση της. Έπειτα, έχοντας αυτές τις πληροφορίες για το μαγνητικό πεδίο κάθε συσκευής, ακολουθούσε η συναρμολόγηση του σκάφους. Το τελικό σκάφος στη συνέχεια περνούσε από εξέταση σε ελεγχόμενο μαγνητικά περιβάλλον όπου γινόταν χαρτογράφηση του συνολικού DC μαγνητικού πεδίου με μετρήσεις σε προδιαγεγραμμένες, λεπτομερώς ορισμένες, αποστάσεις ακτινικά από το κέντρο του σκάφους καθώς αυτό περιστρεφόταν. Αυτές οι διαδικασίες εκτελούνταν πριν και μετά τη μαγνήτιση του σκάφους. Στις Εικόνες 1.3 και 1.4 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι αποστολές της NASA από το 1960 έως το 1969 με τα χαρακτηριστικά τους. Στην πέμπτη στήλη φαίνονται οι τιμές του μαγνητικού πεδίου (παρεμβολή) στη θέση των οργάνων μέτρησης. Η μαγνητική καθαρότητα επετεύχθη μέσω των παραπάνω διαδικασιών [5].

Spacecraft	Launch date	Weight (lb)	Magnetometer type	Maximum spacecraft field disturbance (γ) at magnetometer	Magnetometer characteristics	
					Range (γ)	Sensitivity (γ)
Pioneer 5	3/11/60	95	Induction coil	—	$<10^3$	0.05-5.0
Explorer 10	3/25/61	79	Rubidium Fluxgate	< 1.0 < 1.0	30-5000 ± 50	3.0 0.3
Explorer 12 (S-3)	8/15/61	83	Fluxgate	11.0	± 500	10.0
Explorer 34 (S-3a)	10/2/62	89	Fluxgate	≤ 4.0	± 250	5.0
Explorer 15 (S-3b)	10/27/62	98	Fluxgate	≤ 3.0	± 4000	40.0
Alouette	9/29/62	320	Fluxgate	≤ 710.0	60000	± 18.0
Explorer 18 (IMP-1)	11/27/63	138	Rubidium Fluxgate	< 1.0 < 0.6	< 300 ± 40	± 0.25 ± 0.25
OGO-1	9/4/64	1073	Rubidium Fluxgate	≤ 1.5 ≤ 3.8	3-14000 ± 500	± 3.0 ± 3.0
Explorer 21 (IMP-2)	10/4/64	136	Rubidium Fluxgate	< 1.0 < 0.6	< 300 ± 4.0	± 0.25 ± 0.25
Explorer 26 (EPE-4)	12/21/64	101	Fluxgate	< 1.0	$< 2 \times 10^3$	± 2.0
Explorer 28 (IMP-3)	5/29/65	130	Rubidium Fluxgate	< 1.0 < 0.6	< 300 < 40	± 0.25 ± 0.25
Mariner 4	11/28/64	575	Helium	≤ 35.0	± 360	± 0.35
OGO-2	10/14/65	1118	Rubidium Fluxgate	< 0.5 < 1.3	13000-64000 ± 500	± 2.0 ± 0.25
Pioneer 6	12/16/65	140	Fluxgate	≤ 0.25	± 40	± 0.25

Εικόνα 1.3 - Διαστημικές αποστολές NASA με τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους

Spacecraft	Launch date	Weight (lb)	Magnetometer type	Maximum spacecraft field disturbance (γ) at magnetometer	Magnetometer characteristics	
					Range (γ)	Sensitivity (γ)
OGO-3	6/6/66	1135	Rubidium Fluxgate	< 0.6 < 1.6	3-14000 ± 500	± 0.25 ± 0.25
Explorer 33 (IMP-4)	7/1/66	206	Fluxgate	< 0.25	± 40	± 0.25
Pioneer 7	8/17/66	140	Fluxgate	≤ 0.25	± 40	± 0.2
ATS-1	12/6/66	660	Fluxgate	≤ 100.0	+925 to -625	1.0
Explorer 34	4/24/67	163	Fluxgate	< 0.3	± 40	± 0.25
Mariner 5	6/14/67	540	Helium	≤ 7.1	± 360	± 0.35
Explorer 35 (IMP-5)	7/19/67	230	Fluxgate	< 0.2	± 40	± 0.25
OGO-4	7/28/67	1240	Rubidium Fluxgate	< 0.4 < 1.0	13000-64000 ± 500	± 2.0 ± 0.25
Pioneer 8	12/13/67	145	Fluxgate	≤ 0.25	± 40	± 0.2
OGO-5	3/4/68	1347	Rubidium Fluxgate	< 1.5 < 2.2	3-14000 ± 500	± 2.0 ± 0.25
Explorer 38 (RAE-1)	7/14/68	417	Fluxgate	< 32.0*	± 10000	± 100.0
ATS-4	8/10/68	864	Fluxgate	$\leq 32.0^*$	± 500	± 0.25
Pioneer 9	11/8/68	148	Fluxgate	≤ 0.25	± 40	± 0.2
ISIS-1	1/30/69	532	Fluxgate	< 600.0*	± 60000	± 40.0
OGO-6	6/5/69	1393	Rubidium Fluxgate	≤ 0.2 ≤ 0.5	13000-64000 ± 500	+0.25 +0.25
ATS-5	8/12/69	750	Fluxgate	$\leq 116.0^*$	± 500	± 0.25
Explorer 41 (IMP-7)	6/21/69	157	Fluxgate	< 0.5	± 40	± 0.25

*Spacecraft compensated with permanent magnets

Εικόνα 1.4 - Διαστημικές αποστολές NASA με τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους

1.2. Multiple Magnetic Dipole Modeling (MDM)

Αυτές οι τεχνικές, που αναφέρθηκαν παραπάνω, στόχευαν στη μοντελοποίηση όλου του DC μαγνητικού πεδίου του διαστημικού σκάφους με ένα μαγνητικό δίπολο με

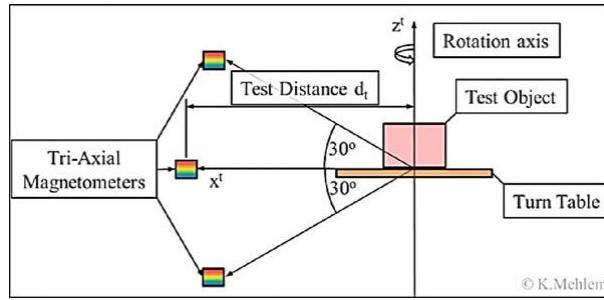
μοναδικό σκοπό τον προσδιορισμό του συνολικού μαγνητικού πεδίου μόνο στα σημεία ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα που προέκυπταν δεν ήταν αρκετά ακριβή για αξιόπιστο έλεγχο των προδιαγραφών ούτε και για σωστή αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου και εν τέλει η σωστή λύση βασιζόταν στην εκτεταμένη διαίσθηση και εμπειρία των μηχανικών. Η μέθοδος που ξεπερνούσε αυτά τα προβλήματα εισήχθη στον τομέα της μαγνητικής καθαρότητας το 1977 από τον Klaus Mehlum και ονομάζεται Multiple Magnetic Dipole Modeling (MDM) δηλαδή μοντελοποίηση με πολλαπλά μαγνητικά δίπολα. Άλλες εφαρμογές του MDM είναι στους κλάδους της γεωλογίας και της ιατρικής.

Η προσέγγιση αυτή βασίστηκε στο αξίωμα ότι ένα δεδομένο DC μαγνητικό πεδίο γύρω από ένα δοκιμαστικό αντικείμενο μπορεί να μοντελοποιηθεί ικανά από ένα πεπερασμένο σύνολο διακριτών δίπολων εντός του αντικειμένου εάν αγνοηθούν οι πολυπολικές συνιστώσες του πεδίου. Αυτό σημαίνει πως για τη λύση θα πρέπει να προσδιοριστούν ο αριθμός των διπόλων και η θέση και η μαγνητική ροπή κάθε διπόλου. Έτσι, χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, είναι πολύ εύκολο να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο πρακτικά σε οποιοδήποτε σημείο γύρω από το αντικείμενο και όχι μόνο σε μερικά σημεία ενδιαφέροντος [6].

1.3. Magnetic Coil Facilities (MCF)

Προκειμένου να βρεθεί το μοντέλο ενός μαγνητικού αντικειμένου, αρχικά πραγματοποιούνται μετρήσεις στο κοντινό του πεδίο. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται συνήθως περιστρέφοντας τη συσκευή υπό έλεγχο (Equipment Under Test – EUT) ανά 10 μοίρες. Σε κάθε βήμα περιστροφής οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου λαμβάνονται από μαγνητόμετρα τοποθετημένα αρκετά κοντά έτσι ώστε το πεδίο να είναι τουλάχιστον της τάξεως των 20 nT. Στην Εικόνα 1.5 παρουσιάζεται η διαδικασία.

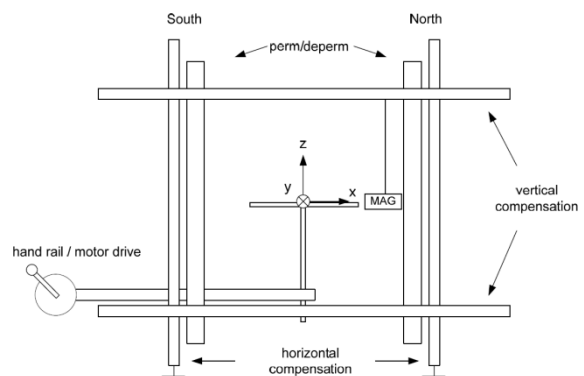
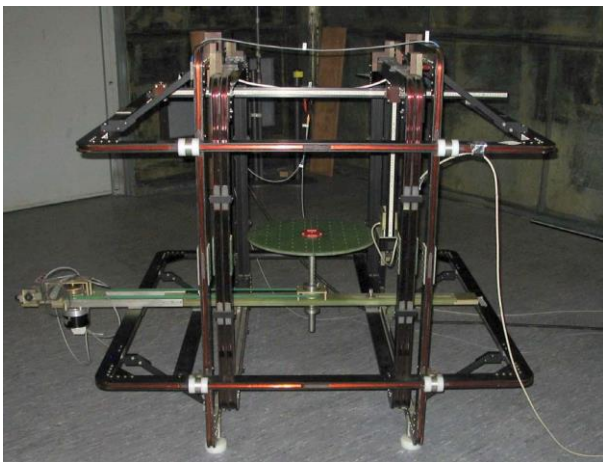
Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται σε ειδικές εγκαταστάσεις Magnetic Coil Facilities (MCF). Οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν πολύ υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του MCF που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (European Space Agency - ESA) στην Ολλανδία [7], [8].



Εικόνα 1.5 - Διάταξη μέτρησης μαγνητικού πεδίου

1.3.1. Σύστημα πηνίων

Το σύστημα πηνίων αποτελείται από 3 ζεύγη Helmholtz πηνίων. Τα δύο ζεύγη χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίσουν το κατακόρυφο και το οριζόντιο πεδίο της Γης και το τρίτο για μαγνήτιση και απομαγνήτιση. Επιπλέον το ζεύγος για την αντιστάθμιση του κατακόρυφου πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή μαγνητικής ροπής. Παρακάτω (Εικόνα 1.6) φαίνονται μία φωτογραφία και ένα σχεδιάγραμμα του συστήματος πηνίων.



Εικόνα 1.6 - Φωτογραφία και σχεδιάγραμμα του συστήματος πηνίων

Το σύστημα πηνίων έχει ακρίβεια μήκους ± 10 mm ενώ ο αριθμός των περιελίξεων είναι άγνωστος αλλά εκτιμάται ότι είναι 100-110. Για τη σωστή λειτουργία του συστήματος θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τη διεύθυνση Βορρά-Νότου [7], [8].

1.3.2. Περιστρεφόμενο Τραπέζι

Στο σχεδιάγραμμα και στη φωτογραφία φαίνεται επίσης το περιστρεφόμενο τραπέζι στο οποίο τοποθετείται η συσκευή υπό έλεγχο (Equipment Under Test – EUT). Το

τραπέζι αυτό έχει διάμετρο 50.5 cm και πάχος 10 mm γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για μικρά EUT έως 20 Kg. Περιλαμβάνει ένα πλέγμα με τρύπες με απόσταση 5 cm μεταξύ τους. Εκτός από περιστροφή, το τραπέζι μπορεί να κινηθεί κατακόρυφα αλλά και οριζόντια στη διεύθυνση Βορρά-Νότου [7], [8].

1.3.3. Τροφοδοσία

Τα ζεύγη των πηνίων αντιστάθμισης τροφοδοτούνται με συνεχές σταθερό ρεύμα μέσω δύο πηγών ρεύματος Fluke 382A και κάποιων βαθμονομητών πολύ υψηλής σταθερότητας, η ένταση των οποίων ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το πεδίο που δημιουργείται να μην υπερβαίνει μερικές δεκάδες nT. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές όπως αυτές ορίζονται από το εργοστάσιο, η σταθερότητα είναι μεγαλύτερη από τα 50 ppm ανά μήνα, καθορίζοντας έτσι τη ακρίβεια του ρεύματος εξόδου να είναι καλύτερη από $\pm 0,02\%$.

Και οι δύο βαθμονομητές εκτιμάται ότι είναι ηλικίας άνω των 30 ετών και δεν επισκευάζονται. Μόνο μία μονάδα υπάρχει για αντικατάσταση και βρίσκεται στο Laboratory Equipment Pool (LEP) της ESTEC. Παρόλα αυτά, η ακρίβεια στο εύρος των [0 ... 500] mA είναι καλύτερη από 1 mA (0,2%), όπως πιστοποιήθηκε με ένα ψηφιακό πολύμετρο ακρίβειας 5 ppm [7], [8].

1.3.4. Σύστημα μαγνήτισης/απομαγνήτισης (PERM/DEPERM)

Το σύστημα μαγνήτισης/απομαγνήτισης των MCF εγκαταστάσεων αποτελείται από μια προσαρμοσμένη (custom-built) γεννήτρια σήματος, ένα custom-built ενισχυτή DC- ρεύματος για τη μαγνήτιση του υπό δοκιμή εξοπλισμού καθώς και ένα υψηλής ισχύος χαμηλής συχνότητας ενισχυτή τόσο για τη μαγνήτιση όσο και την απομαγνήτιση. Τα επίπεδα πυκνότητας μαγνητικής ροής διαφέρουν από τις τιμές που ίσχυαν σε παλαιότερη βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, για τη μαγνήτιση υπάρχουν τα επίπεδα των 0.1, 0.2 και 0.3 mT ενώ για τη απομαγνήτιση υπάρχει η ελάχιστη τιμή είναι 0.42 mT [7], [8].

1.3.5. Μαγνητόμετρα

Όλες οι MCF εγκαταστάσεις είναι εξοπλισμένες με ένα τουλάχιστον τριαξονικό μαγνητόμετρο ενώ ορισμένες από αυτές διαθέτουν και ένα δεύτερο fluxgate μαγνητόμετρο για τη μέτρηση του θορύβου που εισάγει το περιβάλλον. Με τη τοποθέτηση των fluxgate μαγνητομέτρων στο εσωτερικό του διαστημόπλοιου

βελτιώνεται η ακρίβεια του μοντέλου, χωρίς την ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου δοκιμής.

Στις πρώτες διαστημικές αποστολές των διαστημικών οχημάτων όπως στο Ulysses της ESA, οι MCF εγκαταστάσεις ήταν εξοπλισμένες με ένα fluxgate μαγνητόμετρο τριών αξόνων με ένα αισθητήρα, το οποίο είχε σχεδιαστεί από τη NASA's Goddard Space Flight Center (GSFC). Πρόσφατα όμως, έχει αντικατασταθεί από τη TEC-EEE με δύο όμοια fluxgate μαγνητόμετρα από τη κατηγορία των Bartington Instruments, των οποίων η χρήση είναι το ίδιο αποτελεσματική με εκείνη αρχικού μαγνητόμετρου.

Τα GSFC μαγνητόμετρα, χρονολογούνται από την εποχή των Voyager I και II. Τέτοιου τύπου μαγνητόμετρα χρησιμοποιήθηκαν στις MCF εγκαταστάσεις των διαστημόπλοιων που είχαν εκτοξευτεί για τις 'Cluster' και 'Giotto' αποστολές. Όμως από το 1994, υπήρξε μια αλλαγή στη λειτουργία των GSFC μαγνητόμετρων, με τη σχεδίαση και τη χρήση των αναλογικών ηλεκτρονικών συστημάτων στο εσωτερικό τους. Σημαντική ήταν η συμβολή των αναλογικών μαγνητόμετρων στην επιτυχημένη διεξαγωγή των RPC-MAG και OPTMISM/MAG πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια των διαστημικών αποστολών Rosetta και Mars96 αντίστοιχα. Η συχνότητα λειτουργίας των αισθητήρων των μαγνητόμετρων GSFC είναι στο διάστημα μεταξύ των 8KHz-16KHz.

Από το 2007, ένας νέος τύπος μαγνητόμετρων από τη κατηγορία των Bartington Instruments, αντικατέστησε τα GSFC μαγνητόμετρα στις MCF εγκαταστάσεις. Πρόκειται για τα Bartington μαγνητόμετρα, δύο όμοια fluxgate μαγνητόμετρα ευαισθησίας 100 mV/μT, τα οποία είναι απόλυτα συμβατά με το αρχικό σύστημα λήψης δεδομένων των MCF εγκαταστάσεων. Το Mag-03MSL100 ήταν το πρώτο μοντέλο από αυτή τη κατηγορία των μαγνητόμετρων που τέθηκε σε λειτουργία. Ουσιαστικά, επρόκειτο για μια βελτιωμένη έκδοση της σειράς των Mag-03MS μαγνητόμετρων, τα οποία έχουν τη ιδιότητα να περιορίζουν το εσωτερικό θόρυβο κάτω από $6 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, μέσω φίλτρων χαμηλής συχνότητας που περιέχονται στη Mag-03PSU μονάδα τροφοδοσίας του συστήματος [7], [8].

1.3.6. Σύστημα λήψης δεδομένων

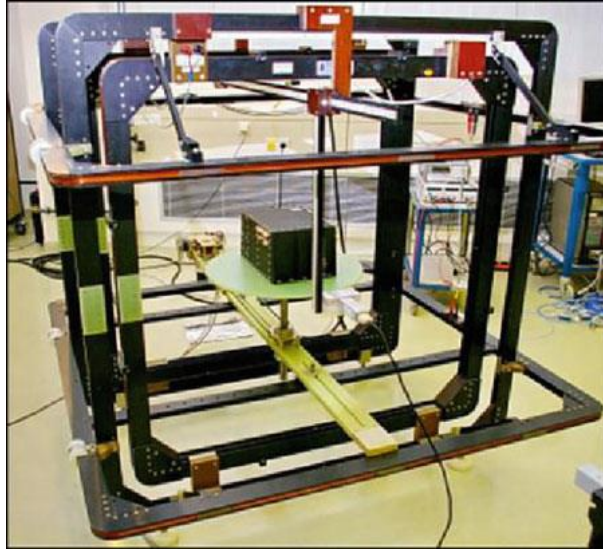
Για τη λήψη δεδομένων (DAQ), το σύστημα διαθέτει ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή με αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC) και ένα ειδικά προσαρμοσμένο λογισμικό για

το αυτόματο μηχανισμό δημιουργίας αναλυτικής παρουσίασης των δοκιμών-μετρήσεων.

Στο σύστημα λήψης δεδομένων National Instruments (NI) DAQ που χρησιμοποιείται, ο υπολογιστής διαθέτει μια NI 6220 κάρτα PCI, η οποία συνδέεται σε ένα NI SCB-68 κιβώτιο συνδέσεων. Οι τιμές εισόδου της NI 6220 μπορεί να εναλλάσσονται μεταξύ $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$ και $\pm 0,2\text{ V}$. Οι τιμές αυτές ψηφιοποιούνται από τον μετατροπέα ADC που βρίσκεται στη NI 6220 με ανάλυση 16 bit και κβαντοποιείται σε $2^{16}=65.536$ βήματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, το NI DAQ σύστημα λήψης δεδομένων μπορεί να αντικατασταθεί αποτελεσματικά με οποιοδήποτε άλλο NI DAQ σύστημα λήψης ανάλυσης 24 bit, χωρίς να χρειάζονται σημαντικές αλλαγές στο λογισμικό του υπολογιστή. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων έγκειται στο ADC μετατροπέα. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται ένας 24 bit ADC που κβαντοποιεί το σήμα σε 16.777.216 βήματα και ανάλογα με το σήμα εισόδου που δέχεται, αποδίδει και τη αντίστοιχη ανάλυση των 12.52 ,6.26,1.25 ή 0,25pT. Ωστόσο, η ανάλυση αυτή είναι πολύ μικρότερη από τις αλλαγές που γίνονται στο μαγνητικό πεδίο ή ακόμη και από το εσωτερικό θόρυβο των Mag-03MSL100 μαγνητόμετρων [7], [8].

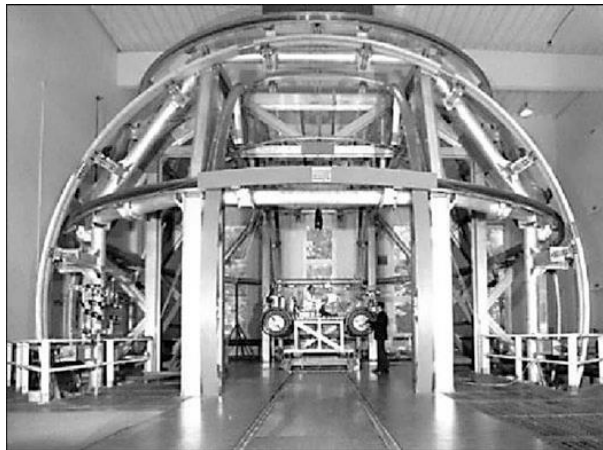
Στις επόμενες φωτογραφίες παρουσιάζονται κάποια MCF. Στην Εικόνα 1.7 φαίνεται το MCF που υπάρχει στις εγκαταστάσεις της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (European Space Agency - ESA) στην Ολλανδία. Έχει διάσταση 1.4 m, μπορεί να μετακινηθεί και χρησιμοποιείται για μικρές ηλεκτρονικές συσκευές. Στη Εικόνα 1.8 φαίνεται το 6.6 m MCF στο CNES στη Γαλλία, το οποίο έχει υψηλή ακρίβεια και χρησιμοποιείται για μεσαίου μεγέθους συσκευές. Στη Εικόνα 1.9 φαίνεται το 13 m MCF της NASA που βρίσκεται στο Goddard Space Flight Center, Maryland. Στη Εικόνα 1.10 φαίνεται το 15 m MCF στο IABG (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft) στη Γερμανία. Χρησιμοποιείται για κάθε είδους συσκευή έως και για ολόκληρο διαστημικό σκάφος, έχει τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια και κάθε Ευρωπαϊκή διαστημική αποστολή που μεταφέρει μαγνητόμετρα έχει ελεγχθεί στο IABG.



Εικόνα 1.7 - MCF εγκατάσταση στην ESA



Εικόνα 1.8 - MCF εγκατάσταση στο CNES



Εικόνα 1.9 - MCF εγκατάσταση στο Braunbek



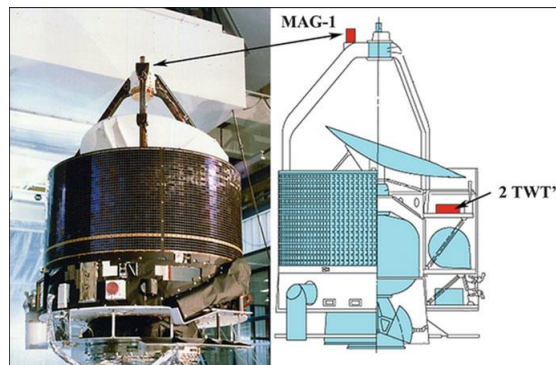
Εικόνα 1.10 - MCF εγκατάσταση στο IABG

1.4. Εφαρμογές του MDM σε διαστημικές αποστολές

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες διαστημικές αποστολές των οποίων η μαγνητική καθαρότητα πραγματοποιήθηκε με την MDM τεχνική.

1.4.1. Giotto

Το διαστημικό σκάφος Giotto, το οποίο πέρασε κοντά από τον κομήτη Halley το 1986, είχε τοποθετημένα δύο μαγνητόμετρα σε ένα σύστημα τριών κεφαλών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.11. Ένα ζεύγος μαγνητικά ισχυρών λυχνιών οδεύοντος κύματος (TWT), τοποθετημένο στο πάνω μέρος της πλατφόρμας σε απόσταση μόλις 1.47 m από το πάνω μαγνητόμετρο, παρήγαγε ένα μαγνητικό πεδίο –διαταραχή- 39.3 nT. Το πεδίο αυτό θα είχε σοβαρή επιρροή στις μετρήσεις των μαγνητομέτρων και έπρεπε να αντισταθμιστεί.



Εικόνα 1.11 - Σύστημα μαγνητομέτρων του Giotto

Αφού δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί TWT και υπολογίστηκαν τα MDM τους, βρέθηκε η κατάλληλη θέση και μαγνητική ροπή του μαγνήτη που θα έκανε την αντιστάθμιση (μαγνήτης μήκους 6cm με μαγνητική ροπή 1.139 mA^m². Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται το αποτέλεσμα.

Πίνακας 1.1 - Αποτέλεσμα μαγνητικής καθαρότητας Giotto

	MAG-1 θέση			MAG-1 Μαγνητικό Πεδίο			
	P _x (m)	P _y (m)	P _z (m)	b _x (nT)	b _y (nT)	b _z (nT)	b (nT)
b _{MDM}	0.324	0.704	-1.245	31.3	18.6	-14.8	39.3
b _{Magnet}	0.324	0.704	-1.245	-31.3	-18.4	15.1	39.3
b _{Total}	0.324	0.704	-1.245	0	0.2	0.3	0.4

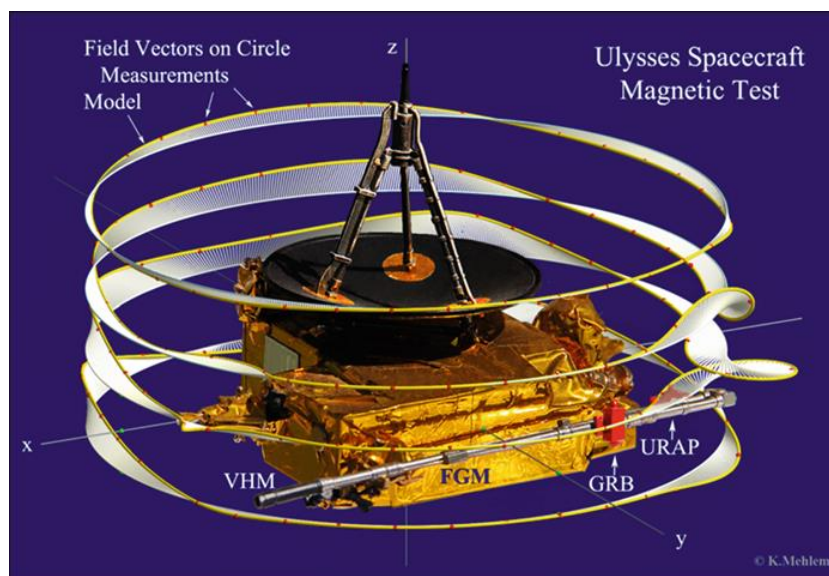
Κατά τη διάρκεια του ελέγχου του συνδυασμού, οι μετρήσεις του πεδίου στις θέσεις των μαγνητομέτρων ήταν τόσο κοντά στο μηδέν που ο μηχανικός της εγκατάστασης νόμιζε πως είχε ξεχάσει να θέσει σε λειτουργία τα μαγνητόμετρα [2].

1.4.2. Ulysses

Το διαστημικό σκάφος Ulysses είχε ένα fluxgate μαγνητόμετρο (FGM) και ένα vector helium μαγνητόμετρο (VHM) σε απόσταση 6.45 m από το κέντρο του σκάφους. Η μοντελοποίηση ήταν πιο δύσκολη λόγω του ιστού (που δεν επέτρεπε στο σκάφος να περιστραφεί για τις μετρήσεις) και λόγω της ραδιοϊσοτροπικής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ρεύματος (RTG) που ήταν ιδιοκτησία της NASA και δεν γινόταν να είναι παρούσα κατά τη μελέτη μαγνητικής καθαρότητας. Έτσι η συνολική μελέτη χωρίστηκε σε διάφορα στάδια.

Αρχικά, το RTG μοντελοποιήθηκε ξεχωριστά με μεγάλη ακρίβεια και έπειτα καθορίστηκε η θέση του VHM. Έπειτα, υπολογίστηκε ο μαγνήτης αντιστάθμισης, κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε στο περύγιο του RTG. Επίσης ένα ζεύγος TWT αντισταθμίστηκε πριν την εγκατάσταση του στο σκάφος. Το σκάφος ήταν πλέον σχετικά μαγνητικά καθαρό (το RTG έλειπε, το ζεύγος TWT είχε ήδη αντισταθμιστεί). Έπειτα το σκάφος μετρήθηκε περιστροφικά με τον ιστό μαζεμένο όπου παρατηρήθηκε μία διαταραχή στο πεδίο λόγω δύο διαφορετικών πειραμάτων που λειτουργούσαν στον αρμό του ιστού. Τα πειράματα αυτά μοντελοποιήθηκαν

ξεχωριστά και προστέθηκαν στη συνέχεια στο συνολικό MDM μαζί με το MDM του RTG. Το συνολικό μοντέλο αποτελούταν από 35 μαγνητικά δίπολα και η μαγνητική προδιαγραφή στο σημείο του VHM ήταν 0.1 nT, κάνοντας τον ιστό στο Ulysses τον «μαγνητικά καθαρότερο» που έχει κατασκευαστεί [2].



Εικόνα 1.12 - Διαστημόπλοιο Ulysses

1.4.3. Cluster και ClusterII

Η τετράδα Cluster εξερευνεί το μαγνητικό πεδίο της Γης. Η προδιαγραφή της μαγνητικής καθαρότητας στο σημείο του μαγνητομέτρου καθορίστηκε στα 0.25 nT. Κάθε ένα από τα τέσσερα σκάφη είχε πολλές μαγνητικές μονάδες και υπομονάδες. Στον αρχικό σχεδιασμό, κάθε τέτοια μονάδα μοντελοποιήθηκε ξεχωριστά στο MCF της ESA. Έτσι χτίστηκε ένα συνολικό MDM. Έπειτα, κάθε σκάφος μετρήθηκε στο MCF στο IABG σε τουλάχιστον τέσσερις μαγνητικές καταστάσεις. Παρατηρήθηκε ότι, παρά τον εξαιρετικά προσεγμένο αρχικό σχεδιασμό, το όριο των 0.25 nT είχε ξεπεραστεί και έπρεπε να αντισταθμιστεί. Λόγω της δυσκολίας στην τοποθέτηση ενός συνηθισμένου μαγνήτη, έπρεπε να κατασκευαστεί μαγνήτης αποτελούμενος από δύο κομμάτια. Το ένα θα είχε μαγνητική ροπή με συνιστώσες m_x και m_y και το άλλο μόνο m_z . Μετά την τοποθέτησή τους η προδιαγραφή των 0.25 nT επετεύχθη. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για την αποστολή ClusterII [2].

1.4.4. Cassini

Στην αποστολή Cassini, που περιστρέφεται γύρω από τον Κρόνο, είναι τοποθετημένα δύο μαγνητόμετρα (ένα VHM και ένα FGM) επάνω σε ιστό 11 m. Το σκάφος

τροφοδοτείται από τρία RTG (ίδια με το Ulysses). Τα RTG μοντελοποιήθηκαν ξεχωριστά και παρατηρήθηκε ότι το πεδίο που προκαλούσαν στο σημείο τοποθέτησης του VHM ήταν περισσότερο από το μισό του συνολικού πεδίου. Για την αντιστάθμιση, αντί της χρήσης μαγνήτη, μελετήθηκε η πιθανότητα να αντισταθμίζονται τα πεδία των RTG μεταξύ τους με κατάλληλη τοποθέτησή τους στο σκάφος. Το αποτέλεσμα, αφού βρέθηκε κατάλληλος σχεδιασμός, ήταν να πέσει η τιμή του πεδίου στο σημείο του VHM από τα 49 pT στα 4 pT [2].



Εικόνα 1.13 - Το διαστημόπλοιο Cassini με τα μαγνητόμετρα του Αναφορές

- [1] Ott Henry W., “Electromagnetic Compatibility Engineering”, 2009 published by John Wiley & Sons, Inc
- [2] Mehlem K., ch 13, “Optimal Magnetic Cleanliness Modeling of Spacecraft”, G. Fasano and J.D. Pinté'r (eds.), Modeling and Optimization in Space Engineering, Springer Optimization and Its Applications 73, 2013, DOI 10.1007/978-1-4614-4469-5_13
- [3] Acuña, Mario H., “Space-based magnetometers”, Review of Scientific Instruments, 2002, vol. 73, p. 3717-3736, doi 10.1063/1.1510570
- [4] Mehlem, K.; Wiegand, A., "Magnetostatic cleanliness of spacecraft," in Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2010 Asia-Pacific Symposium on , vol., no., pp.936-944, 12-16 April 2010, doi: 10.1109/APEMC.2010.5475692
- [5] Nasa, “Assessment and control of spacecraft magnetic fields”, Technical Report, 1970
- [6] Mehlem, K., "Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites," in Magnetism, IEEE Transactions on , vol.14, no.5, pp.1064-1071, Sep 1978, doi: 10.1109/TMAG.1978.1059983

- [7] Junge A.: “Ulysses Mobile Coil Facility Specification“, TEC-EEE/2007.184/AJ, issue 1 revision 1 – 05.10.2007, Under revision , SP, TEC-EEE, LISA Pathfinder, Swarm. BepiColombo
- [8] Μαστοροπούλου Μ., “Μελέτη αβεβαιότητας μετρήσεων και μοντελοποίησης μαγνητικού πεδίου με εφαρμογή επίτευξης μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές”, Διπλωματική Εργασία, 2014, Αθήνα

Κεφάλαιο 2 - Αβεβαιότητα

Μετρήσεων

2.1 Εισαγωγή

Το αποτέλεσμα μίας μέτρησης μπορεί να είναι ο βασικός παράγοντας για την εξαγωγή μίας απόφασης. Για παράδειγμα μπορεί να προκύψει εάν ένα προϊόν είναι κατάλληλο για κυκλοφορία ή όχι, εάν μία συσκευή ή μία υπηρεσία ακολουθεί τα πρωτόκολλα που καθορίζονται από την εκάστοτε νομοθεσία ή εάν ένα αντικείμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία κατασκευή όταν υπάρχουν συγκεκριμένες διαστάσεις. Για παράδειγμα η πληροφορία ότι ένα μέταλλο έχει μήκος 20cm δεν είναι αρκετή. Κατά την αναφορά του αποτελέσματος μιας μέτρησης μιας φυσικής ποσότητας, είναι απαραίτητο να παραθέτεται και μία ποσοτική ένδειξη της ποιότητας του αποτελέσματος έτσι ώστε όποιος το χρησιμοποιήσει για διάφορους σκοπούς ή αποφάσεις να γνωρίζει την αξιοπιστία της μέτρησης. Χωρίς αυτή την ένδειξη τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν μπορούν να συγκριθούν είτε μεταξύ τους είτε με αναφορικές τιμές σε πρότυπα. Είναι λοιπόν απαραίτητο να υπάρχει κάποια μεθοδολογία εύκολα εφαρμόσιμη και κατανοητή για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας μίας μέτρησης δηλαδή τον υπολογισμό και την έκφραση της αβεβαιότητας της.

Στην επιστημονική κοινότητα ο όρος αβεβαιότητα αναφέρεται στη πιθανότητα – ποσοστό εμπιστοσύνης η πραγματική τιμή μίας μέτρησης να είναι γύρω από την μετρούμενη. Το ποσοστό αυτό λοιπόν καθορίζει την αξιοπιστία της μέτρησης. Στο προηγούμενο παράδειγμα δηλαδή, η σωστή έκφραση της πληροφορίας θα ήταν ότι το μήκος του μετάλλου είναι $20\text{cm} \pm 1\text{cm}$ με ένα ποσοστό εμπιστοσύνης 95-99%.

Η ιδέα της αβεβαιότητας σαν ποσοτικοποιημένο μέγεθος είναι σχετικά νέα στην ιστορία των μετρήσεων παρόλο που το σφάλμα και η ανάλυση σφαλμάτων στις μετρήσεις ήταν μέρος της πρακτικής της μετρολογίας από πολύ παλιά. Πλέον αναγνωρίζεται πως, όταν όλες οι συνιστώσες σφαλμάτων έχουν αξιολογηθεί και έχουν γίνει οι απαραίτητες διορθώσεις υπάρχει ακόμα αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα της μέτρησης.

Όπως η σχετικά διεθνής χρήση του συστήματος SI έφερε συνοχή στις επιστημονικές και τεχνολογικές μετρήσεις, μία παγκόσμια ομοφωνία στην αξιολόγηση και έκφραση της αβεβαιότητας μετρήσεων θα έδινε τη δυνατότητα στα αποτελέσματα μετρήσεων σε επιστήμες, μηχανική, εμπόριο, βιομηχανία, υγεία και νομοθεσία να είναι εύκολα κατανοητά και ερμηνευόμενα. Στην εποχή της παγκόσμιας αγοράς, είναι επιτακτικό, οι μέθοδοι για την αξιολόγηση και την έκφραση της αβεβαιότητας να είναι ομοιόμορφες διεθνώς για να είναι συγκρίσιμες οι μετρήσεις των διαφορετικών χωρών.

Σε αυτό το πλαίσιο αναγκών, δημιουργήθηκε από το Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) η οδηγία για την εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων «Guide to the expression of Uncertainty in Measurements», GUM [1] και στη συνέχεια εκδόθηκε το πρότυπο ISO 17025:1999, το οποίο έθεσε ως απαραίτητη και αναγκαία συνθήκη για τη λειτουργία των εργαστηρίων, την εκτέλεση διαδικασιών που θα αποσκοπούν στην εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεών τους. Το GUM θεωρείται, παρά τις κάποιες ασάφειες που περιέχει, ως το βασικό εργαλείο για υπολογισμό της αβεβαιότητας και τα περισσότερα κείμενα που έχουν εκδοθεί τα επόμενα χρόνια βασίζονται σε αυτό.

2.2 *Είδη αβεβαιότητας*

Σύμφωνα με τις οδηγίες των ISO και BIPM, η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους:

- Τύπος Α. Οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες που σχετίζονται με την επίδραση του περιβάλλοντος (θόρυβος, μεταβολή θερμοκρασίας, παρεμβολές), τις ατέλειες οργάνων, την αλληλεπίδραση οργάνου-μετρούμενου μεγέθους καθώς και σε υποκειμενικούς παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα των μετρήσεων. Υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους (Γνωστά και ως Τυχαία Σφάλματα). Πιο συγκεκριμένα, αβεβαιότητες τέτοιου τύπου προκύπτουν από την (υπολογιζόμενη ή εκτιμούμενη) μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος ενώ σε πολλές περιπτώσεις και η

γνώση της συμμεταβλητότητας (covariance) κρίνεται αναγκαία και απαραίτητη.

- Τύπος Β. Οφείλονται συνήθως σε μη ικανοποιητική ή λανθασμένη βαθμονόμηση οργάνων, σε λανθασμένες ενέργειες του παρατηρητή, της μεθόδου ανάλυσης κλπ.. Ο υπολογισμός τους γίνεται με άλλους τρόπους, αξιοποιώντας πληροφορίες που προέρχονται από πιστοποιητικά διακρίβωσης, χαρακτηριστικά του οργάνου μέτρησης, εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση κ.α. Παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας. Στην κατηγορία Τύπου Β υπάγονται τα λεγόμενα Συστηματικά σφάλματα, η αβεβαιότητα έμμεσης μέτρησης και η σύνθετη αβεβαιότητα.

2.3 Μοντελοποίηση μέτρησης

Στο σημείο αυτό ορίζεται ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο ουσιαστικά θα περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού μιας μετρούμενης ποσότητας εξόδου Y από N ποσότητες εισόδου $X_i, i=1, \dots, N$. Στις περισσότερες περιπτώσεις το Y δεν μετράται απευθείας αλλά καθορίζεται μέσω μιας συνάρτησης που θα περιέχει όλες εκείνες τις τιμές των μεγεθών που εισάγουν αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.1)$$

Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι ποσότητες X_i αντιστοιχούν και αυτές σε αποτελέσματα μετρήσεων, που εξαρτώνται όμως από άλλες ποσότητες όπως συντελεστές διόρθωσης για συστηματικά σφάλματα καθιστώντας έτσι τη συνάρτηση f ιδιαίτερα περίπλοκη.

Αν $x_i, i=1, \dots, N$, οι εκτιμήσεις των N εισόδων τότε μέσω της ανάλογης σχέσης

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.2)$$

προκύπτει αντίστοιχα και η εκτίμηση για την έξοδο y που θα αποτελεί και το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης της εξόδου y που εκτιμάται με τη χρήση του παραπάνω τύπου, απαιτείται ο κατάλληλος συνδυασμός όλων των τιμών τυπικής απόκλισης-αβεβαιότητας κάθε εκτίμησης εισόδου x_i .

Κάθε εκτίμηση εισόδου x_i και η συσχετιζόμενη αβεβαιότητα $u(x_i)$ προκύπτουν από μία κατανομή των πιθανών τιμών της εισόδου X_i . Η κατανομή αυτή μπορεί να

προκύπτει από μία σειρά παρατηρήσεων του X_i (τύπος A) ή να είναι από πριν γνωστή (τύπος B).

Οι επιμέρους αυτές αβεβαιότητες που συνεισφέρουν στη συνολική αβεβαιότητα του αποτελέσματος εξόδου μπορούν να ανήκουν είτε στις συνιστώσες τύπου A είτε συνιστώσες τύπου B.

2.4 Υπολογισμός αβεβαιότητας τύπου A

Η μετρητική αβεβαιότητα Τύπου A, U_A , καθορίζεται από τη στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία προκύπτουν από επαναλαμβανόμενες ανεξάρτητες μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα κάτω από ελεγχόμενες παρόμοιες συνθήκες, με τη χρήση οργάνων μέτρησης μεγάλης ακρίβειας. Πιο συγκεκριμένα, μόλις ολοκληρωθεί η λήψη όλων των μετρήσεων, διερευνάται η στατιστική κατανομή που ακολουθούν τα αποτελέσματα αυτά, που για πρακτικούς λόγους θεωρείται ότι προσεγγίζουν τη κανονική, καθώς η πραγματική κατανομή τους είναι σπάνια γνωστή με ακρίβεια. Με τη παραδοχή λοιπόν της κανονικής κατανομής, για το προσδιορισμό της αβεβαιότητας τύπου A απαραίτητος είναι αρχικά ο υπολογισμός του μέσου όρου του συνόλου των μετρήσεων. Η καλύτερη εκτίμηση της μέσης τιμής της κατανομής που ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι ο αριθμητικός μέσος που δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

Όπου x_i η τιμή της μέτρησης του μεγέθους x και n το πλήθος των μετρήσεων.

Το μέγεθος που θα χαρακτηρίζει τη διασπορά των μετρήσεων γύρω από τη μέση τιμή και θα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αβεβαιότητας σε περιπτώσεις που θεωρείται ότι έχουμε ύπαρξη μεμονωμένων τιμών και απουσία συστηματικού σφάλματος είναι η τυπική απόκλιση (ή πειραματική τυπική απόκλιση κατά GUM). Ο τύπος για τον υπολογισμό της είναι:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.4)$$

Ο λόγος επιλογής του n (πλήθος των μετρήσεων) για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής και του $n-1$ για την εκτίμηση της τυπικής απόκλισης από τη μέση τιμή είναι ο εξής: Για τον υπολογισμό της διασποράς δεν χρησιμοποιείται η αληθινή μέση τιμή

του x αλλά η καλύτερη εκτίμησή της δηλαδή ο αριθμητικός μέσος του συνόλου των μετρήσεων. Έτσι η υπολογιζόμενη ποσότητα $(x_i - \bar{x})^2$ είναι πάντα λίγο μικρότερη από την επιθυμητή. Στη θεωρία των πιθανοτήτων, λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι οι μετρήσεις ακολουθούν κατανομή Gauss, έχει αποδειχθεί ότι αυτή η υποτίμηση διορθώνεται χρησιμοποιώντας τον παράγοντα (βαθμοί ελευθερίας) $n-1$ αντί για n .

Η πειραματική τυπική απόκλιση μέσου όρου χαρακτηρίζει το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής και εκφράζει την ακρίβεια της εκτίμησης πραγματικής τιμής από τον αριθμητικό μέσο και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2.5)$$

Θεωρώντας ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων ακολουθούν την κανονική κατανομή, για μια ποσότητα εισόδου X_i η τυπική αβεβαιότητα της εκτίμησης του x_i αποκαλείται τυπική αβεβαιότητα τύπου A και είναι $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$.

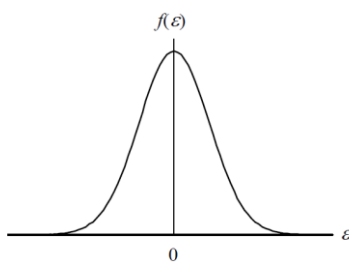
2.5 Υπολογισμός αβεβαιότητας τύπου B

Όταν η ποσότητα εισόδου X_i δεν έχει προκύψει από επαναληπτικές παρατηρήσεις, η αντιστοιχούμενη τυπική απόκλιση $u(x_i)$ υπολογίζεται από την διαθέσιμη επιστημονική πληροφορία της μεταβλητότητας του X_i . Η πληροφορία αυτή μπορεί να προέλθει από:

- Προηγούμενα δεδομένα μετρήσεων
- Εμπειρία ή γενικότερη γνώση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων των σχετικών υλικών και οργάνων
- Πιστοποιητικά των κατασκευαστών
- Αβεβαιότητες που προκύπτουν από εγχειρίδια

Αρχικά πρέπει να εντοπιστούν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης. Έπειτα, πρέπει να γίνει αντιστοίχιση των παραγόντων με κάποια γνωστή στατιστική κατανομή που να προσεγγίζει καλύτερα την μορφή του. Οι κυριότερες κατανομές που χρησιμοποιούνται είναι η κανονική, η τριγωνική και η ομοιόμορφη (ορθογώνια). [2]

2.5.1 Κανονική κατανομή

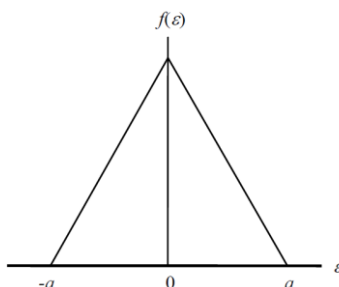


Στη περίπτωση που τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή, είναι απαραίτητο να αναφέρεται μια δεδομένη στάθμη εμπιστοσύνης. Η πιο συνηθισμένη στάθμη που απαιτείται σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι 0,95 (ή 95%). Ανάλογα λοιπόν με τη τιμή του $p\%$, για τον υπολογισμό της τυπικής αβεβαιότητας διαιρείται η αβεβαιότητα που είναι συνήθως της μορφής $x \pm a$ με τον αντίστοιχο συντελεστή κάλυψης k . Οι συντελεστές κάλυψης, που ουσιαστικά ταυτίζονται με τους συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί το εύρος /ανοχή της τιμής αναφέρονται στον πίνακα της τυποποιημένης κατανομής και εξαρτώνται κάθε φορά από τη δεδομένη στάθμη εμπιστοσύνης της κανονικής κατανομής. Η κανονική κατανομή ορίζεται κυρίως όταν υπάρχει συνεισφορά πολλαπλών αβεβαιοτήτων. Για το υπολογισμό, συνεπώς, της τυπικής αβεβαιότητας μιας συνεισφοράς με υποτιθέμενη κανονική κατανομή χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$u(x_i) = \frac{u}{k} \quad (2.6)$$

Όπου u η διευρυμένη αβεβαιότητα και k ο αριθμός που προκύπτει από το επίπεδο εμπιστοσύνης. Για τις συνηθισμένες τιμές εμπιστοσύνης 90, 95 και 99% το k παίρνει τιμές 1,64, 1,96 και 2,58 αντίστοιχα. [3]

2.5.2 Τριγωνική κατανομή

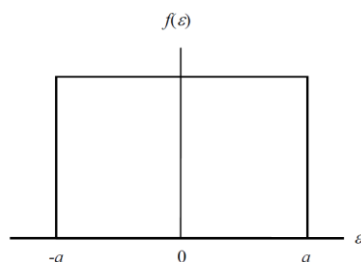


Η τριγωνική κατανομή χρησιμοποιείται κυρίως όταν είναι γνωστό ότι οι περισσότερες τιμές των μετρήσεων είναι πιθανό να βρίσκονται κοντά στο κέντρο της

κατανομής. Αυτό σημαίνει ότι ορίζεται μόνο στις περιπτώσεις όπου η συμβολή έχει μια κατανομή με καθορισμένα όρια και όπου η πλειοψηφία των τιμών μεταξύ των ορίων βρίσκονται γύρω από το κεντρικό σημείο [3]. Η σχέση για το υπολογισμό της τυπικής αβεβαιότητας μιας συνεισφοράς που ακολουθεί τη τριγωνική κατανομή είναι:

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}} \quad (2.7)$$

2.5.3 Ομοιόμορφη κατανομή



Όταν τα δεδομένα που λαμβάνονται σχετικά με τη αβεβαιότητα από τα πιστοποιητικά διακριβώσεων και γενικότερα από τις υπόλοιπες πηγές πληροφοριών, προσδιορίζουν μόνο το εύρος / ανοχή ($\pm a$) χωρίς να κάνουν αναφορά για τη στάθμη εμπιστοσύνης, τότε θεωρείται ότι τα αποτελέσματα ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή. Με την ομοιόμορφη κατανομή επιλέγεται ως δεδομένο ότι όλες οι τιμές εντός του εύρους τιμών το οποίο καλύπτουν οι αβεβαιότητες, έχουν την ίδια πιθανότητα να είναι η αληθής τιμή, γεγονός που γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας και τη γραφική παράσταση της κατανομής όπως φαίνεται παραπάνω. Η τυπική αβεβαιότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

όπου a_i το μισό μήκος του διαστήματος που δίνεται από τα ορισμένα όρια της μεμονωμένης συμβολής αβεβαιότητας. [3]

2.6 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας

Η ολική αβεβαιότητα προκύπτει από τον συνδυασμό των αβεβαιοτήτων τύπου A και B και προκύπτει από την σχέση:

$$u_{ολικο} = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (2.9)$$

Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να εκφραστεί μια αβεβαιότητα, είτε αυτή είναι σε ένα έγγραφο (πιστοποιητικό CRM, διακρίβωσης, ανάλυσης κ.λ.π.), είτε προσδιορίζεται από ένα εργαστήριο είναι οι εξής:

-Τυπική αβεβαιότητα (u)

Είναι η τυπική απόκλιση της συνάρτησης κατανομής που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα.

-Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα

Είναι ο συνδυασμός των διαφορετικών τυπικών αβεβαιοτήτων. Με βάση την εξίσωση:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.10)$$

η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα προκύπτει από την εξίσωση:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.11)$$

Ισοδύναμα η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) \quad (2.12)$$

όπου c_i είναι ένας συντελεστής ευαισθησίας που συσχετίζει τις ποσότητες εισόδου και εξόδου και εκφράζει τις μερικές παραγώγους. Οι παραπάνω εξισώσεις αναφέρονται σε X_i ανεξάρτητα μεταξύ τους. Σε περίπτωση μη ανεξαρτησίας υπάρχουν επιπλέον όροι που περιλαμβάνουν και την συσχέτιση των μη ανεξάρτητων X_i . Πιο συγκεκριμένα η εξίσωση (2.12) γίνεται:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2.13)$$

όπου x_i και x_j είναι οι εκτιμήσεις των X_i και X_j και $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ είναι η εκτιμώμενη συνδιακύμανση των x_i και x_j . Ο βαθμός συσχέτισης υπολογίζεται από τον συντελεστή συσχέτισης από την εξίσωση:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (2.14)$$

όπου $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$ και $r(x_i, x_j)$ βρίσκεται στο διάστημα [-1,1]. Σε όρους συντελεστή συσχέτισης η εξίσωση (2.13) γράφεται ισοδύναμα:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (2.15)$$

-Διευρυμένη αβεβαιότητα: εκφράζει ένα διάστημα μέσα στο οποίο βρίσκεται η μετρούμενη τιμή με κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης. Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.16)$$

Όπου k είναι ο συντελεστής που βασίζεται στο επίπεδο εμπιστοσύνης. Το σύνηθες είναι $k = 2$ για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. [1]

2.7 Εντοπισμός παραγόντων αβεβαιότητας σε MCF εγκατάσταση

Στη συνέχεια παρουσιάζονται βασικοί παράγοντες αβεβαιότητας κατά την διαδικασία μετρήσεων σε MCF εγκαταστάσεις και οι κατανομές που ακολουθούν. Οι αναφερόμενοι παράγοντες είναι ενδεικτικοί και σε περίπτωση εκτενέστερης ανάλυσης πιθανότατα θα προκύψουν περισσότεροι. Οι γενικότερες περιοχές αναζήτησης αυτών των παραγόντων χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά στην τοποθέτηση του EUT και των μαγνητομέτρων που θεωρείται σημαντικός παράγοντας αβεβαιότητας. Έπειτα ακολουθούν τα χαρακτηριστικά των μαγνητομέτρων και του συστήματος ανάκτησης δεδομένων, η επίπτωση της διαδικασίας μέτρησης (περιλαμβάνοντας και τον αλγόριθμο επίλυσης του MDM) και τέλος η συνεισφορά του περιβάλλοντος. Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί αναφέρεται και η τεχνική εκτίμησης της αβεβαιότητας. Η τιμή 1 αντιστοιχεί σε πιστοποιητικό βαθμονόμησης, η τιμή 2 σε δεδομένα του κατασκευαστή και η τιμή 3 σε επαναληπτικές μετρήσεις.

2.8 Στατιστική ανάλυση αβεβαιότητας σε πραγματικές μετρήσεις

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις ενός πρότυπου μαγνήτη σε MCF εγκατάσταση της ESA [4]. Είναι χωρισμένες ανά συνιστώσα και περιλαμβάνονται οι τιμές που μετρήθηκαν και οι αναμενόμενες θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου. Μελετώντας τον Πίνακα 2.2 μπορεί να ελεγχθεί εάν οι διαφορές μεταξύ των τιμών ακολουθούν κανονική κατανομή ή όχι. Έπειτα από στατιστική ανάλυση των παραπάνω τιμών προκύπτει ότι οι μέση τιμή των διαφορών (ποσοστό %) των μετρήσεων από τις θεωρητικές τιμές είναι 1.4751% και η διάμεσος 0.719252%.

Πίνακας 2.1 - Ενδεικτικές πηγές αβεβαιότητας, η κατανομή που ακολουθούν και η τεχνική εκτίμησης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας

	Πηγή αβεβαιότητας	Τεχνική εκτίμησης	Κατανομή
A	Τοποθέτηση EUT και μαγνητομέτρων		
1	Τοποθέτηση Μαγνητομέτρων και ευθυγράμμιση	1	τριγωνική
2	Τοποθέτηση EUT και ευθυγράμμιση	1	τριγωνική
3	Ανάγνωση γωνιών	2	ομοιόμορφη
4	Δονήσεις	2	τριγωνική
B	Μαγνητόμετρο		
1	Ακρίβεια πυκνότητας μαγνητικού πεδίου	1 ή 2	κανονική ή ομοιόμορφη
2	Σφάλμα αντιστάθμισης (offset) σε μηδενικό πεδίο	1	ομοιόμορφη
3	Εγγενής θόρυβος	1 ή 2	κανονική ή ομοιόμορφη
4	Σταθερότητα αντιστάθμισης σε σχέση με την θερμοκρασία του αισθητήρα	2	ομοιόμορφη
5	Σταθερότητα ευθυγράμμισης αξόνων	2	ομοιόμορφη
Γ	Analog to Digital Conversion (ADC)		
1	Κβαντισμός	2	ομοιόμορφη
2	Αριθμός δειγμάτων και ρυθμός δειγματοληψίας σχετικά με τη διαταραχή από τις γραμμές μεταφοράς	2	ομοιόμορφη
3	Θόρυβος ADC	2	ομοιόμορφη
4	Αβεβαιότητα ανοίγματος	2	ομοιόμορφη
Δ	Διαδικασία		
1	Γωνιακή προσαύξηση 10^0	2	κανονική
2	Υπολογισμός τιμής προσαρμογής (goodness of fit)	3	κανονική
E	Περιβαλλοντικοί παράγοντες		
1	Συνεισφορά 50 Hz	2	τριγωνική
2	Διαταραχές DC πηγών - πεδίο γης	2	ομοιόμορφη
3	Μεταβολή μαγνητικού πεδίου γης	2	κανονική
4	Θερμοκρασία	3	κανονική

Πίνακας 2.2 - Μετρούμενο και θεωρητικό μαγνητικό πεδίο πρότυπου μαγνήτη ανά συνιστώσα

	X(nT)		Y(nT)		Z(nT)	
	μετρούμενο	θεωρητικό	μετρούμενο	θεωρητικό	μετρούμενο	θεωρητικό
1	1656.4	1668.4	761.7	750.1	724.6	749.1
2	1866.7	1872.2	627.6	616.2	712.2	730
3	2019.6	2023	474.7	463.9	696.2	714.4
4	2115.9	2116.3	313.2	298	685.3	702.7
5	2156.7	2149.5	138.7	123.3	679.9	695.2
6	2127.6	2121.7	-43	-55	676.3	692.3
7	2036.8	2033.6	-225.5	-231.6	676.6	693.9
8	1891.3	1888	-389.6	-401.2	714.5	700
9	1688	1689.1	-547.4	-558.9	727.5	710.5
10	1434.8	1442.8	-690.8	-699.9	738.9	725
11	1145.5	1156.4	-810.8	-820	751.6	743.1
12	828.6	838.4	-905.5	-915.6	770.2	764.3
13	485.2	498.3	-974.6	-983.8	790.7	787.9
14	137.1	146.2	-1012.8	-1022.4	812.4	813.2
15	-217	-207.2	-1020.5	-1030	834.9	839.5
16	-559.5	-551.2	-999.1	-1006.5	860.4	866.1
17	-883.4	-875.4	-946.9	-952.2	886.8	892
18	-1177.1	-1169.7	-865.2	-868.8	911	916.5
19	-1428.8	-1425	-757.9	-758.7	935	938.8
20	-1640.7	-1633.4	-624.3	-625.1	955.2	958.3
21	-1793.5	-1788.4	-477.6	-472.2	972.8	974.3
22	-1889.5	-1884.9	-309.8	-304.5	986.1	986.3
23	-1924.9	-1920	-131.8	-127.2	995.7	994.1
24	-1893.2	-1892.5	49.2	54	1000.5	997.2
25	-1802.4	-1803.3	230.6	233.7	999.3	995.6
26	-1652.9	-1655	402.4	406.2	994.7	989.3
27	-1445.4	-1452.3	563.9	566.1	984.3	978.7
28	-1194.5	-1201.5	705.9	708.5	969.9	963.9
29	-906.3	-910.6	825.1	829	951.6	945.4
30	-586.2	-588.4	919.5	923.8	931	923.8
31	-248.9	-245	987.9	990.3	906.6	899.9
32	110.7	109	1028.8	1026.3	882.9	874.3
33	463.8	462.8	1035.7	1031	857.3	847.8
34	804.1	805.6	1013.9	1004.3	833.4	821.2
35	1125.2	1127	962	947.2	809.4	795.4
36	1417.4	1417.5	880.8	861.6	789	771.2
37	1669.5	1668.4	776.3	750.1	772.1	749.1

Επιπλέον, η κύρτωση προκύπτει 36.62046561 ενώ η ασυμμετρία 5.403721939. Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση γίνεται σαφές ότι δεν ακολουθείται η κανονική κατανομή (κύρτωση = 3, ασυμμετρία = 0 και μέση τιμή = διάμεσος).

Στη συνέχεια της διατριβής, χωρίς άρση της γενικότητας, οι θεωρητικές τιμές των εκάστοτε EUT διαταράσσονται με ποσοστό 5% (ή 10% σε κάποιες περιπτώσεις) ομοιόμορφα για την παραγωγή εικονικών μετρήσεων. Ο στόχος είναι να δημιουργηθούν όσο το δυνατόν κοντινότερες στις πραγματικές μετρήσεις συμπεριλαμβάνοντας την συνολική αβεβαιότητα της πραγματικής διαδικασίας στο τελικό αποτέλεσμα για την αξιολόγηση των αλγορίθμων.

Από τις παραπάνω τιμές φαίνεται επίσης ότι η διαταραχή κατά 5% που θα χρησιμοποιηθεί υπερκαλύπτει την μέση τιμή των διαφορών των πραγματικών μετρήσεων αλλά χρησιμοποιήθηκε για λόγους ασφάλειας.

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί, ότι αναλυτικός υπολογισμός της αβεβαιότητας σε MCF εγκαταστάσεις έχει ανατεθεί από την ESA στα πλαίσια ευρωπαϊκού προγράμματος αλλά δεν έχει ολοκληρωθεί έως τη χρονική στιγμή της συγγραφής της παρούσας διατριβής.

Αναφορές

- [1] “Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement”, first edition September 2008, GUM 1995 with minor corrections, JCGM 100:2008
- [2] NASA Handbook: “ Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods”, NASA Measurement Quality Assurance Handbook- ANNEX 3, July 2010, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC 20546
- [3] Μαστοροπούλου Μ., “Μελέτη αβεβαιότητας μετρήσεων και μοντελοποίησης μαγνητικού πεδίου με εφαρμογή επίτευξης μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές”, Διπλωματική Εργασία, 2014, Αθήνα
- [4] ESA, “MCF-MAGNET Software User Manual (SUM)”, v1.2, 13/3/2011

Κεφάλαιο 3 - Στοχαστικοί αλγόριθμοι

3.1. Εισαγωγή

Η χωρίς τέλος αναζήτηση για αποδοτικότητα και παραγωγικότητα έχει κάνει την βελτιστοποίηση κύρια έννοια στους μηχανικούς και επιστήμονες. Η γρήγορη διεργασία, η μείωση κατανάλωσης ενέργειας ή οι μικρές και οικονομικές αλυσίδες εφοδιασμού είναι πλέον παράγοντες επίτευξης επιτυχίας.

Δεδομένου ενός χώρου Ω ανεξάρτητων λύσεων $\omega \in \mathbb{R}^n$ και μία αντικειμενική συνάρτηση $f, f(\omega) \rightarrow \mathbb{R}$, βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία της εύρεσης της λύσης ω^* που ελαχιστοποιεί την f .

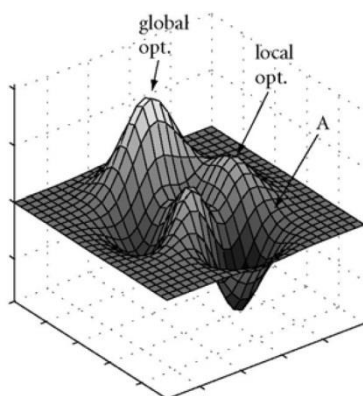
Για πολύ δύσκολα προβλήματα, η βελτιστοποίηση περιγράφεται σαν ένας περίπατος σε ένα τοπίο καταλληλότητας. Όπως πρώτα αναφέρθηκε από τον S. Wright το 1932 [1] τα τοπία καταλληλότητας στοχεύουν στην εκπροσώπηση της καταλληλότητας ενός έμβιου οργανισμού σύμφωνα με το γενότυπο διάστημα. Καθώς γίνεται η βελτιστοποίηση, η καταλληλότητα μετράει την ποιότητα κάποιας λύσης και τα τοπία καταλληλότητας σχεδιάζουν τις λύσεις και τις αντίστοιχες τιμές καταλληλότητας.

Τα πραγματικά προβλήματα είναι πολυτροπικά με αποτέλεσμα τα τοπία καταλληλότητας να περιλαμβάνουν παραπάνω από ένα τοπικά βέλτιστα, όπως φαίνεται ενδεικτικά και στην Εικόνα 3.1. Αυτό κυρίως συμβαίνει όταν οι μεταβλητές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Οι αναλυτικές μέθοδοι, όπως η κλίση καθόδου, συνήθως αποτυγχάνουν στην εύρεση ολικού βέλτιστου εφόσον δεν είναι ικανές να διαχειριστούν τέτοιες συναρτήσεις. Επιπλέον, οι εταιρείες κυρίως ασχολούνται με συνδυαστικά προβλήματα όπως τετραγωνική εκχώρηση, χρονοδιαγράμματα η προβλήματα δρομολόγησης. Τέτοια προβλήματα χρησιμοποιώντας διακριτές καταστάσεις παράγουν μη-συνεχείς αντικειμενικές συναρτήσεις που δεν επιλύονται με αναλυτικές μεθόδους.

Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι σχεδιασμένοι να χειρίζονται υψηλής πολυπλοκότητας προβλήματα. Μερικά παραδείγματα στοχαστικών

αλγορίθμων είναι η προσομοιωμένη απόκτηση, η αναζήτηση ταμπού, τα νευρωνικά δίκτυα, οι γενετικοί αλγόριθμοι και η βελτιστοποίηση σμήνους μονάδων. Στην παρούσα διατριβή θα γίνει χρήση των δύο τελευταίων μεθόδων.



Εικόνα 3.1 - Τοπίο καταλληλότητας με ολικό και τοπικά βέλτιστα

3.2. Γενετικοί αλγόριθμοι

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, έχει παρατηρηθεί ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανάπτυξη μεθόδων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της Γενετικής Εξέλιξης και της Κληρονομικότητας. Τα μειονεκτήματα των κλασικών μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή λογισμικού που να μπορεί να εκμεταλλεύεται πιο αποδοτικά τις τεράστιες δυνατότητες του υλικού, ήταν η βασική αιτία που ώθησε τους επιστήμονες σ' αυτήν την αναζήτηση. Αυτού του είδους οι μέθοδοι λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων και εφαρμόζοντας πάνω σε αυτόν διάφορες διαδικασίες επιλογής του καλύτερου ατόμου, καθώς και διάφορους γενετικούς τελεστές. Οι τελεστές αυτοί αντιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο αναπαράγονται και μεταλλάσσονται τα χρωμοσώματα των κυττάρων των ζωντανών οργανισμών. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων χρησιμοποιώντας, τόσο κομμάτια και στοιχεία από την προηγούμενη γενιά, όσο και εντελώς καινούρια κομμάτια που δοκιμάζονται για τυχόν καλή απόδοσή τους [2].

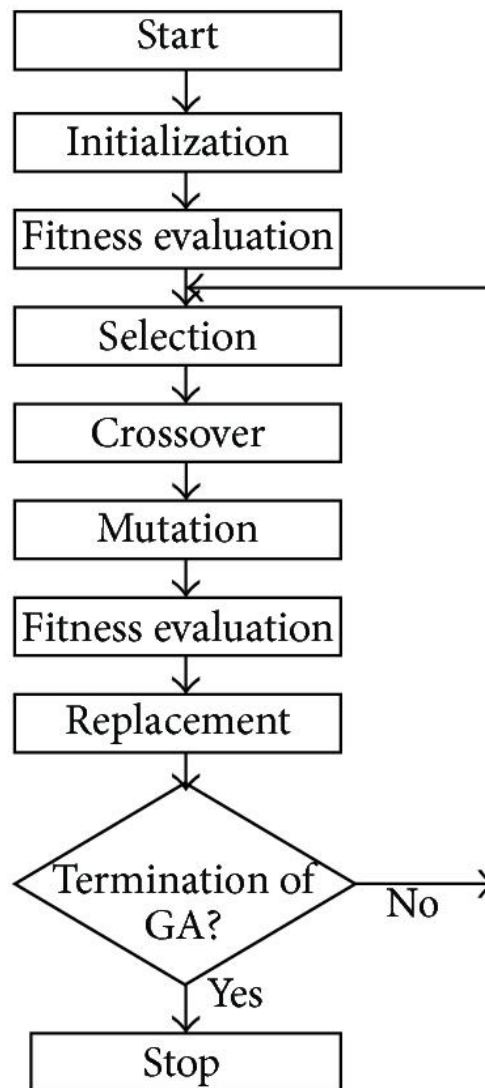
Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι βιολόγοι επιστήμονες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη, όμως, που οδήγησε στη μορφή με την οποία είναι γνωστοί και σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan [3].

Οι γενετικοί αλγόριθμοι βασίζονται στην θεωρία της εξέλιξης των ειδών όπως αναπτύχθηκε από τον Δαρβίνο. Τα κυριότερα σημεία της είναι τα εξής:

1. Σε κάθε είδος τα χαρακτηριστικά μεταφέρονται από γενιά σε γενιά και τα αναπαραγωγικά επιτυχημένα άτομα μεταφέρουν τα περισσότερα χαρακτηριστικά. Οι δυσκολίες, τα εμπόδια και οι αντιξοότητες που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής των οργανισμών είναι οι παράγοντες, που καθορίζουν ποιοι από αυτούς θα κατορθώσουν να ζήσουν και να πολλαπλασιαστούν. Όταν αλλάζουν τα παραπάνω αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά που εξασφαλίζουν την προσαρμογή και κατά συνέπεια την επιβίωση τους.
2. Αυτή η αλλαγή των χαρακτηριστικών είναι ουσιαστικά αλλαγή στα χρωμοσώματα τους τα οποία αποτελούνται από γονίδια. Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια ονομάζεται γονότυπος ενώ, το σύνολο των «ορατών» χαρακτηριστικών του και της συμπεριφοράς του, που καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων, συνιστούν το φαινότυπο.
3. Οι δύο βασικές λειτουργίες της εξέλιξης είναι η αναπαραγωγή και η μετάλλαξη. Κατά τη μετάλλαξη γίνεται με τυχαίο τρόπο η αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων, συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. ακτινοβολία), έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό. Η μετάλλαξη, μερικές φορές, μπορεί να προκαλέσει βελτιώσεις και, χωρίς αμφιβολία, μερικά λάθη που έγιναν αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την προοδευτική εξέλιξη της ζωής.
4. Προϊόν της αναπαραγωγής είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται τα μισά από τον πατέρα και τα μισά από τη μητέρα. Έτσι, για κάθε χαρακτηριστικό, το νέο άτομο έχει

πάρει ένα γονίδιο από κάθε γονέα. Το γονίδιο που τελικά καθορίζει το χαρακτηριστικό λέγεται κυρίαρχο ή επικρατές και το άλλο υπολειπόμενο. Γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα (δηλαδή που είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό), λέγονται αλληλόμορφα.

Βασιζόμενος στις παραπάνω αρχές, ένας γενετικός αλγόριθμος αρχικά διατηρεί έναν πληθυσμό από πιθανές λύσεις. Κάθε λύση αξιολογείται για την καταλληλότητα της. Μετά την αξιολόγηση όλου του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός από τα πιο κατάλληλα στοιχεία του προηγούμενου, μέσω μετάλλαξης και διασταύρωσης. Έπειτα αξιολογείται εκ νέου ο νέος πληθυσμός έως να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενός γενετικού αλγορίθμου.



Εικόνα 3.2 - Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2 τα δύο βασικότερα μέρη ενός γενετικού αλγορίθμου είναι η διαδικασία αναπαραγωγής (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη) και η αντικειμενική συνάρτηση.

Η αντικειμενική συνάρτηση εξυπηρετεί τον ρόλο του περιβάλλοντος στο οποίο για κάθε άτομο του πληθυσμού γίνεται αξιολόγηση καταλληλότητας και ικανότητας προσαρμογής – επιβίωσης. Στην επόμενη γενιά τα γονίδια που θα μεταφερθούν είναι τα γονίδια των ατόμων που επιβίωσαν. Όσο πιο σωστά γίνεται η μετάφραση του πραγματικού προβλήματος στην αντικειμενική συνάρτηση τόσο πιθανότερο είναι να βρεθεί η καλύτερη λύση αφού μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται η επιλογή των καλύτερων λύσεων σε κάθε γενιά.

Η αναπαραγωγή είναι η σημαντικότερη διαδικασία ενός γενετικού αλγορίθμου και χωρίζεται στην διασταύρωση και στη μετάλλαξη. Κατά τη διασταύρωση, τα άτομα που έμειναν από την επιλογή των καλύτερων (μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης) σχηματίζουν ομάδες των δύο. Από κάθε ζευγάρι προκύπτουν δύο νέα άτομα που έχουν μοιρασμένο το γενετικό υλικό των προηγούμενων. Ο στόχος είναι να άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους. Αυτό προσφέρει την ανακατεύθυνση του ψαξίματος σε άλλες περιοχές αναζήτησης και επιπλέον οι συνδυασμοί που προκύπτουν από τους καλύτερους υποψήφιους είναι πιθανότερο να είναι υψηλής ικανότητας. Κατά την μετάλλαξη γίνεται τυχαία αλλαγή στον απόγονο της διασταύρωσης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ικανότερους απογόνους ή όχι, όπως ακριβώς και στη φύση.

Σε κάθε περίπτωση, ο πληθυσμός της νέας γενιάς θα περάσει πάλι από αξιολόγηση (αντικειμενική συνάρτηση), τα καλύτερα άτομα θα επιβιώσουν και θα αναπαραχθούν και η διαδικασία θα επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν οι συνθήκες τερματισμού του αλγορίθμου (είτε κάποια τιμή καταλληλότητας είτε αριθμός γενεών).

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, το ενδιαφέρον για τις διαδικασίες βελτιστοποίησης έχει αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε να υπάρχουν πολύπλοκα και με πολύ αυστηρούς περιορισμούς προβλήματα, που να μπορούν να λυθούν μόνο προσεγγιστικά από τους σημερινούς υπολογιστές. Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση τέτοιου είδους προβλημάτων. Εάν και ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό από τους

αλγόριθμους που εφαρμόζουν τυχαίες μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, αφού είναι σε θέση να συνδυάζουν στοιχεία και από άμεσες και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο οι γενετικοί αλγόριθμοι θεωρούνται πιο εύρωστοι από τις υπάρχουσες μεθόδους άμεσης αναζήτησης. Ένα άλλο εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται, σε αντίθεση με όλες τις άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης [2].

3.3. Βελτιστοποίηση σμήνους μονάδων - *Particle swarm optimization (PSO)*

Εισαγωγή

Η PSO είναι μια εξελικτική μέθοδος υπολογισμού η οποία αναπτύχθηκε από τους Kennedy και Eberhart το 1995 [4] και εκσυγχρονίστηκε ως προς την αποδοτικότητα της από τον Eberhart το 2001 [5]. Ξεκίνησε σαν μια μέθοδος προσομοίωσης ενός απλοποιημένου κοινωνικού συστήματος. Ο αρχικός σκοπός ήταν να προσομοιώσει γραφικά την με χάρη αλλά απρόβλεπτη χορογραφία ενός σμήνους πτηνών. Οι πρώτες προσομοιώσεις είχαν τροποποιηθεί για να ενσωματώσουν ταίριασμα ταχυτήτων μεταξύ των κοντινότερων γειτόνων, εξαλείφοντας βοηθητικές μεταβλητές και ενσωματώνοντας πολυδιάστατη αναζήτηση και επιτάχυνση με απόσταση.

Κατά την ανάπτυξη του αλγορίθμου έγινε αντιληπτό ότι το παραγόμενο μοντέλο ήταν, στην πραγματικότητα, μέθοδος βελτιστοποίησης. Μέσω δοκιμών και λαθών, ένα πλήθος παραμέτρων μη σχετικών με τη βελτιστοποίηση εξαλείφθηκαν από τον αλγόριθμο, καταλήγοντας σε μία πολύ απλή μέθοδο.

Ανάλυση της PSO

3.3.1 Η πρώτη υλοποίηση

Η PSO είναι παρόμοια με τη μέθοδο γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithm – GA) υπό το πρίσμα ότι το σύστημα αρχικοποιείται με ένα πληθυσμό τυχαίων λύσεων. Διαφέρει όμως από το GA στο ότι σε κάθε πιθανή λύση ανατίθεται μία τυχαία

ταχύτητα και οι τυχαίες λύσεις, σωματίδια, «πετάνε» στη συνέχεια στον χώρο του προβλήματος.

Κάθε σωματίδιο παρακολουθεί τις συντεταγμένες του στον χώρο του προβλήματος οι οποίες σχετίζονται με την βέλτιστη λύση (καταλληλότητα) που έχει επιτευχθεί μέχρι εδώ (η τιμή της καταλληλότητας επίσης αποθηκεύεται). Η τιμή της καταλληλότητας ονομάζεται pbest(personal best – προσωπικό βέλτιστο). Μία άλλη τιμή βέλτιστου που παρακολουθείται από την συνολική έκδοση της PSO είναι η ολικά βέλτιστη τιμή, καθώς και η θέση της, που έχει επιτευχθεί μέχρι εκείνη τη στιγμή από οποιοδήποτε σωματίδιο του πληθυσμού. Αυτή η τοποθεσία ονομάζεται gbest (global best – ολικό βέλτιστο).

Η γενική ιδέα της PSO βελτιστοποίησης στηρίζεται στην, σε κάθε χρονικό βήμα, αλλαγή της ταχύτητας (επιτάχυνση) κάθε σωματιδίου προς τις θέσεις pbest και gbest. Η επιτάχυνση σταθμίζεται με έναν τυχαίο όρο με ξεχωριστούς τυχαίους αριθμούς που παράγονται για να επιταχύνουν προς τις θέσεις των pbest και gbest.

Η διαδικασία για εφαρμογή της PSO φαίνεται στην Εικόνα 3.3 και η περιγραφή της είναι:

1. Αρχικοποίηση ενός πληθυσμού (παράταξη) σωματιδίων με τυχαίες θέσεις και ταχύτητες σε d διαστάσεις στον χώρο του προβλήματος.
2. Για κάθε σωματίδιο, γίνεται αξιολόγηση της επιθυμούμενης συνάρτησης βελτιστοποίησης (αντικειμενική συνάρτηση) σε d μεταβλητές.
3. Σύγκριση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του σωματιδίου με το pbest. Εάν η νέα τιμή είναι καλύτερη από το pbest τότε το pbest γίνεται η νέα τιμή και η θέση του pbest γίνεται η νέα θέση στο d-διαστατό χώρο.
4. Σύγκριση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης με το gbest. Εάν η νέα τιμή είναι καλύτερη από το gbest τότε η νέα τιμή ορίζεται ως gbest στην παράταξη (τιμή και θέση).
5. Μεταβολή της ταχύτητας και της θέσης του σωματιδίου σύμφωνα με τις εξισώσεις (1) και (2):

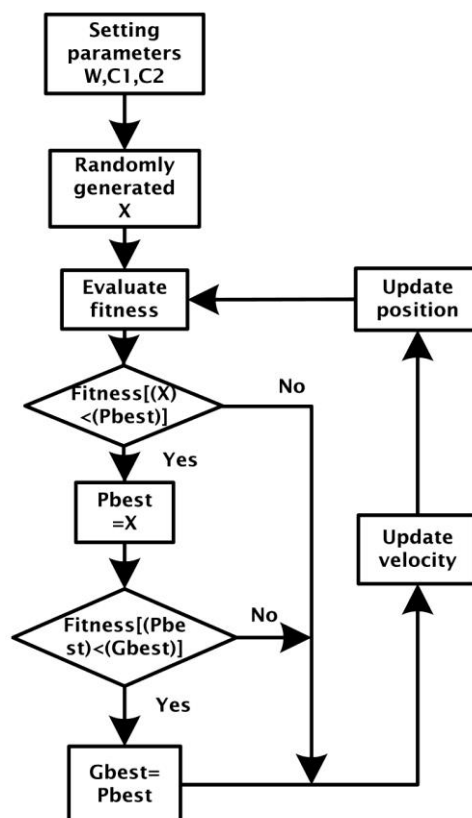
$$v_{id} = v_{id} + c_1 * rand() * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * rand() * (p_{gd} - x_{gd}) \quad (1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2)$$

6. Επιστροφή στο βήμα 2 μέχρι να καλυφθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού, συνήθως κάποια ικανοποιητική τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ή ο μέγιστος αριθμός γενεών.

Οι ταχύτητες των σωματιδίων σε κάθε διάσταση περιορίζονται από μία μέγιστη ταχύτητα V_{max} . Εάν το άθροισμα των επιταχύνσεων οδηγούσε σε τιμή ταχύτητας μεγαλύτερης της V_{max} τότε η ταχύτητα περιορίζεται σε V_{max} .

Έτσι λοιπόν γίνεται αντιληπτό ότι η τιμή της V_{max} είναι μία σημαντική παράμετρος του προβλήματος. Καθορίζει την λεπτότητα (ανάλυση) με την οποία οι περιοχές μεταξύ της τωρινής τοποθεσίας και της τοποθεσίας – στόχο ερευνούνται. Εάν η V_{max} είναι μεγάλη τότε τα σωματίδια είναι πιθανό να περάσουν από «καλές» περιοχές χωρίς να κάνουν αναζήτηση ενώ, αν είναι μικρή τα σωματίδια δεν εξερευνούν αρκετά μακριά από τοπικές «καλές» περιοχές με αποτέλεσμα να κολλάνε σε τοπικά βέλτιστα χωρίς να μπορούν να βρουν καλύτερες θέσεις στον συνολικό χώρο.



Εικόνα 3.3 - Διάγραμμα ροής PSO αλγορίθμου

Οι σταθερές c_1 και c_2 στην εξίσωση (1) εκπροσωπούν την στάθμιση των στοχαστικών όρων επιτάχυνσης που τραβούν κάθε σωματίδιο προς τις θέσεις των pbest και gbest.

Έτσι λοιπόν, η ρύθμιση αυτών των σταθερών αλλάζει την ένταση του συστήματος. Δίνοντας χαμηλές τιμές επιτρέπεται στα σωματίδια να περιπλανούνται μακριά από τις περιοχές – στόχους πριν τραβηχτούν ξανά πίσω ενώ δίνοντας υψηλές τιμές έχει σαν αποτέλεσμα απότομες κινήσεις προς ή δίπλα στις περιοχές – στόχους.

Από τις πρώτες εκτιμήσεις με την PSO (κυρίως με τη μέθοδο δοκιμές – λάθη) οι καταλληλότερες τιμές για τις σταθερές c_1 και c_2 είναι 2, για τις περισσότερες εφαρμογές. Η μόνη παράμετρος που χρήζει ρύθμισης είναι η V_{max} και συνήθως ρυθμίζεται στο 10-20% του δυναμικού εύρους της μεταβλητής σε κάθε διάσταση [4].

3.3.2 Υλοποίηση με χρήση Βάρους Αδράνειας

Η V_{max} έχει τον ρόλο του ελέγχου της ικανότητας συνολικής εξερεύνησης του σμήνους σωματιδίων. Όπως ήδη αναφέρθηκε, μεγάλη V_{max} διευκολύνει την συνολική αναζήτηση ενώ μικρή V_{max} ενθαρρύνει την τοπική εκμετάλλευση. Η ιδέα του βάρους αδράνειας αναπτύχθηκε για καλύτερο έλεγχο της αναζήτησης και της εκμετάλλευσης. Το κίνητρο ήταν να εξαλειφθεί η χρήση της V_{max} . Η πρώτη αναφορά της εισαγωγής βάρους αδράνειας έγινε από τους Shi και Eberhart το 1998.

Οι εξισώσεις (3) και (4) εκφράζουν την επικαιροποίηση των εξισώσεων της ταχύτητας και της θέσης με την προσθήκη του βάρους αδράνειας. Οι εξισώσεις (3) και (4) είναι σχεδόν ίδιες με τις (1) και (2) με την προσθήκη του βάρους αδράνειας w σαν πολλαπλασιαστικό παράγοντα του v_{id} στην εξίσωση (3).

$$v_{id} = w * v_{id} + c_1 * rand() * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * rand() * (p_{gd} - x_{gd}) \quad (3)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (4)$$

Η χρήση του w προσέφερε αυξημένη απόδοση σε πολλές εφαρμογές. Όπως αρχικά αναπτύχθηκε, το w συνήθως μειώνεται γραμμικά από περίπου 0.9 σε 0.4 μέσα σε ένα τρέξιμο. Κατάλληλη επιλογή του w προσφέρει ισορροπία μεταξύ της αναζήτησης και εκμετάλλευσης και οδηγεί σε λιγότερες γενεές κατά μέσο όρο για την εύρεση βέλτιστης λύσης [5].

3.3.3 Περιοριστικός Παράγοντας

Μία άλλη προσέγγιση για καλύτερη σύγκλιση παρουσιάστηκε από τον Clerik (1999) στην οποία εισάγεται ένας παράγοντας K [5]. Σε αυτή την προσέγγιση, η ανανέωση της ταχύτητας γίνεται με βάση τον τύπο (5):

$$v_{id} = K * [v_{id} + c_1 * rand() * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * rand() * (p_{gd} - x_{gd})] \quad (5)$$

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (6)$$

$$\varphi = c_1 + c_2, \varphi > 4 \quad (7)$$

3.3.4 Εφαρμογές

Γενικά μιλώντας, η PSO, όπως και οι υπόλοιπες εξελικτικές μέθοδοι, μπορούν να εφαρμοστούν για να λύσουν οποιοδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης ή όποιο πρόβλημα μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ανάμεσα στις περιοχές με τις περισσότερες δυνατότητες εφαρμογής (χωρίς να περιορίζεται σε αυτές) είναι ο σχεδιασμός συστημάτων, πολλαπλών στόχων βελτιστοποίηση, αναγνώριση προτύπων, μοντελοποίηση βιολογικών συστημάτων, χρονοδρομολόγηση, επεξεργασία σημάτων, ρομποτικές εφαρμογές και λήψη αποφάσεων.

3.4. Συμπεράσματα

Οι στοχαστικές μέθοδοι που αναφέρθηκαν έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζονται υποθέσεις για τις ιδιότητες της αντικειμενικής συνάρτησης και επιπλέον δεν απαιτούν συγκεκριμένο αρχικό σημείο για να συγκλίνουν σε λύση γεγονός που τις κάνει κατάλληλες για την μελέτη μαγνητικής καθαρότητας. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που η ESA ξεκίνησε το 2011 την μετατροπή του παλιού αλγορίθμου του K. Mehlem [6], που βασιζόταν σε ντετερμινιστικό αλγόριθμο, σε υλοποιήσεις με βάση στοχαστικούς αλγορίθμους για τον υπολογισμό του MDM ενός EUT. Αυτή η νέα προσέγγιση που επέλεξε η ESA ήταν και το έρεισμα για την συγκεκριμένη διατριβή. Στα επόμενα κεφάλαια, θα χρησιμοποιηθούν και οι δύο αναφερόμενες στοχαστικές μέθοδοι (PSO - GAs) για την εύρεση MDM αλλά και για την μελέτη επιπλέον θεμάτων που προκύπτουν κατά την μελέτη μαγνητικής καθαρότητας.

Αναφορές

- [1] Wright, S. (1932), “The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution”, In Proceedings of the VI international congress of genetics: 1 (p.356-366)

- [2] Σπυρίδων Λυκοθανάσης: “Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές”, Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής Πανεπιστημίου Πατρών
- [3] Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, M.I.T. Press, 1975.
- [4] Kennedy, J.; Eberhart, R., "Particle swarm optimization," in *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on* , vol.4, no., pp.1942-1948 vol.4, Nov/Dec 1995, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968
- [5] Eberhart, R.C.; Yuhui Shi, "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," in *Evolutionary Computation, 2001. Proceedings of the 2001 Congress on* , vol.1, no., pp.81-86 vol. 1, 2001, doi: 10.1109/CEC.2001.934374
- [6] Mehlem, K., “Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 14, No. 5, 1064-1071, Sep. 1978.

Κεφάλαιο 4 - Πρόβλεψη των παραμέτρων μοντέλων πολλαπλών μαγνητικών διπόλων από μετρήσεις του κοντινού μαγνητικού πεδίου με χρήση στοχαστικών αλγορίθμων.

Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται το πρόβλημα της πρόβλεψης μακρινού μαγνητικού πεδίου από μετρήσεις του κοντινού πεδίου μίας συσκευής υπό εξέταση (Equipment Under Test –EUT). Στην αρχή αναπτύσσεται ένα μοντέλο πολλαπλών διπόλων για να εξομοιώσει τη μαγνητική συμπεριφορά του EUT. Οι παράμετροι του μοντέλου (οι θέσεις και οι μαγνητικές ροπές των διπόλων που αποτελούν το μοντέλο) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας της τιμές του κοντινού μαγνητικού πεδίου και εφαρμόζοντας την Particle swarm optimization –PSO μέθοδο βελτιστοποίησης. Για την αξιολόγηση της μεθόδου, έγιναν εκτενείς εξομοιώσεις, παράγοντας θεωρητικές τιμές και διαταράσσοντάς τες με θόρυβο και έπειτα, ο υπό ανάπτυξη αλγόριθμος υπολόγιζε το κατάλληλο μοντέλο. Έπειτα οι τιμές του πεδίου του υπολογιζόμενου μοντέλου συγκρίνονταν με τις αρχικές θεωρητικές.

4.1. Εισαγωγή

Το πρόβλημα της αναζήτησης μαγνητικών πηγών από τοπικά μετρούμενα μαγνητικά πεδία ανήκει στην κατηγορία των αντίστροφων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων και καλύπτει πολλές εφαρμογές [1-5]. Η μαγνητική καθαρότητα είναι καίριας σημασίας στις διαστημικές αποστολές. Ο εξοπλισμός, που είναι τοποθετημένος πάνω στα σκάφη, για τις μετρήσεις μαγνητικών πεδίων λειτουργεί σε ένα μαγνητικό περιβάλλον. Τα πεδία που αφορούν αυτές τις αποστολές είναι πολύ ασθενή και για

αυτό το λόγο τα μαγνητόμετρα πρέπει να είναι τοποθετημένα σε μαγνητικά καθαρά σημεία όπου το πεδίο είναι της τάξεως 0.1-1nT [1].

Για να είναι δυνατό να επιτευχθεί η μαγνητική καθαρότητα θα πρέπει να αναπτυχθούν μέθοδοι που να μπορούν να υπολογίζουν με ακρίβεια τα μοντέλα του εξοπλισμού πάνω στο σκάφος. Τέτοια μοντέλα έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν [1] και βασίζονται στην τεχνική του μοντέλου πολλαπλών μαγνητικών διπόλων multiple magnetic dipole model –MDM. Οι παράμετροι του μοντέλου (θέση και μαγνητική ροπή) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μετρήσεις που γίνονται σε ειδικές εγκαταστάσεις coil facilities [1]. Βασιζόμενοι σε αυτές τις μετρήσεις οι αλγόριθμοι λύνουν το αντίστροφο πρόβλημα [4,6].

Στην παρούσα εργασία, αντί για τους κλασσικούς ντετερμινιστικούς αλγόριθμους, θα χρησιμοποιηθεί η PSO σαν ευρεστική μέθοδος που βασίζεται ο αλγόριθμος έτσι ώστε να παραχθεί ένα σετ μαγνητικών διπόλων το οποίο έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να προβλέψει το μαγνητικό πεδίο ενός EUT.

Για την αξιολόγηση της μεθόδου δημιουργείται ένα θεωρητικό μοντέλο αποτελούμενο από δίπολα τυχαία τοποθετημένα. Από αυτό το μοντέλο προκύπτουν οι θεωρητικές τιμές του πεδίου στις θέσεις μετρήσεων. Οι θέσεις μετρήσεων βρίσκονται συνήθως σε ένα κύκλο γύρω από το EUT.

Έπειτα, οι θεωρητικές τιμές του πεδίου διαταράσσονται με θόρυβο έτσι ώστε να παραχθούν εικονικές μετρήσεις με ένα ορισμένο εξαρχής ποσοστό θορύβου από 1 έως 5%.

Οι εικονικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι θέσεις και οι μαγνητικές ροπές των διπόλων του μοντέλου. Τέλος για την αξιολόγηση της λύσης, χρησιμοποιείται ως κριτήριο το μέσο τετραγωνικό σφάλμα Root Mean Square Error – RMS, ανάμεσα στις τιμές του εικονικού πεδίου και στο παραγόμενο από τον αλγόριθμο.

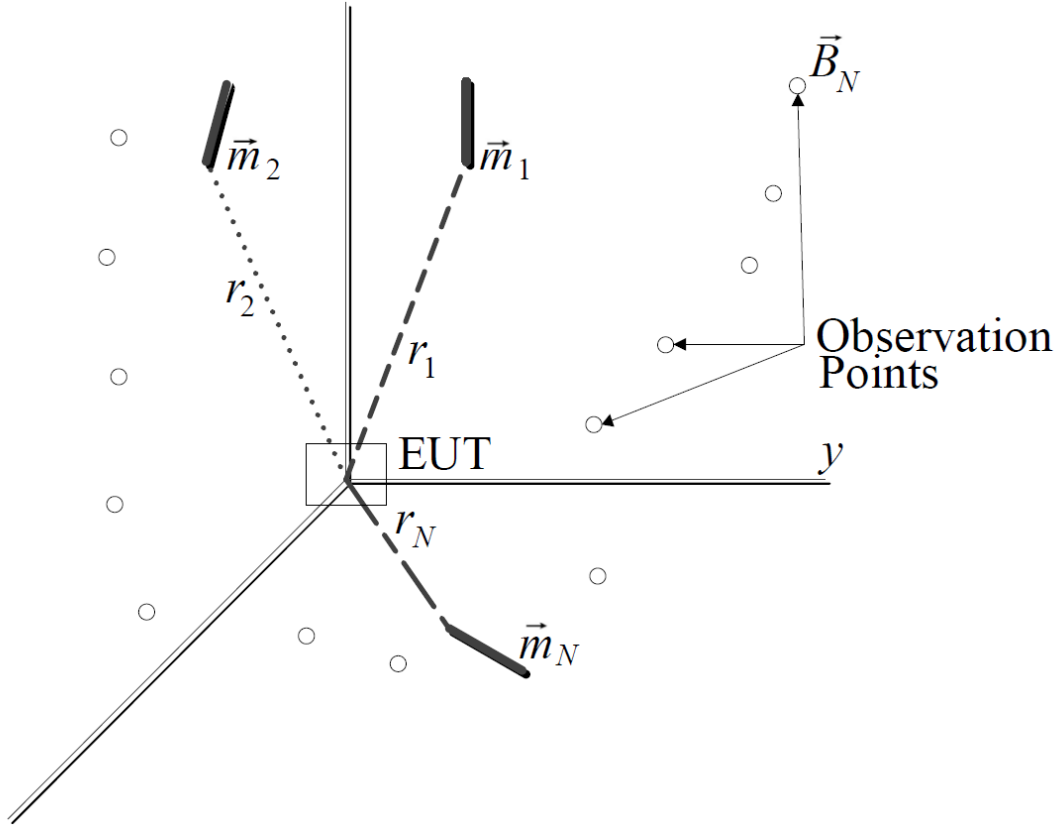
4.2. Μαθηματική ανάλυση του προβλήματος

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4.1) παρουσιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος. Το EUT βρίσκεται στην αρχή των αξόνων. Τα m_i , $i=1,\dots,N$ είναι τα μαγνητικά δίπολα

από τα οποία αποτελείται το ισοδύναμο μοντέλο που θα υπολογίσει ο αλγόριθμος. Οι θέσεις των διπόλων είναι (x_i, y_i, z_i) . η μαγνητική ροπή του κάθε διπόλου είναι:

$$\vec{m}_i = m_{x_i} \cdot \hat{x} + m_{y_i} \cdot \hat{y} + m_{z_i} \cdot \hat{z} \quad (4.1)$$

Τα M σημεία παρατήρησης είναι τοποθετημένα στα σημεία (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) , όπου $j=1, \dots, M$.



Εικόνα 4.1 - Παρουσίαση προβλήματος

Το μαγνητικό πεδίο του διπόλου i στο σημείο παρατήρησης j εκφράζεται ως η υπέρθεση των B_x, B_y, B_z :

$$\vec{B}_{ij} = B_{x_{ij}} \cdot \hat{x} + B_{y_{ij}} \cdot \hat{y} + B_{z_{ij}} \cdot \hat{z} \quad (4.2)$$

Όπου,

$$B_{x_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3 \cdot (x_{0j} - x_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{m_{x_i}}{\rho_{ij}^3}$$

$$B_{y_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3 \cdot (y_{0j} - y_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{m_{y_i}}{\rho_{ij}^3} \quad (4.3)$$

$$B_{z_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3 \cdot (z_{0j} - z_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{m_{z_i}}{\rho_{ij}^3}$$

$$L_{ij} = m_{x_i} \cdot (x_{0j} - x_i) + m_{y_i} \cdot (y_{0j} - y_i) + m_{z_i} \cdot (z_{0j} - z_i) \quad (4.4)$$

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_{0j} - x_i)^2 + (y_{0j} - y_i)^2 + (z_{0j} - z_i)^2} \quad (4.5)$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης j υπολογίζεται:

$$\vec{B}_j = \sum_1^n B_{x_{ij}} \cdot \hat{x} + \sum_1^n B_{y_{ij}} \cdot \hat{y} + \sum_1^n B_{z_{ij}} \cdot \hat{z} \quad (4.6)$$

4.3. Εφαρμογή της PSO στο MDM πρόβλημα

Αρχικά δημιουργείται ένας 3×3 πίνακας \mathbf{TB}_{th} . Τα στοιχεία αυτού του πίνακα περιέχουν τις τιμές του πεδίου στα σημεία παρατήρησης j . Ένας $3 \times M$ πίνακας \mathbf{TB} ορίζεται για να περιλαμβάνει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται σε κάθε γενιά. Καθώς ο αλγόριθμος «ξεδιπλώνεται» κάθε πράκτορας ανανεώνει τη θέση του και η νέα τιμή, που προκύπτει από τη νέα θέση, εφαρμόζεται για να ανανεώσει τον πίνακα \mathbf{TB} χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.2) – (4.6). Οι θέσεις και οι ταχύτητες των πρακτόρων επιλέγονται τυχαία αρχικά. Μετά την αξιολόγηση των $pbest$ και $gbest$ οι θέσεις των σωματιδίων ανανεώνονται σύμφωνα με την (4.8). Η ταχύτητα u_{in} του στοιχείου i του διπόλου n υπολογίζεται:

$$u_{in} = w \cdot u_{in} + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_{in} - p_{in}) + c_2 \cdot rand() \cdot (gbest_{in} - p_{in}) \quad (4.7)$$

Όπου w είναι η κλίμακα της ταχύτητας της προηγούμενης γενιάς και c_1, c_2 είναι οι παράγοντες που καθορίζουν το trade-off ανάμεσα στο να εξερευνηθεί όλος ο χώρος και να εκμεταλλευτούν όλες οι πιθανές βέλτιστες λύσεις. Το p_{in} είναι η θέση του στοιχείου k του διανύσματος του πράκτορα. Στην παρούσα εργασία, έπειτα από εκτενείς δοκιμές, οι επιλεγμένες τιμές των παραπάνω παραμέτρων είναι $c_1 = c_2 = 2$ και $w = 0.5$.

Έπειτα, οι νέες θέσεις υπολογίζονται:

$$p_{in} = p_{in} + u_{in} \quad (4.8)$$

Όσο προχωράει στην εκτέλεση του ο προτεινόμενος αλγόριθμος, οι θέσεις και οι ταχύτητες των σωματιδίων ανανεώνονται και ο πίνακας \mathbf{TB} επικαιροποιείται. Αναλόγως, ένας $3 \times M$ πίνακας \mathbf{TBg} περιέχει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το $gbest$ και ένας $3 \times M$ πίνακας \mathbf{TBp} περιέχει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το $pbest$.

Για την αξιολόγηση κάθε λύσης χρησιμοποιείται το RMS σαν αντικειμενική συνάρτηση και ορίζεται ακολούθως:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (TB_{ij} - TB_{thij})^2}{N}} \quad (4.9)$$

Προφανώς, εάν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της τρέχουσας λύσης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του $rbest$ τότε το $rbest$ αντικαθίσταται από την τρέχουσα λύση.

4.4. Αριθμητικά αποτελέσματα

Για να γίνει έλεγχος της αποδοτικότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε ένα σετ αποτελούμενο από N δίπολα για να δημιουργηθεί το μαγνητικό πεδίο σε διάφορα σημεία βασιζόμενο στις εξισώσεις (4.2) – (4.6). Αυτό το μαγνητικό πεδίο εικονικών μετρήσεων περιλαμβάνεται στον πίνακα **TBth**. Σε κάθε γενιά, αυτές οι εικονικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των θέσεων και των μαγνητικών ροπών των διπόλων που αποτελούν το μοντέλο (οι οποίες θα αναφέρονται ως παράμετροι του μοντέλου). Οι παράμετροι του μοντέλου έπειτα χρησιμοποιούνται για να ανανεώσουν τον πίνακα **TB** με σκοπό την εξίσωση των στοιχείων του **TB** με τα στοιχεία του **TBth**.

4.4.1 Ένα δίπολο

Αρχικά, οι εικονικές μετρήσεις (**TBth**) δημιουργήθηκαν από ένα δίπολο σε 36 σημεία παρατήρησης:

$$(x=-0.03, y=0.05, z=-4.05, m_x=452.34, m_y=-484.63, m_z=-550.47)$$

Οι θέσεις είναι σε εκατοστά (cm) και οι μαγνητικές ροπές σε $\text{mA}\cdot\text{m}^2$. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της F συνέκλινε στο MDM:

$$D_1 = (-0.03, 0.05, -4.0499, 452.3406, -484.627, -550.471)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο αλγόριθμος κατάφερε να υπολογίσει τις θεωρητικές τιμές των παραμέτρων με ακρίβεια.

Για να αξιολογηθεί η ικανότητα του αλγορίθμου να βρει το σωστό MDM ακόμα και σε περιπτώσεις που στις μετρήσεις υπάρχει θόρυβος, κάθε στοιχείο του πίνακα **TBth** αλλοιώθηκε με χρήση ομοιόμορφης κατανομής:

$$TBth_{ij} = TBth_{ij} + TBth_{ij} \cdot (a \cdot rand() - a \cdot rand()) \quad (4.10)$$

Όπου a είναι το επίπεδο της μέγιστης παραμόρφωσης των εικονικών μετρήσεων. Ο αλγόριθμος ελέγχθηκε για δύο επίπεδα παραμόρφωσης, $\alpha=1$ και 5%. Οι παράμετροι του θεωρητικού μοντέλου και των εξαγόμενων MDM παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

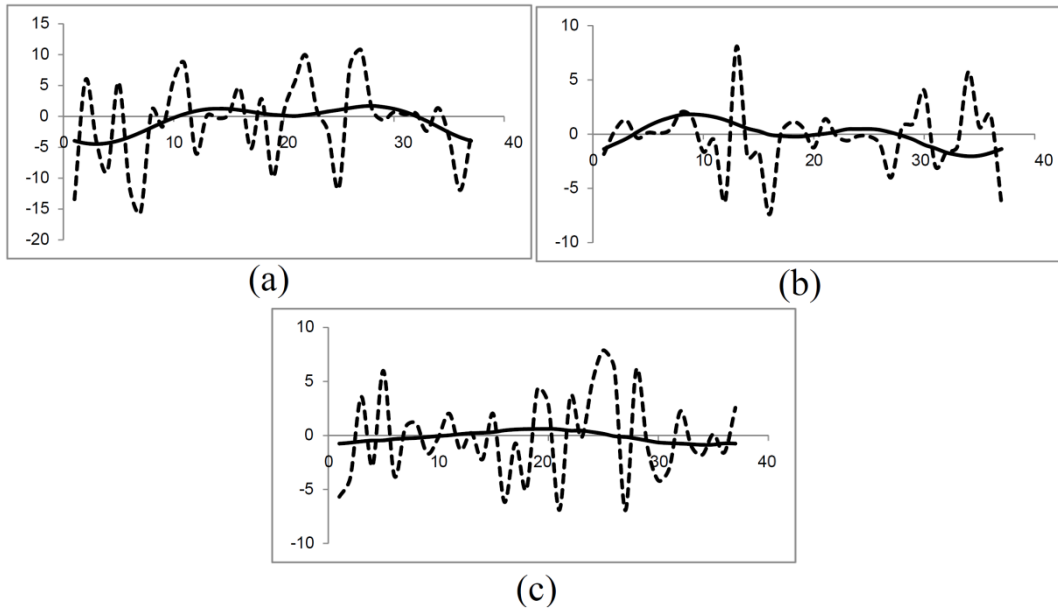
Πίνακας 4.1 - Παρουσίαση MDM για επίπεδο μέγιστης διαταραχής 1 και 5 %

	Θεωρητικό	MDM 1%	MDM 5%
$x (cm)$	-0.03	-0.0158	-0.0146
$y (cm)$	0.05	0.0495	-0.0502
$z (cm)$	-4.05	-4.0476	-3.9933
$m_x (mA\cdot m^2)$	452.34	452.9344	450.8042
$m_y (mA\cdot m^2)$	-484.63	-485.013	-483.137
$m_z (mA\cdot m^2)$	-550.47	-550.608	-549.991

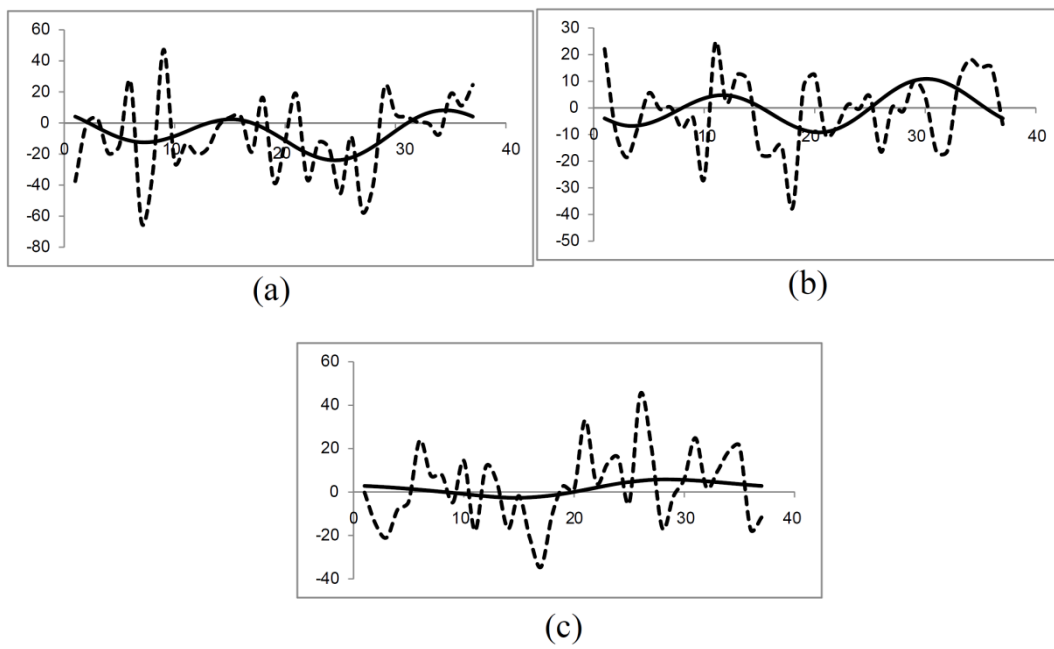
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.1, όσο αυξάνει το επίπεδο της παραμόρφωσης αυξάνει και η απόκλιση από το θεωρητικό μοντέλο στο προβλεπόμενο MDM. Παρόλα αυτά ο προτεινόμενος αλγόριθμος «διορθώνει» τις επιπτώσεις του θορύβου στο συνολικό μαγνητικό πεδίο.

Οι διαφορές μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και των δύο παραγόμενων (για τα δύο διαφορετικά επίπεδα διαταραχής) από τον αλγόριθμο MDM (ανά συνιστώσα) φαίνονται στις παρακάτω Εικόνες 4.2 και 4.3.

Με διακεκομμένη μαύρη γραμμή παρουσιάζονται οι διαφορές του θεωρητικού πεδίου με το διαταραγμένο ενώ με συνεχή μαύρη γραμμή παρουσιάζονται οι διαφορές του θεωρητικού πεδίου με το παραγόμενο από τα MDM που βρήκε ο αλγόριθμος.



Εικόνα 4.2 - Διαφορές θεωρητικού και MDM πεδίου για $\alpha=1\%$. (a) x συνιστώσα, (b) y συνιστώσα, (c) z συνιστώσα



Εικόνα 4.3 - Διαφορές θεωρητικού και MDM πεδίου για $\alpha=5\%$. (a) x συνιστώσα, (b) y συνιστώσα, (c) z συνιστώσα

4.4.2 Τρία δίπολα

Στη συνέχεια, η επίδοση του αλγορίθμου αξιολογείται για πιο απαιτητικά EUT.

Το σετ αυτή τη φορά αποτελείται από 3 δίπολα και το πεδίο που παράγεται περιλαμβάνεται στον πίνακα **TBth**. Οι παράμετροι του θεωρητικού μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 - Παράμετροι του θεωρητικού μοντέλου τριών διπόλων

	Θεωρητικό μοντέλο		
	Δίπολο 1	Δίπολο 2	Δίπολο 3
x (cm)	0.3	1	1.4
y (cm)	1.1	0.5	2
z (cm)	1.6	1.8	0.5
m_x (mA m^2)	400	-500	600
m_y (mA m^2)	-400	500	-600
m_z (mA m^2)	450	-550	450

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (4.2) – (4.6), από ένα σημείο παρατήρησης προκύπτουν 3 ανεξάρτητες εξισώσεις. Επίσης οι παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν για κάθε δίπολο είναι 6 (3 για την θέση και 3 για τη μαγνητική ροπή). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για κάθε δίπολο χρειάζονται τουλάχιστον 2 σημεία παρατήρησης για να είναι επαρκώς ορισμένο το πρόβλημα και να μπορεί να λυθεί. Στην περίπτωση του σετ 3 διπόλων λοιπόν χρειάζονται τουλάχιστον 6 σημεία παρατήρησης. Επιπλέον, τα σημεία αυτά θα πρέπει να οδηγούν σε ανεξάρτητες εξισώσεις αναφορικά με τις παραμέτρους προς εκτίμηση.

Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα σημεία επιλέχθηκαν να είναι τοποθετημένα πάνω σε ένα κύκλο κατά προτίμηση με κάποια συμμετρία. Τα σημεία που επιλέχθηκαν είναι: (20, 0, 0), (0, 20, 0), (0, 0, 20), (15, 15, 0), (15, 0, 15) και (0, 15, 15) cm. Τα αποτελέσματα της πρόβλεψης από τον αλγόριθμο παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, παρατηρώντας τις ελάχιστες αποκλίσεις από τις θέσεις των διπόλων, ο αλγόριθμος προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια το θεωρητικό σετ διπόλων.

Πίνακας 4.3 - Παράμετροι του MDM τριών διπόλων που υπολόγισε ο αλγόριθμος

	MDM		
	Δίπολο 1	Δίπολο 2	Δίπολο 3
$x (cm)$	0.2487	1.0171	1.4131
$y (cm)$	1.2204	0.5908	1.9635
$z (cm)$	1.6019	1.7444	0.5067
$m_x (mam^2)$	374.1063	-494.799	619.9692
$m_y (mam^2)$	-392.608	512.5497	-619.298
$m_z (mam^2)$	429.4842	-554.979	474.9911

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται 3 διαφορετικά μοντέλα MDM για 3 τιμές αντικειμενικής συνάρτησης, μία καλή, μία μέτρια και μία κακή. Όπως ήταν αναμενόμενο, όσο αυξάνει η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης τόσο μειώνεται η ακρίβεια του προβλεπόμενου μοντέλου.

4.5. Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια στοχαστική μέθοδος (PSO) για τη δημιουργία ενός MDM με ακρίβεια. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου, η μέθοδος είναι βασισμένη σε μετρήσεις κοντινού πεδίου και επιπλέον στις θέσεις παρατήρησής του. Για τον έλεγχο της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν εικονικές μετρήσεις που προήλθαν από τον θεωρητικό υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στις θέσεις παρατήρησης με χρήση των εξισώσεων (4.2) – (4.6) και έπειτα διατάραξη των τιμών για την προσθήκη θορύβου (όπως θα συνέβαινε και σε πραγματικές μετρήσεις). Με την εφαρμογή του αλγορίθμου ήταν δυνατόν να βρεθούν μοντέλα από EUT 1 και 3 διπόλων με μεγάλη ακρίβεια ακόμα και με παρουσία θορύβου μειώνοντας και τις επιπτώσεις του θορύβου.

Πίνακας 4.4 - Τρία διαφορετικά MDM για διαφορετικές τιμές αντικειμενικής συνάρτησης (καλή, μέτρια, κακή)

Αντικειμενική συνάρτηση (rms)	5.6667 (καλή)		
	Δίπολο 1	Δίπολο 2	Δίπολο 3
$x (cm)$	0.2487	1.0171	1.4131
$y (cm)$	1.2204	0.5908	1.9635
$z (cm)$	1.6019	1.7444	0.5067
$m_x (mam^2)$	374.106	-494.8	619.969
$m_y (mam^2)$	-392.61	512.55	-619.3
$m_z (mam^2)$	429.484	-554.98	474.991
Αντικειμενική συνάρτηση (rms)	26.5556 (μέτρια)		
	Δίπολο 1	Δίπολο 2	Δίπολο 3
$x (cm)$	0.5495	1.3353	1.5443
$y (cm)$	1.5492	0.532	1.7487
$z (cm)$	1.2256	1.6128	0.561
$m_x (mam^2)$	402.338	-498.13	593.288
$m_y (mam^2)$	-413.97	481.764	-569.15
$m_z (mam^2)$	426.542	-512.79	436.88
Αντικειμενική συνάρτηση (rms)	49.3333 (κακή)		
	Δίπολο 1	Δίπολο 2	Δίπολο 3
$x (cm)$	1.8863	1.8044	1.0036
$y (cm)$	-0.2348	-0.4224	2.1399
$z (cm)$	0.2558	1.0537	0.5857
$m_x (mam^2)$	400.917	-496.6	585.527
$m_y (mam^2)$	-355.01	475.602	-623.26
$m_z (mam^2)$	454.146	-537.38	441.947

Αναφορές

- [1] Mehlem, K., “Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites” IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 14, No. 5, 1064-1071, Sep. 1978.

- [2] Nara, T., S. Suzuki, and S. Ando, "A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, 3291-3293, Oct. 2006.
- [3] Song, H., J. Chen, D. Zhou, D. Hou, and J. Lin, "An equivalent model of magnetic dipole for the slot coupling of shielding cavity", 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE 2008, 970-973, Nov. 2, 5, 2008.
- [4] Junge, A. and F. Marliani, "Prediction of DC magnetic fields for magnetic cleanliness on spacecraft", 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 834-839, Aug. 14, 19, 2011.
- [5] Endo, H., T. Takagi, and Y. Saito, "A new current dipole model satisfying current continuity for inverse magnetic field source problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 5, 1748-1751, May 2005.
- [6] Mehlem, K. and A. Wiegand, "Magnetostatic cleanliness of spacecraft", 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 936-944, Apr. 12, 16, 2010.

Κεφάλαιο 5 - Τεχνική βαθμονόμησης (calibration) βασισμένη σε αλγόριθμο για μετρητικές εγκαταστάσεις καθορισμού της μαγνητικής υπογραφής ενός EUT

Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μία αλγοριθμική στοχαστική προσέγγιση για βαθμονόμηση των θέσεων των μαγνητομέτρων σε μία εγκατάσταση. Η επίδοση του αλγορίθμου δοκιμάστηκε με προσομοιώσεις και στη συνέχεια ελέγχθηκε με πραγματικές μετρήσεις σε μία εγκατάσταση με δύο μαγνητόμετρα. Τα αποτελέσματα επικυρώνουν την ικανότητα του αλγορίθμου να υπολογίζει τις ακριβείς θέσεις των μαγνητομέτρων προσφέροντας στην πρόβλεψη του MDM και, κατά συνέπεια, στην παρέκταση του μαγνητικού πεδίου, μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό τονίζεται η σημασία της βαθμονόμησης των θέσεων παρατήρησης σε εφαρμογές που στοχεύουν σε μαγνητικά καθαρό περιβάλλον όπως για παράδειγμα οι διαστημικές αποστολές.

5.1. Εισαγωγή

Η πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς τοπικών μαγνητικών πηγών από κοντινές μετρήσεις ανήκει στην κατηγορία των αντίστροφων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων και απευθύνεται σε πολλές επιστημονικές εφαρμογές [1-5]. Συγκεκριμένα, η μαγνητική καθαρότητα σε διαστημικές αποστολές είναι μία περίπτωση που απαιτεί τον καθορισμό της μαγνητικής υπογραφής του σκάφους.

Επερχόμενες διαστημικές αποστολές στοχεύουν σε μετρήσεις πολύ αδύναμων μαγνητικών πεδίων από πλανητικά αντικείμενα, όπως επίσης τις δυναμικές επιδράσεις πάνω σε δοκιμαστικές μάζες[6-7]. Έτσι λοιπόν, μία βασική απαίτηση για τον μετρητικό εξοπλισμό (μαγνητόμετρα) που βρίσκονται επάνω στο σκάφος είναι να λειτουργούν σε ένα μαγνητικά καθαρό περιβάλλον στο οποίο το συνολικό πεδίο λόγω του σκάφους να βρίσκεται στο διάστημα $[0.1, 1]$ nT [1].

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο παράγεται κυρίως από τον εξοπλισμό του σκάφους. Μακροσκοπικά, η μόλυνση των μετρήσεων των μαγνητικών πεδίων προκαλείται από την υπέρθεση όλων των μαγνητικών πηγών (εξοπλισμός) και κατά συνέπεια η μελέτη των μαγνητικών υπογραφών αυτών των πηγών είναι απαραίτητη. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις για την επίτευξη μαγνητικά καθαρών σημείων[8-15]. Η επικρατέστερη προσέγγιση περιλαμβάνει την παραγωγή MDM για κάθε κομμάτι του εξοπλισμού με σκοπό την προσομοίωση της μαγνητικής συμπεριφοράς του. Οι παράμετροι του MDM ενός EUT μπορούν να καθοριστούν από κοντινές μετρήσεις του μαγνητικού του πεδίου εφαρμόζοντας είτε ντετερμινιστικές [1-5] είτε στοχαστικές [12-14] μεθόδους. Η MDM τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα σε πολλά επιστημονικά πεδία [16-18].

Όπως αναφέρεται και στο [12] (κεφάλαιο 4), οι παράμετροι του MDM (θέσεις και μαγνητικές ροπές των διπόλων) μπορούν να υπολογιστούν εφαρμόζοντας την Particle Swarm Optimization PSO τεχνική χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του κοντινού πεδίου σε συγκεκριμένες θέσεις. Αυτές οι μετρήσεις, καθώς και οι θέσεις των σημείων παρατήρησης πρέπει να είναι ακριβείς για να προκύψει ακριβές MDM. Επιπλέον, σε όρους αβεβαιότητας, η σχετική απόσταση μεταξύ των σημείων παρατήρησης και του EUT είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες στην συνολική αβεβαιότητα της MDM τεχνικής.

Γίνεται πλέον αντιληπτό ότι, οι θέσεις των μαγνητομέτρων πρέπει να είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την βαθμονόμηση της εγκατάστασης πριν από την διαδικασία μετρήσεων. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές βαθμονόμησης θέσης όπως με λέιζερ ή κάμερες [19].

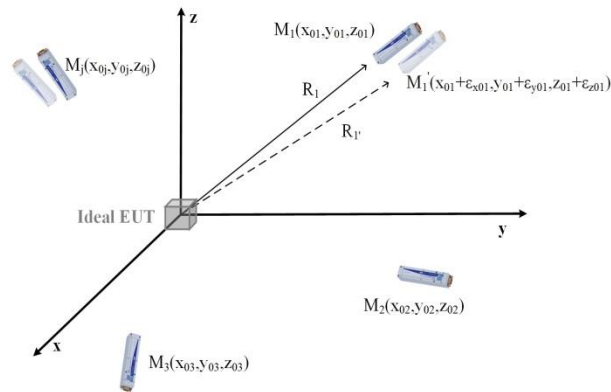
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία αλγοριθμική μέθοδος βαθμονόμησης των θέσεων των σημείων παρατήρησης σε μία εγκατάσταση που βασίζεται στην PSO τεχνική. Για την αξιολόγηση της μεθόδου, τα MDM και τα RMS σφάλματα των μη-

βαθμονομημένων και βαθμονομημένων προβλέψεων λαμβάνονται υπόψη χρησιμοποιώντας πραγματικές μετρήσεις. Ένα πηνίο τροφοδοτούμενο με συνεχές ρεύμα και δύο μαγνητόμετρα χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις.

5.2. Ανάλυση της μεθόδου βαθμονόμησης

5.2.1 Μαθηματικό υπόβαθρο και περιγραφή αλγορίθμου

Για την βαθμονόμηση κάθε εγκατάστασης είναι απαραίτητη η ύπαρξη μίας ιδανικής πηγής πχ. πηνίο ή μαγνήτης (ή τουλάχιστον μίας πηγής της οποίας τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά με ακρίβεια). Πιο συγκεκριμένα, η μαγνητική συμπεριφορά της πηγής πρέπει να είναι σταθερή και η θέση της να είναι καθορισμένη με ακρίβεια ως προς ένα σημείο αναφοράς (συνήθως το κέντρο του τραπεζιού που τοποθετείται). Στην Εικόνα 5.1 η πηγή είναι τοποθετημένη στην αρχή των αξόνων. Επιπλέον, διάφορα μαγνητόμετρα M_j είναι τοποθετημένα στα $(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), j = 1, \dots, M$. Οι θέσεις των σημείων παρατήρησης υποτίθεται ότι είναι γνωστές, σύμφωνα με τον χρήστη, και η περιορισμένη ακρίβεια βασίζεται στην μηχανολογική κατασκευή της εγκατάστασης.



Εικόνα 5.1 - Παρουσίαση του προβλήματος

Στην πραγματικότητα η ακριβείς θέσεις των μαγνητομέτρων αποκλίνουν από τα (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) κατά ϵ :

$$\begin{cases} x'_{0j} = x_{0j} + \epsilon_{x_{0j}} \\ y'_{0j} = y_{0j} + \epsilon_{y_{0j}} \\ z'_{0j} = z_{0j} + \epsilon_{z_{0j}} \end{cases} \quad (5.1)$$

Χρησιμοποιώντας την εγκατάσταση της Εικόνας 5.1, οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου που παράγει η πηγή μπορούν να μετρηθούν στη θέση $(x'_{0j}, y'_{0j}, z'_{0j})$ του j-οστού μαγνητομέτρου.

Το μαγνητικό πεδίο της πηγής στις ακριβείς θέσεις $(x'_{0j}, y'_{0j}, z'_{0j})$ για κάθε μαγνητόμετρο μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τον τύπο:

$$\vec{B}_{d_j} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left[\frac{3(\vec{m}_d \cdot \hat{\rho}_{d_j})\hat{\rho}_{d_j}}{\rho_{d_j}^3} - \frac{\vec{m}_d}{\rho_{d_j}^3} \right] \quad (5.2)$$

όπου, $\vec{m}_d = m_{x_d} \cdot \hat{x} + m_{y_d} \cdot \hat{y} + m_{z_d} \cdot \hat{z}$ και (x_d, y_d, z_d) είναι η μαγνητική ροπή και η θέση της πηγής αντίστοιχα και

$$\rho_{d_j} = \sqrt{(x'_{0j} - x_d)^2 + (y'_{0j} - y_d)^2 + (z'_{0j} - z_d)^2} \quad (5.3)$$

είναι η απόσταση της πηγής από τις πραγματικές θέσεις $(x'_{0j}, y'_{0j}, z'_{0j})$ των σημείων παρατήρησης.

Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν για κάθε μαγνητόμετρο είναι 3, δηλαδή, οι συνιστώσες της θέσης του $(x'_{0j}, y'_{0j}, z'_{0j})$. Αυτό γίνεται με εφαρμογή της PSO (παρόμοια με το κεφάλαιο 4 [12]). Οι θέσεις κάθε μαγνητομέτρου επιλέγεται αρχικά τυχαία. Έπειτα από την εφαρμογή της εξίσωσης (5.2) χρησιμοποιώντας τις θέσεις που αναφέρθηκαν και τα χαρακτηριστικά της ιδανικής πηγής υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης j $(B_{x_j}, B_{y_j}, B_{z_j})$. Ένας 3xM πίνακας **B** περιλαμβάνει τις τιμές του πεδίου που παράγονται σε κάθε γενιά. Έπειτα από την αξιολόγηση των pbest, gbest οι ταχύτητες των σωματιδίων ανανεώνονται σύμφωνα με τη σχέση (5.4) [20]:

$$u_{i,n} = w \cdot u_{i,n} + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_{i,n} - p_{i,n}) + c_2 \cdot rand() \cdot (gbest_{i,n} - p_{i,n}) \quad (5.4)$$

όπου, w είναι το βάρος της ταχύτητας της προηγούμενης γενιάς και c_1, c_2 είναι σταθερές που καθορίζουν το trade-off μεταξύ της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης λύσεων και της εκμετάλλευσης των πιθανών λύσεων. Τέλος $p_{i,n}$ είναι η θέση του στοιχείου i του σωματιδίου n, $i=1,2,3$. Στην παρούσα εργασία $c_1 = c_2 = 2$ και $w = 0.5$.

Έπειτα οι νέες θέσεις των σωματιδίων υπολογίζονται:

$$p_{i,n} = p_{i,n} + u_{i,n} \quad (5.5)$$

Καθώς ο αλγόριθμος προχωράει, κάθε σωματίδιο ανανεώνει την θέση και την ταχύτητα του και η εξίσωση (5.2) ανανεώνει τον πίνακα \mathbf{B} με τις νέες τιμές. Δύο πίνακες $3 \times M$ \mathbf{B}_p και \mathbf{B}_g χρησιμοποιούνται για να συμπεριλάβουν τις τιμές των πεδίων των p_{best} και g_{best} αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$F = \sum_{i=1}^3 (B g_i - B m_i)^2 \quad (5.6)$$

όπου το i αντιστοιχεί στα x , y , z . Ο αλγόριθμος σταματάει όταν η F γίνει ελάχιστη (ιδανικά 0) ή καλυφτεί το όριο γενεών και δουλεύει για κάθε μαγνητόμετρο ξεχωριστά. Το αποτέλεσμα είναι οι πραγματικές θέσεις $(x'_{0j}, y'_{0j}, z'_{0j})$ κάθε μαγνητομέτρου.

5.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Αρχικά τα μαγνητόμετρα μετατοπίζονται τυχαία από τις θεωρητικές θέσεις (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) , τις οποίες βλέπει ο χρήστης, με μέγιστο 1 cm για να προσομοιωθεί η πραγματική θέση του κάθε μαγνητομέτρου:

$$\begin{cases} x'_{0j} = x_{0j} + (rand - rand) \cdot 1 \\ y'_{0j} = y_{0j} + (rand - rand) \cdot 1 \\ z'_{0j} = z_{0j} + (rand - rand) \cdot 1 \end{cases} \quad (5.7)$$

Έπειτα, το μαγνητικό πεδίο από το ιδανικό πηνίο υπολογίζεται στις πραγματικές θέσεις $(x'_{0j}, y'_{0j}, z'_{0j})$ των μαγνητομέτρων από την εξίσωση (5.2). Επιπλέον, για να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα στην διαδικασία της μέτρησης, το μαγνητικό πεδίο διαταράσσεται για να παραχθούν εικονικές μετρήσεις. Οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου διαταράσσονται κατά μέγιστο q σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\begin{cases} B_{dx_j} = B_{dx_j} + (q \cdot rand - q \cdot rand) \cdot B_{dx_j} \\ B_{dy_j} = B_{dy_j} + (q \cdot rand - q \cdot rand) \cdot B_{dy_j} \\ B_{dz_j} = B_{dz_j} + (q \cdot rand - q \cdot rand) \cdot B_{dz_j} \end{cases} \quad (5.8)$$

όπου, q είναι το μέγιστο ποσοστό διαταραχής και η συνάρτηση $rand$ παίρνει τιμές μεταξύ $[0, 1]$ ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η αβεβαιότητα σχετικά με τις παραμέτρους της ιδανικής πηγής δεν υφίσταται και επιπλέον, η αβεβαιότητα λόγω των θέσεων των μαγνητομέτρων έχει συμπεριληφθεί από την εξίσωση (5.7), ένα ποσοστό μέγιστης διαταραχής της τάξεως του 2%

φαίνεται σαν λογική επιλογή. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου που αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές μετρήσεις τοποθετούνται σε ένα πίνακα $3 \times M \mathbf{TB}_m$.

Ο αλγόριθμος δέχεται σαν εισόδους τα ακόλουθα:

- Την θέση του EUT (x, y, z)
- Την μαγνητική ροπή του EUT (m_x, m_y, m_z)
- Τις θέσεις των μαγνητομέτρων όπως τις βλέπει ο χρήστης (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), $j = 1, \dots, M$
- Τις διαταραγμένες τιμές του μαγνητικού πεδίου στις πραγματικές θέσεις των σημείων παρατήρησης δηλαδή τον πίνακα \mathbf{TB}_m

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μίας διάταξης $M=12$ μαγνητομέτρων. Η στήλη (α) περιλαμβάνει τις θέσεις που βλέπει ο χρήστης, η στήλη (β) περιλαμβάνει τις πραγματικές θέσεις που προέκυψαν από την διαταραχή (εξίσωση (7)) και η στήλη (γ) περιλαμβάνει τις θέσεις που υπολόγισε ο αλγόριθμος. Στις δύο επόμενες στήλες υπολογίζονται οι απόλυτες διαφορές μεταξύ της πραγματικής θέσης και της θέσης που προέκυψε από τον αλγόριθμο και οι απόλυτες διαφορές μεταξύ της πραγματικής θέσης και της θέσης που βλέπει ο χρήστης αντίστοιχα. Στην τελευταία στήλη, εάν η διαφορά της πρόβλεψης από την πραγματική είναι μικρότερη από την διαφορά της θέσης που βλέπει ο χρήστης από την πραγματική αναγράφεται OK ενώ, αν ισχύει το αντίθετο αναγράφεται NOT OK.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.1 ο αλγόριθμος δίνει θέσεις μαγνητομέτρων πολύ πιο κοντά στις πραγματικές από τις θέσεις που βλέπει ο χρήστης στις περισσότερες περιπτώσεις.

Πίνακας 5.1 - Αποτελέσματα προσομοίωσης

#M		Χρήστης (α)	Πραγματική (β)	Αλγόριθμος (γ)	$ \beta-\gamma $	$ \beta-\alpha $	Αξιολόγηση
1	x (cm)	20	20.0463	20.0898	0.0435	0.0463	OK
	y (cm)	0	-0.3727	-0.3568	0.0159	0.3727	OK
	z (cm)	-10	-10.5195	-10.5436	0.0241	0.5195	OK
2	x (cm)	17.3205	17.4769	17.4739	0.003	0.1564	OK
	y (cm)	10	10.2956	10.3982	0.1026	0.2956	OK
	z (cm)	10	9.3637	9.3879	0.0242	0.6363	OK
3	x (cm)	10	10.2565	10.169	0.0875	0.2565	OK
	y (cm)	17.3205	17.2666	17.2591	0.0075	0.0539	OK
	z (cm)	-10	-9.7852	-9.7542	0.031	0.2148	OK

4	<i>x (cm)</i>	0	0.7954	0.8156	0.0202	0.7954	OK
	<i>y (cm)</i>	20	20.3611	20.2919	0.0692	0.3611	OK
	<i>z (cm)</i>	10	9.4236	9.447	0.0234	0.5764	OK
5	<i>x (cm)</i>	-10	-10.0425	-10.0012	0.0413	0.0425	OK
	<i>y (cm)</i>	17.3205	17.2359	17.2849	0.049	0.0846	OK
	<i>z (cm)</i>	-10	-10.4645	-10.4628	0.0017	0.4645	OK
6	<i>x (cm)</i>	-17.3205	-17.1649	-17.196	0.0311	0.1556	OK
	<i>y (cm)</i>	10	9.4517	9.3579	0.0938	0.5483	OK
	<i>z (cm)</i>	10	10.1679	10.1527	0.0152	0.1679	OK
7	<i>x (cm)</i>	-20	-20.0738	-19.9764	0.0974	0.0738	NOT OK
	<i>y (cm)</i>	0	-0.7747	-0.7376	0.0371	0.7747	OK
	<i>z (cm)</i>	-10	-9.9926	-10.0036	0.011	0.0074	NOT OK
8	<i>x (cm)</i>	-17.3205	-16.9963	-17.0028	0.0065	0.3242	OK
	<i>y (cm)</i>	-10	-10.0979	-10.0256	0.0723	0.0979	OK
	<i>z (cm)</i>	10	10.6297	10.5991	0.0306	0.6297	OK
9	<i>x (cm)</i>	-10	-9.7375	-9.8721	0.1346	0.2625	OK
	<i>y (cm)</i>	-17.3205	-17.2478	-17.2133	0.0345	0.0727	OK
	<i>z (cm)</i>	-10	-10.0044	-10.0479	0.0435	0.0044	NOT OK
10	<i>x (cm)</i>	0	-0.1039	-0.083	0.0209	0.1039	OK
	<i>y (cm)</i>	-20	-20.4224	-20.3888	0.0336	0.4224	OK
	<i>z (cm)</i>	10	9.65	9.7325	0.0825	0.35	OK
11	<i>x (cm)</i>	10	10.1631	10.135	0.0281	0.1631	OK
	<i>y (cm)</i>	-17.3205	-17.8406	-17.8706	0.03	0.5201	OK
	<i>z (cm)</i>	-10	-9.3912	-9.3393	0.0519	0.6088	OK
12	<i>x (cm)</i>	17.3205	17.0886	17.1246	0.036	0.2319	OK
	<i>y (cm)</i>	-10	-9.8809	-9.9257	0.0448	0.1191	OK
	<i>z (cm)</i>	10	9.6394	9.5651	0.0743	0.3606	OK

5.3. Διαδικασία βαθμονόμησης σε πραγματικές εφαρμογές

A. Βήμα 1

Το EUT θα πρέπει να είναι μία γνωστή με ακρίβεια μαγνητική πηγή, κατά προτίμηση ένα πηνίο τροφοδοτούμενο από σταθερό ρεύμα. Τα χαρακτηριστικά του είναι: (i) Κυκλικό σχήμα, (ii) Διάμετρος D , (iii) Αριθμός περιελίξεων N και

(iv) Το ρεύμα I . Με γνωστά τα παραπάνω χαρακτηριστικά υπολογίζεται η μαγνητική ροπή αυτής της πηγής σύμφωνα με τον τύπο:

$$m = N \cdot I \cdot A \quad (5.9)$$

όπου, $A = \pi \cdot (D/2)^2$ είναι η επιφάνεια που περιέχει το πηνίο. Το πηνίο τοποθετείται σε συγκεκριμένη θέση (x, y, z) στην διάταξη.

B. Βήμα 2

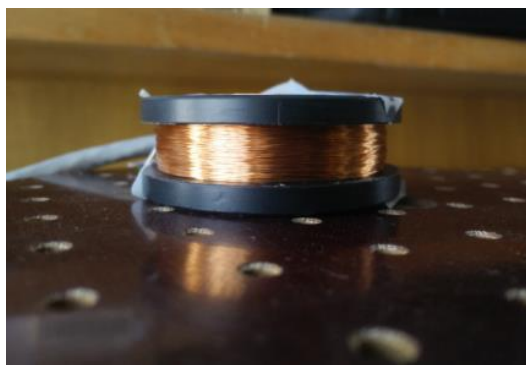
Αφού τοποθετηθεί το EUT, η μαγνητική υπογραφή του μετράται και τοποθετείται στον πίνακα \mathbf{TB}_m . Οι θέσεις των μαγνητομέτρων (x_0, y_0, z_0) καθορίζονται από τον χρήστη.

Γ. Βήμα 3

Οι παράμετροι του EUT (θέση και μαγνητική ροπή), ο πίνακας \mathbf{TB}_m και οι θέσεις (x_0, y_0, z_0) εισάγονται στον αλγόριθμο όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως. Ο αλγόριθμος εξάγει την προβλεπόμενη θέση για κάθε μαγνητόμετρο.

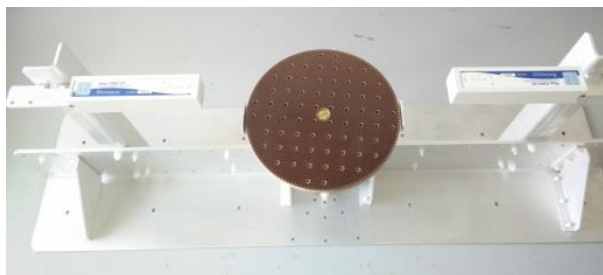
5.4. Επαλήθευση της μεθόδου με πραγματικές μετρήσεις

Η κατασκευή ιδανικού πηνίου είναι μία πολύ σύνθετη διαδικασία λόγω των πολλών παραγόντων (ρεύμα, αντίσταση, θερμοκρασία κλπ) που μπορούν να οδηγήσουν σε ασταθή μαγνητική συμπεριφορά. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας χρησιμοποιήθηκε ένα πηνίο που δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ιδανικό. Τα χαρακτηριστικά του είναι (i) Κυκλικό σχήμα, (ii) Διάμετρος $D=50$ mm, (iii) Αριθμός περιελίξεων $N=295$ (+/- 2%) και (iv) Το ρεύμα $I=35$ mA. Το πηνίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 - Πηνίο

Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου μετρήθηκε 5 φορές σε μία εγκατάσταση με $M=2$ μαγνητόμετρα όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3 - Διάταξη μετρήσεων με δύο μαγνητόμετρα

Οι θέσεις των μαγνητομέτρων όπως μετρήθηκαν είναι $(14.4, 0, 7)$ cm και $(-14.4, 0, 8)$ cm με σημείο αναφοράς το κέντρο του τραπεζιού. Ο αλγόριθμος PSO [12] του κεφαλαίου 4 χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν οι παράμετροι του MDM για κάθε μέτρηση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 - MDM από τις 5 μετρήσεις

	#1	#2	#3	#4	#5
x (cm)	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2
y (cm)	-1.3	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
z (cm)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
m_x (mAm^2)	-1.187	-1.242	-1.18	-1.194	-1.176
m_y (mAm^2)	0.249	0.216	0.299	0.232	0.301
m_z (mAm^2)	-19.454	-19.377	-19.393	-19.406	-19.382
$ m /(mAm^2)$	19.492	19.418	19.431	19.444	19.42

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5.2, τα MDM είναι παρόμοια. Το μαγνητικό πεδίο της #5 μέτρησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.3

Πίνακας 5.3 - Τιμές μαγνητικού πεδίου

#5	Μαγνητόμετρο1	Μαγνητόμετρο2
B_x (nT)	-533.5	193.1
B_y (nT)	-35.6	-10.7
B_z (nT)	309.6	200.4

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βαθμονόμησης με παραμέτρους EUT την στήλη #5 του Πίνακα 5.2, και \mathbf{TB}_m τον Πίνακα 5.3 οι προβλεπόμενες θέσεις που προκύπτουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4 - Βαθμονομημένες θέσεις

#5	Μαγνητόμετρο1	Μαγνητόμετρο2
$x_0 (cm)$	14.4159	-14.4296
$y_0 (cm)$	0.0299	0.01
$z_0 (cm)$	7.0073	8.0001

Για να καθοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι παράμετροι του EUT το MDM υπολογίζεται εκ νέου με τις βαθμονομημένες θέσεις και το αποτέλεσμα φαίνεται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5 - Ιδανικό EUT

$x (cm)$	2.1672
$y (cm)$	-1.1695
$z (cm)$	1.371
$m_x (mA m^2)$	-1.1757
$m_y (mA m^2)$	0.3057
$m_z (mA m^2)$	-19.3821

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να καθοριστούν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του πηνίου έτσι ώστε στη συνέχεια να μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό (Βήμα Α). Σε περίπτωση ύπαρξης πρότυπου πηνίου η παραπάνω διαδικασία δεν έχει νόημα αλλά στην παρούσα μελέτη δεν ήταν δυνατή η ύπαρξη τέτοιου πηνίου.

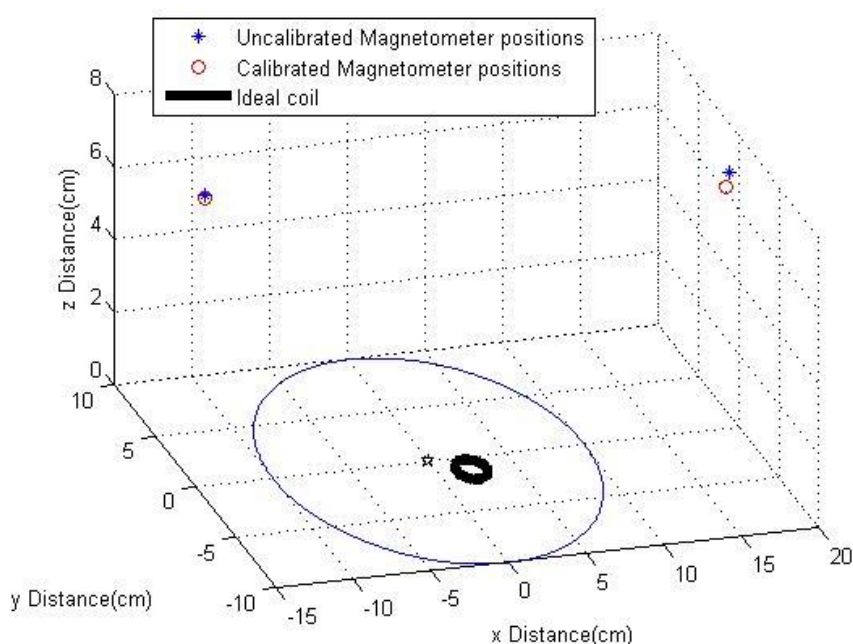
Στην συνέχεια, για την αξιολόγηση της μεθόδου βαθμονόμησης, θα αλλάξουν οι θέσεις των μαγνητομέτρων χωρίς να μετακινείται το EUT.

Αρχικά το μαγνητόμετρο 1 τοποθετείται στο (19.4, 0, 7), ενώ το μαγνητόμετρο 2 παραμένει στην αρχική θέση. Ακολουθώντας την διαδικασία (βήματα 2 και 3) ο

αλγόριθμος υπολογίζει τις πραγματικές θέσεις των μαγνητομέτρων. Σαν θέσεις που βλέπει ο χρήστης εισήχθησαν στον αλγόριθμο οι τιμές (15, 0, 7.5) cm και (-15, 0, 7.5) cm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6 και στην Εικόνα 5.4.

Πίνακας 5.6 - Βαθμονομημένες θέσεις

	Μαγνητόμετρο1	Μαγνητόμετρο2
x_0 (cm)	19.0619	-14.3956
y_0 (cm)	-0.2298	-0.087
z_0 (cm)	6.6729	7.9311



Εικόνα 5.4 - Οπτική απόδοση του Πίνακα 5.6

Σημειώνεται πως η θέση του μαγνητομέτρου 2 έχει αλλάξει ελάχιστα και αποδίδεται στην σταθερότητα της διάταξης κατά την μετακίνηση του μαγνητομέτρου 1.

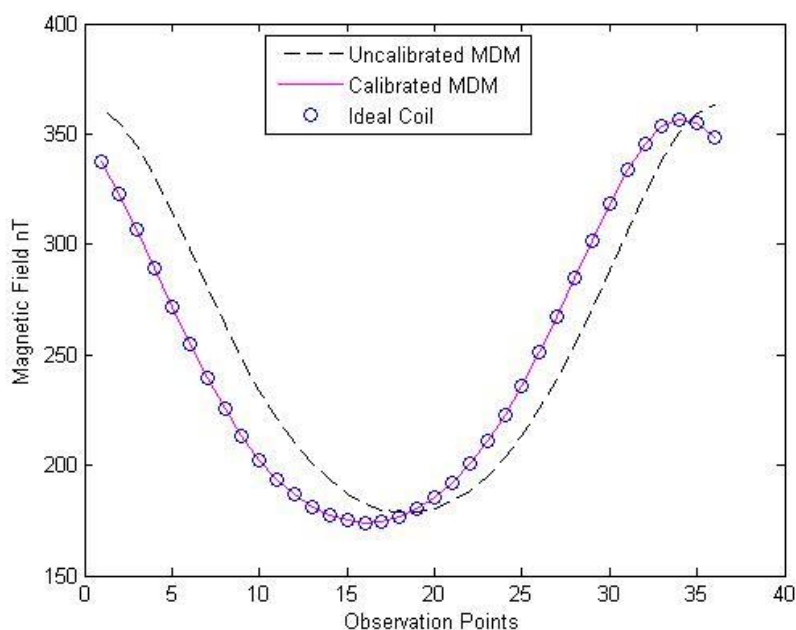
Τα MDM που προκύπτουν για τις μη βαθμονομημένες και τις βαθμονομημένες θέσεις των μαγνητομέτρων φαίνονται στον Πίνακα 5.7. Φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προκύπτει με τις βαθμονομημένες θέσεις των μαγνητομέτρων είναι πιο ακριβές.

Για να τονιστεί η σημασία της ακρίβειας του MDM στην μελέτη μαγνητικής καθαρότητας, υπολογίστηκε το πεδίο που παράγουν τα MDM από τον Πίνακα 5.7 καθώς και το Ιδανικό EUT (Πίνακας 5.4) σε 36 σημεία τοποθετημένα σε κύκλο ακτίνας 20 cm γύρω από το EUT χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (5.2). Το μέτρο των πεδίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.5. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί

στο πεδίο του μη βαθμονομημένου MDM, η πορφυρά συνεχής γραμμή στο βαθμονομημένο MDM και τα «ο» σημεία είναι οι τιμές του ιδανικού EUT.

Πίνακας 5.7 - Σύγκριση MDM

	Μη βαθμονομημένο MDM	Βαθμονομημένο MDM
x (cm)	2.4102	2.1672
y (cm)	-0.3498	-1.1695
z (cm)	1.5342	1.371
m_x (mA m^2)	-0.9508	-1.1757
m_y (mA m^2)	0.8067	0.3057
m_z (mA m^2)	-19.8222	-19.382
Rms σφάλμα	2.04E-08	1.23E-13



Εικόνα 5.5 - Σύγκριση μαγνητικών πεδίων

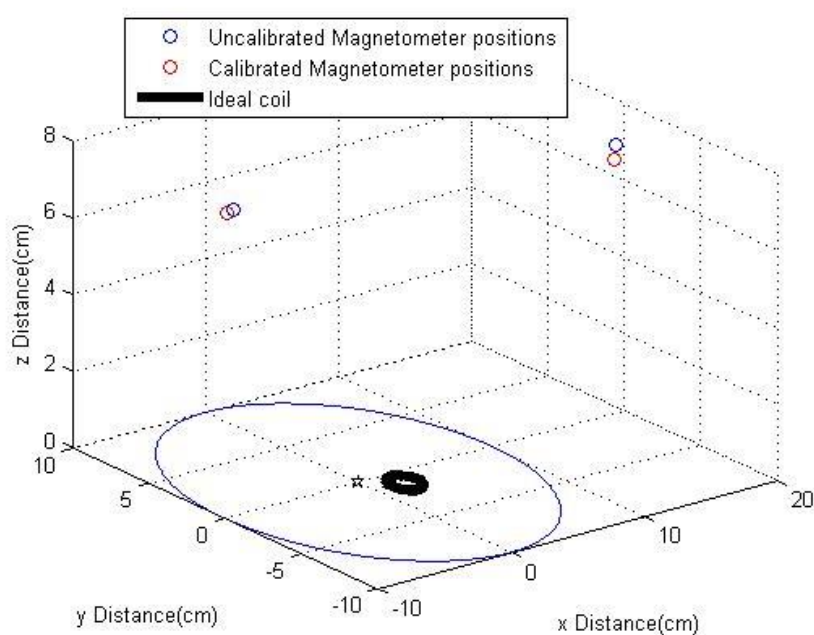
Παρά το γεγονός ότι τα MDM του Πίνακα 5.7 είναι παρόμοια, η διαφορά των πεδίων που παράγουν δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες και κατά συνέπεια η βαθμονόμηση έχει μεγάλη σημασία.

Στην συνέχεια, σαν επιπλέον βήμα ελέγχου της επίδοσης του αλγορίθμου, μετακινήθηκε το μαγνητόμετρο 2 στην θέση (-9.4, 0, 8) cm ενώ το μαγνητόμετρο 1 παρέμεινε στην προηγούμενη θέση. Οι νέες βαθμονομημένες θέσεις καθώς και τα

MDM που παράγονται παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.8 και 5.9 αντίστοιχα. Η Εικόνα 5.6 αποδίδει οπτικά τον Πίνακα 5.8. Σαν θέσεις που βλέπει ο χρήστης εισήχθησαν ξανά στον αλγόριθμο οι τιμές (15, 0, 7.5) cm and (-15, 0, 7.5) cm.

Πίνακας 5.8 - Βαθμονομημένες θέσεις

	Μαγνητόμετρο1	Μαγνητόμετρο2
x_0 (cm)	19.0647	-9.5318
y_0 (cm)	-0.216	0.3203
z_0 (cm)	6.6652	7.8667



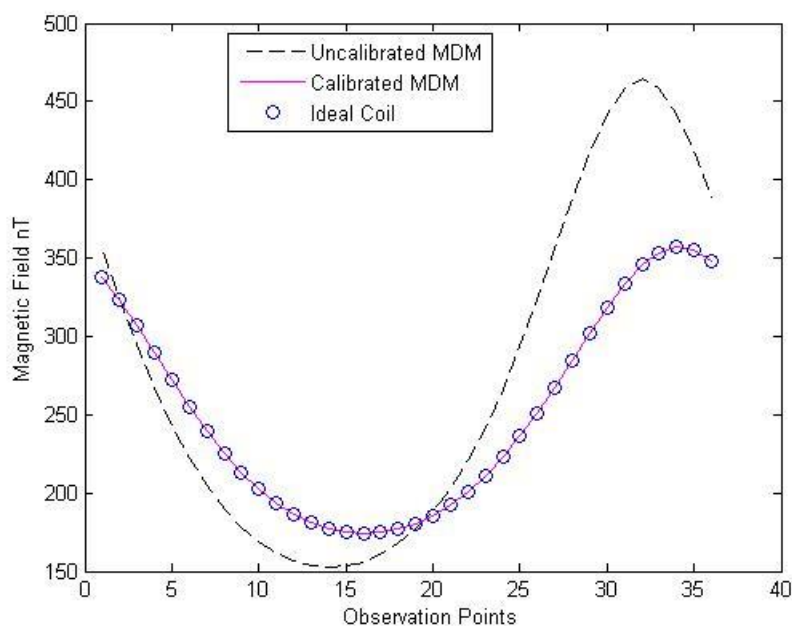
Εικόνα 5.6 - Οπτική απόδοση του Πίνακα 5.8

Πίνακας 5.9 - Σύγκριση MDM

	Μη βαθμονομημένο MDM	Βαθμονομημένο MDM
x (cm)	2.4448	2.1672
y (cm)	-2.7129	-1.1695
z (cm)	1.6073	1.371
m_x (mAm ²)	-0.9638	-1.1756
m_y (mAm ²)	-1.1394	0.3057
m_z (mAm ²)	-20.1645	-19.3821
<i>Rms error</i>	1.74E-04	2.64E-06

Ο αλγόριθμος όχι μόνο υπολόγισε τις πραγματικές θέσεις των μαγνητομέτρων αλλά ξεπέρασε και την κακή εκτίμηση αρχικών θέσεων που δόθηκαν σαν θέσεις από τον χρήστη.

Στην ίδια λογική με προηγουμένως, τα μέτρα των μαγνητικών πεδίων από τα MDM του Πίνακα 5.9 συγκρίνονται με το ιδανικό στην Εικόνα 5.7 όπου φαίνεται και πάλι η διαφορά των δύο μοντέλων στην ακρίβεια του μαγνητικού πεδίου που παράγουν.



Εικόνα 5.7 - Σύγκριση μαγνητικών πεδίων

5.5. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία μέθοδος βαθμονόμησης (calibration) για τον καθορισμό των θέσεων των σημείων παρατήρησης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ακριβής γνώση των θέσεων παρατήρησης είναι απαραίτητη για τους αλγορίθμους που υπολογίζουν το MDM. Για την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και κατά συνέπεια τον υπολογισμό των θέσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης PSO. Σαν αρχικό έλεγχο, η μέθοδος δοκιμάστηκε σε εικονικές μετρήσεις και στη συνέχεια, μετά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που προέκυψαν, δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες. Για αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ένα πηνίο και μία διάταξη δύο μαγνητομέτρων (Εικόνες 5.2 και 5.3). Από τα αποτελέσματα φαίνεται καθαρά πως η μέθοδος προσφέρει μεγάλη ακρίβεια στις θέσεις παρατήρησης γεγονός που οδηγεί σε ακριβέστερα MDM. Επιπλέον,

συγκρίνοντας τα παραγόμενα πεδία MDM που έχουν προκύψει χωρίς βαθμονομημένες θέσεις με MDM βαθμονομημένων θέσεων γίνεται σαφές πως ακόμα και σχετικά μικρές αποκλίσεις στις παραμέτρους του MDM οδηγούν σε διαφορετική μαγνητική συμπεριφορά κάνοντας την μελέτη μαγνητικής καθαρότητας πολύ πιο δύσκολη.

Αναφορές

- [1] Mehlem, K., "Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 14, No. 5, 1064–1071, Sep. 1978.
- [2] Nara, T., S. Suzuki, and S. Ando, "A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, 3291–3293, Oct. 2006.
- [3] Song, H., J. Chen, D. Zhou, D. Hou, and J. Lin, "An equivalent model of magnetic dipole for the slot coupling of shielding cavity," 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE 2008, 970–973, Nov. 2–5, 2008.
- [4] Junge, A. and F. Marliani, "Prediction of DC magnetic fields for magnetic cleanliness on spacecraft," 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 834–839, Aug. 14–19, 2011.
- [5] Endo, H., T. Takagi, and Y. Saito, "A new current dipole model satisfying current continuity for inverse magnetic field source problems," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 5, 1748–1751, May 2005.
- [6] Müller, D., Marsden, R. G., St. Cyr, O. C., and Gilbert, H. R.: Solar Orbiter. Exploring the Sun-Heliosphere Connection, Sol. Phys., 285, 25–70, 2013.
- [7] Diaz-Aguiló M, Mateos I, Ramos-Castro J, Lobo A and García-Berro E, "Design of the magnetic diagnostics unit onboard LISA Pathfinder", Aerospace Science and Technology, Volume 26, No. 1, 53–59, April–May 2013.
- [8] Weikert, S.; Mehlem, K.; Wiegand, A., "Spacecraft magnetic cleanliness prediction and control," Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on , vol., no., pp.1,5, 21-23 May 2012.
- [9] Carrubba, E.; Junge, A.; Marliani, F.; Monorchio, A., "Particle Swarm Optimization to solve Multiple Dipole Modelling problems in space applications,"

Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on , vol., no., pp.1,6, 21-23 May 2012.

[10] Mehlem, K.; Wiegand, A.; Weickert, S., "New developments in magnetostatic cleanliness modeling," Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on , vol., no., pp.1,6, 21-23 May 2012.

[11] Dumond, O.; Berge, R., "Determination of the magnetic moment with spherical measurements and spherical harmonics modelling," Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on , vol., no., pp.1,5, 21-23 May 2012.

[12] Kapsalis, N. C., Kakarakis, S.-D. J. and Capsalis, C. N., "Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms", Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 34, 111-122, 2012.

[13] Kakarakis, S.-D. J., Kapsalis, N. C. and Capsalis, C. N., "A Semianalytical Heuristic Approach for Prediction of Eut's Multiple Dipole Model by Reducing the Number of Heuristics", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 57, No.1, pp.87-92, Feb. 2015.

[14] Spantideas, S. T., Kapsalis, N. C., Kakarakis, S.-D. J. and Capsalis, C. N., "A Method of Predicting Composite Magnetic Sources Employing Particle Swarm Optimization", Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 39, 161–170, 2014.

[15] Boschetti, D.; Gervasio, G.; Marziali, I., "Montecarlo approach for magnetic cleanliness evaluation on spacecraft," Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on , vol., no., pp.1,3, 21-23 May 2012.

[16] Mikki, S. M. and Y. M. M. Antar, "Near-field analysis of electromagnetic interactions in antenna arrays through equivalent dipole models," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 60, No. 3, 1381–1389, Mar. 2012.

[17] Ciamak, A. and H. Jürgen, "Real-time ECG emulation: A multiple dipole model for electrocardiography simulation," Studies in Health Technology and Informatics, 142:79, PMID: 19377101, 2009.

[18] Pan, S., J. Kim, S. Kim, J. Park, H. Oh, and J. Fan, "An equivalent three-dipole model for IC radiated emissions based on TEM cell measurements," 2010

IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 652–656, Jul. 25–30,2010.

[19] Hoang, V. D., Hernández, D. C. and Jo, K. H., “Simple and Efficient Method for Calibration of a Camera and 2D Laser Rangefinder”, Springer International Publishing, Intelligent Information and database systems, Vol. 8397, Series Lecture Notes in Computer Science, pp 561-570, 2014.

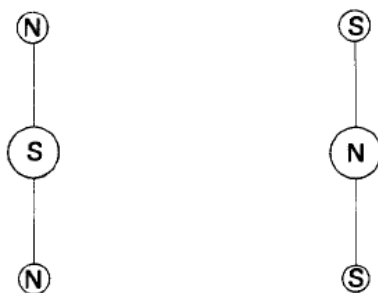
[20] Kennedy, J. and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 4, 1942/1948, Nov./Dec. 1995.

Κεφάλαιο 6 - Μαγνητικό τετράπολο (Quadrupole)

6.1. Εισαγωγή

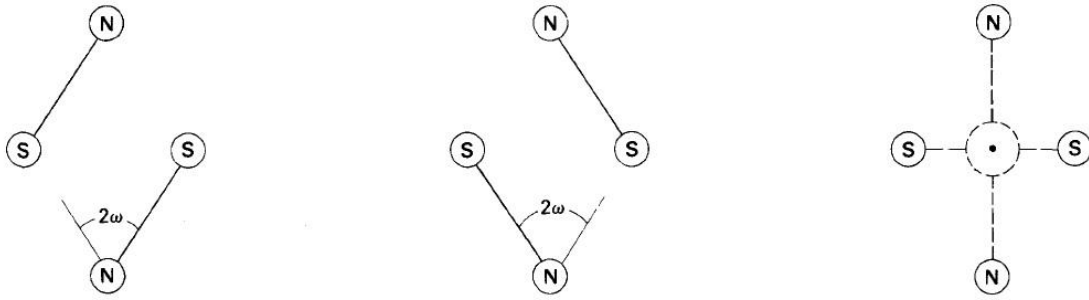
Για τη βελτίωση της καταλληλότητας ενός μοντέλου διπόλου απαιτείται ελαφρώς αυξημένη πολυπλοκότητα που οφείλεται σε πολύπολα. Δύο ίσα αλλά αντιπαράλληλα δίπολα σε απειροστή απόσταση αποτελούν ένα τετράπολο, δύο τετράπολα αντίστοιχα ένα οκτάπολο και ούτω καθ' εξής. Για μία πηγή μαγνητικού πεδίου όταν γίνεται ανάλυση πολλαπλών όρων το τετράπολο είναι ο επόμενος όρος της σειράς μετά το δίπολο σε όρους μέτρου και μπορεί να θεωρηθεί ο κύριος παράγοντας όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο διπόλου.

Το τετράπολο μπορεί να χαρακτηριστεί από την κατεύθυνση στην οποία το αντεστραμμένο δίπολο είναι μετατοπισμένο από το άλλο δίπολο. Αυτή η κατεύθυνση, σε συνδυασμό με τον άξονα του διπόλου, ορίζει ένα χαρακτηριστικό επίπεδο. Η γωνία 2ω , μεταξύ της κατεύθυνσης του αντεστραμμένου διπόλου με τον άξονα του μη αντεστραμμένου, μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή. Εάν η γωνία αυτή είναι 180° ή 0° σχηματίζεται ένα γραμμικό τετράπολο [1], με δύο πόλους ίδιους εξωτερικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1. Σε αυτή την περίπτωση δεν ορίζεται χαρακτηριστικό επίπεδο με την έννοια που ήδη αναφέρθηκε.



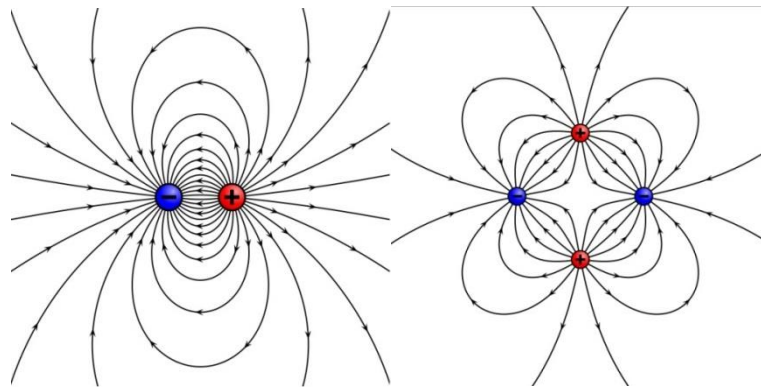
Εικόνα 6.1 - Γραμμικό τετράπολο με γωνία $2\omega = 0^\circ$ και 180°

Εάν η γωνία 2ω είναι 90° ή 270° τότε σχηματίζεται το επίπεδο τετράπολο ή αλλιώς κανονικό τετράπολο (Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2 - Κανονικό τετράπολο

Το μαγνητικό πεδίο του τετραπόλου μειώνεται γρηγορότερα από το μαγνητικό πεδίο του διπόλου σε σχέση με την απόσταση του σημείου παρατήρησης [2]. Τα μαγνητικά πεδία ενός διπόλου και ενός κανονικού τετραπόλου παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα 6.3.



Εικόνα 6.3 - Μαγνητικά πεδία διπόλου (αριστερά) και τετραπόλου (δεξιά)

Παρόλο που το MDM μπορεί να προβλέψει την μαγνητική συμπεριφορά ενός EUT, τα πεδία που παράγονται από τετράπολα δεν λαμβάνονται υπόψη. Στην περίπτωση που υπάρχουν τετράπολα στο EUT, η ακρίβεια του μοντέλου θα αυξανόταν εάν συμπεριλαμβάνονταν και τα τετράπολα σε ένα Μοντέλο Πολλαπλών Διπόλων Και Τετραπόλων (Multiple Dipole and Quadrupole Model (MDQM)). Η μοντελοποίηση του πεδίου ενός τετραπόλου είναι σχετικά πιο δύσκολη γιατί το πεδίο είναι πολύ πιο ασθενές από του διπόλου και μπορεί να θεωρηθεί θόρυβος. Η μοντελοποίηση με ακρίβεια του MDQM είναι αρκετά σημαντική σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες για βαθμονόμηση, εφόσον αυτοί οι μαγνήτες μπορεί να περιλαμβάνουν ανώτερους όρους όπως τετράπολο και οκτάπολο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία αντίστοιχη μέθοδος με το κεφάλαιο 4 [3] για την πρόβλεψη MDQM μοντέλων. Η ευρεστική μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η PSO.

6.2. Μαθηματική ανάλυση του προβλήματος

Η μαγνητική συμπεριφορά του EUT θα μοντελοποιηθεί από 1 δίπολο και 1 τετράπολο. Το δίπολο είναι τοποθετημένο στη θέση (x_d, y_d, z_d) και η μαγνητική ροπή είναι:

$$\vec{m}_d = m_{x_d} \cdot \hat{x} + m_{y_d} \cdot \hat{y} + m_{z_d} \cdot \hat{z} \quad (6.1)$$

Στη συνέχεια στο j από τα M σημεία παρατήρησης, τοποθετημένα στα (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) , όπου $j=1, \dots, M$, το μαγνητικό πεδίο του διπόλου είναι το διάνυσμα:

$$\vec{B}_{dj} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot (\vec{m}_d \cdot \hat{\rho}_{dj}) \cdot \hat{\rho}_{dj}}{\rho^3_{dj}} - \frac{\vec{m}_d}{\rho^3_{dj}} \right] \quad (6.2)$$

Όπου,

$$\rho_{dj} = \sqrt{(x_{0j} - x_d)^2 + (y_{0j} - y_d)^2 + (z_{0j} - z_d)^2} \quad (6.3)$$

Το μαγνητικό πεδίο του διπόλου στο σημείο παρατήρησης j υπολογίζεται:

$$\vec{B}_d = \sum_1^N B_{x_{dj}} \cdot \hat{x} + \sum_1^N B_{y_{dj}} \cdot \hat{y} + \sum_1^N B_{z_{dj}} \cdot \hat{z} \quad (6.4)$$

Το μαγνητικό πεδίο ενός γραμμικού τετραπόλου στο σημείο παρατήρησης j μπορεί να υπολογιστεί [2]:

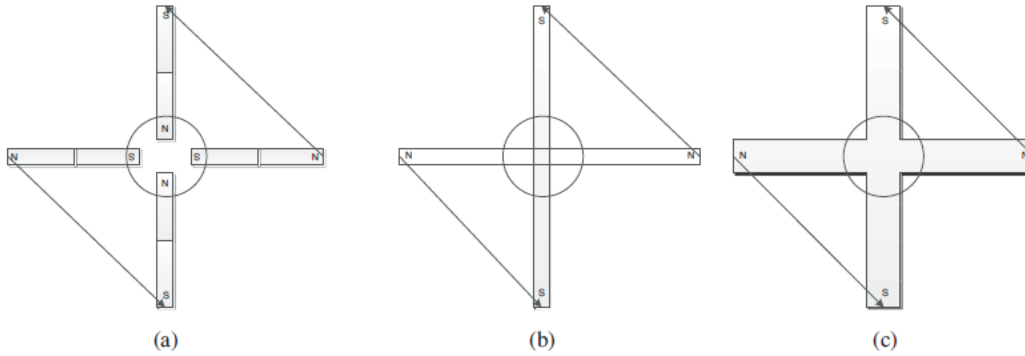
$$\vec{B}_{qj} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot m_q}{4 \cdot \rho^4_{qj}} \cdot \left(5 \cdot (\hat{m}_q \cdot \hat{\rho})^2 - 1 \right) \hat{\rho} - \frac{3 \cdot m_q}{2 \cdot \rho^4_{qj}} \cdot (\hat{m}_q \cdot \hat{\rho}) \hat{m}_q \right] \quad (6.5)$$

Όπου \hat{m}_q είναι η μαγνητική ροπή του τετραπόλου και

$$\rho_{qj} = \sqrt{(x_{0j} - x_q)^2 + (y_{0j} - y_q)^2 + (z_{0j} - z_q)^2} \quad (6.6)$$

Το μαγνητικό πεδίο του τετράπολου στο σημείο παρατήρησης j υπολογίζεται σαν υπέρθεση των μαγνητικών πεδίων δύο γραμμικών τετραπόλων σε πολύ κοντινή απόσταση κάθετων μεταξύ τους [2].

Στην Εικόνα 6.4(a) 4 δίπολα σε εγγύτητα με ίσες μαγνητικές ροπές κατά μέτρο παρουσιάζονται. Οι πόλοι μέσα στον κύκλο αλληλοαναιρούνται. Αυτή η διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με 2 γραμμικά τετράπολα που σχηματίζουν ένα κανονικό τετράπολο (Εικόνα 6.4(c)).



Εικόνα 6.4 - Διατάξεις ισοδύναμων τετραπόλων

Μία άλλη ισοδύναμη διάταξη αποτελείται από 2 δίπολα σε πολύ μικρή απόσταση ϵ με αντίθετες μαγνητικές ροπές όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.4(b). Η μαγνητική ροπή του τετραπόλου είναι ανάλογη του γινομένου της απόστασης ϵ και της μαγνητικής ροπής του διπόλου [2]. Για παράδειγμα, 2 δίπολα με μαγνητικές ροπές $30\text{mA}\cdot\text{m}^2$ και $-30\text{mA}\cdot\text{m}^2$ αντίστοιχα, σε απόσταση 0.7cm μπορούν να θεωρηθούν ως ένα τετράπολο με μαγνητική ροπή $m_q \approx 0.15 \text{ mA}\cdot\text{m}^3$.

Στο παρών κεφάλαιο, χωρίς άρση της γενικότητας, το μαγνητικό πεδίο ενός τετραπόλου θα προσομοιώνεται με 2 δίπολα σε απόσταση ϵ με αντίθετες μαγνητικές ροπές. Το δίπολο αντιπροσωπεύεται από ένα 1×6 διάνυσμα. Επιπλέον, το τετράπολο καθορίζεται από ένα δίπολο αναφοράς ($x_q, y_q, z_q, m_{xq}, m_{yq}, m_{zq}$) και ένα δίπολο σε εγγύτητα με αντίθετες μαγνητικές ροπές ($x_q + \epsilon_x, y_q + \epsilon_y, z_q + \epsilon_z, -m_{xq}, -m_{yq}, -m_{zq}$) όπου,

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2} \quad (6.7)$$

Η προτεινόμενη μέθοδος καθορίζει τις θέσεις και τις ροπές ενός διπόλου και του διπόλου αναφοράς. Κάθε σωματίδιο είναι ένα διάνυσμα (1×12) \mathbf{E} . Τα στοιχεία του, e_i , αντιπροσωπεύουν τις θέσεις και τις μαγνητικές ροπές των διπόλων.

6.3. Εφαρμογή της PSO στο πρόβλημα

Αρχικά δημιουργείται ένας ($3 \times M$) πίνακας \mathbf{TB}^{th} στον οποίο περιλαμβάνονται οι θεωρητικές τιμές του πεδίου στα σημεία παρατήρησης. Αντίστοιχα, ένας ($3 \times M$) πίνακας \mathbf{TB} περιλαμβάνει το πεδίο που υπολογίζεται σε κάθε γενιά. Μετά την αξιολόγηση των p_{best} και g_{best} , οι νέες ταχύτητες των σωματιδίων υπολογίζονται:

$$u_{in} = w \cdot u_{in} + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{\text{best}_{in}} - p_{in}) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (g_{\text{best}_{in}} - p_{in}) \quad (6.8)$$

Όπου, w είναι το βάρος της ταχύτητας της προηγούμενης γενιάς και c_1, c_2 είναι παράγοντες που καθορίζουν το δίλημμα μεταξύ της αναζήτησης του χώρου λύσεων και της αξιοποίησης των πιθανών λύσεων. Τέλος, p_{in} είναι η θέση του στοιχείου i του πράκτορα $n, n=1,2,\dots,N$. Στην παρούσα εργασία $c_1 = c_2 = 2$ και $w=0.5$.

Έπειτα, οι νέες θέσεις των πρακτόρων υπολογίζονται:

$$p_{in} = p_{in} + u_{in} \quad (6.9)$$

Καθώς προχωράει ο αλγόριθμος, κάθε πράκτορας ανανεώνει την θέση και την ταχύτητα του και με τις εξισώσεις (6.2) – (6.6) ανανεώνεται ο πίνακας **TB**. Δύο επιπλέον πίνακες **TBp** και **TBg** εισάγονται για να συμπεριλάβουν τα μαγνητικά πεδία των p_{best} και g_{best} αντίστοιχα.

Για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας κάθε λύσης η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$F = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^M (TBg_{ij} - TBth_{ij})^2 \quad (6.10)$$

Σε κάθε γενιά, η F υπολογίζεται για κάθε πράκτορα. Ο στόχος είναι η F να γίνει ελάχιστη ή ιδανικά 0.

6.4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Παρακάτω ελέγχεται η ακρίβεια του αλγορίθμου στην πρόβλεψη του MDQM μοντέλου χρησιμοποιώντας μόνο θεωρητικές τιμές πεδίου (Περίπτωση Α και Β) και διαταραγμένες (με μέγιστη διαταραχή 5%) τιμές πεδίου (Περίπτωση Γ). Επειδή η συνεισφορά του τετραπόλου στο συνολικό πεδίο εξασθενεί πολύ καθώς απομακρύνεται το σημείο παρατήρησης, η ακτίνα του κύκλου στον οποίο είναι τοποθετημένα τα σημεία παρατήρησης έχει επιλεγεί να είναι 40 cm. Επιπλέον η απόσταση ε μεταξύ των διπόλων που αποτελούν το τετράπολο είναι 0.7 cm.

6.4.1 Περίπτωση Α

Ένα σετ αποτελούμενο από ένα δίπολο και ένα τετράπολο χρησιμοποιήθηκε για να παράξει ένα πεδίο σε διάφορες θέσεις. Αυτές οι τιμές πεδίου υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις (6.2) – (6.6) και αποτελούν τον Πίνακα 6.1. Σε κάθε γενιά, αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν με ακρίβεια τις παραμέτρους του μοντέλου, δηλαδή, τις θέσεις και τις μαγνητικές ροπές. Αρχικά, το δίπολο και το τετράπολο

βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Οι θεωρητικές τιμές των παραμέτρων του EUT παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 - Θεωρητικές τιμές παραμέτρων

	$x(cm)$	$y(cm)$	$z(cm)$	$m_x(mAm^2)$	$m_y(mAm^2)$	$m_z(mAm^2)$
Δίπολο	0	0	0	0	0	30
Δίπολο αναφοράς τετραπόλου	-0.35	0	-1	-10	-10	0
Δίπολο 2 τετραπόλου	0.35	0	-1	10	10	0

Ο αλγόριθμος συνέκλινε στο MDQM που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2, ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση F στην τιμή $F = 9.6439 \cdot 10^{-9}$. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.2, το αρχικό EUT ανακατασκευάστηκε σχεδόν πανομοιότυπα με το θεωρητικό, ξεχωρίζοντας τις συνεισφορές του διπόλου και του τετραπόλου στο συνολικό πεδίο παρά την κοντινή τους απόσταση.

Πίνακας 6.2 - MDQM τιμές παραμέτρων

	$x(cm)$	$y(cm)$	$z(cm)$	$m_x(mAm^2)$	$m_y(mAm^2)$	$m_z(mAm^2)$
Δίπολο	0.0005	0	0	0.0001	-0.0000	30
Δίπολο αναφοράς τετραπόλου	-0.3500	-0.0000	-1.0000	-10.0000	-10.0000	0.0217
Δίπολο 2 τετραπόλου	0.35	-0.0000	-1.0000	10	10	-0.0217

Στη συνέχεια, το δίπολο απομακρύνεται από το τετράπολο. Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται οι νέες παράμετροι του αρχικού σετ ενώ στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζεται η πρόβλεψη του αλγορίθμου με τιμή $F = 8.9914 \cdot 10^{-9}$.

Πίνακας 6.3 - Θεωρητικές τιμές παραμέτρων

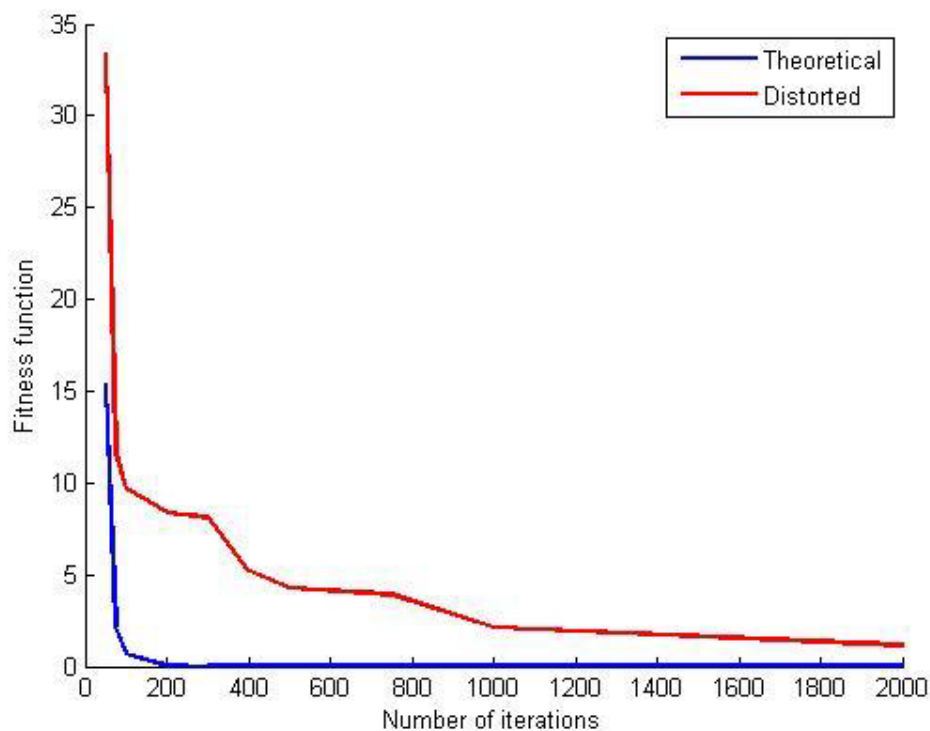
	$x(cm)$	$y(cm)$	$z(cm)$	$m_x(mAm^2)$	$m_y(mAm^2)$	$m_z(mAm^2)$
Δίπολο	10	10	10	0	0	30
Δίπολο αναφοράς τετραπόλου	-0.35	0	-1	-10	-10	0
Δίπολο 2 τετραπόλου	0.35	0	-1	10	10	0

Πίνακας 6.4 - MDQM τιμές παραμέτρων

	$x(cm)$	$y(cm)$	$z(cm)$	$m_x(mAm^2)$	$m_y(mAm^2)$	$m_z(mAm^2)$
Δίπολο	10	10	10	0	-0.0000	30
Δίπολο αναφοράς τετραπόλου	-0.3500	0.0002	-1.0005	-9.9999	-10.0002	0.0008
Δίπολο 2 τετραπόλου	0.3500	0.0002	-1.0005	9.9999	10.0002	-0.0008

Από τις παραπάνω περιπτώσεις είναι σαφές ότι ο αλγόριθμος μπορεί να εντοπίζει την ύπαρξη του τετραπόλου, ανεξάρτητα με την απόσταση του από το δίπολο, και να προβλέπει με ακρίβεια τις παραμέτρους του MDQM.

Στην Εικόνα 6.5 φαίνεται η τιμή της F σε κάθε γενιά καθώς εκτελείται ο αλγόριθμος.

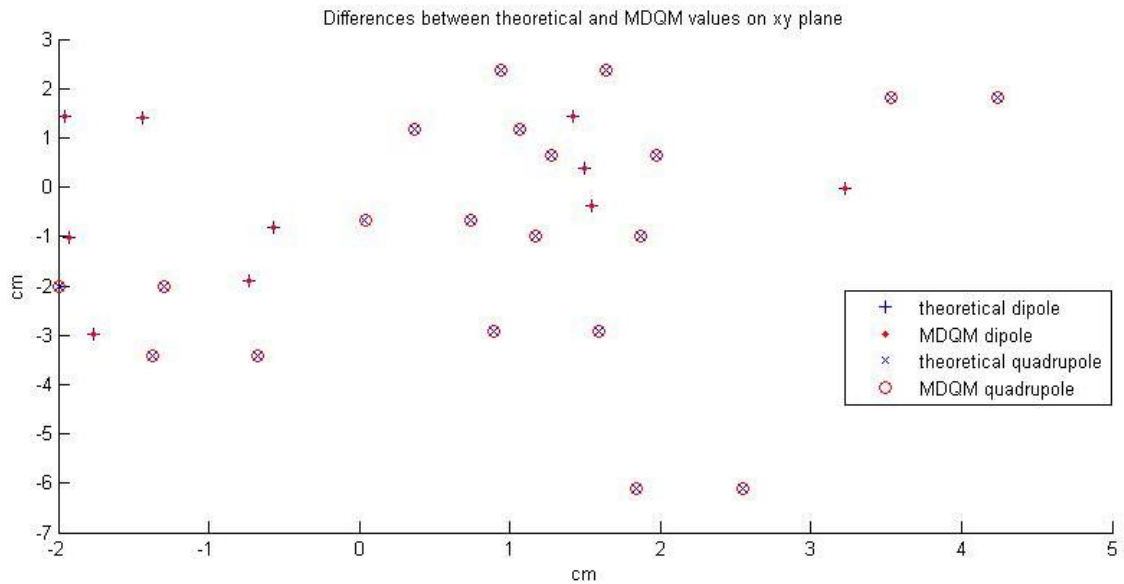


Εικόνα 6.5 - Πρόοδος της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου

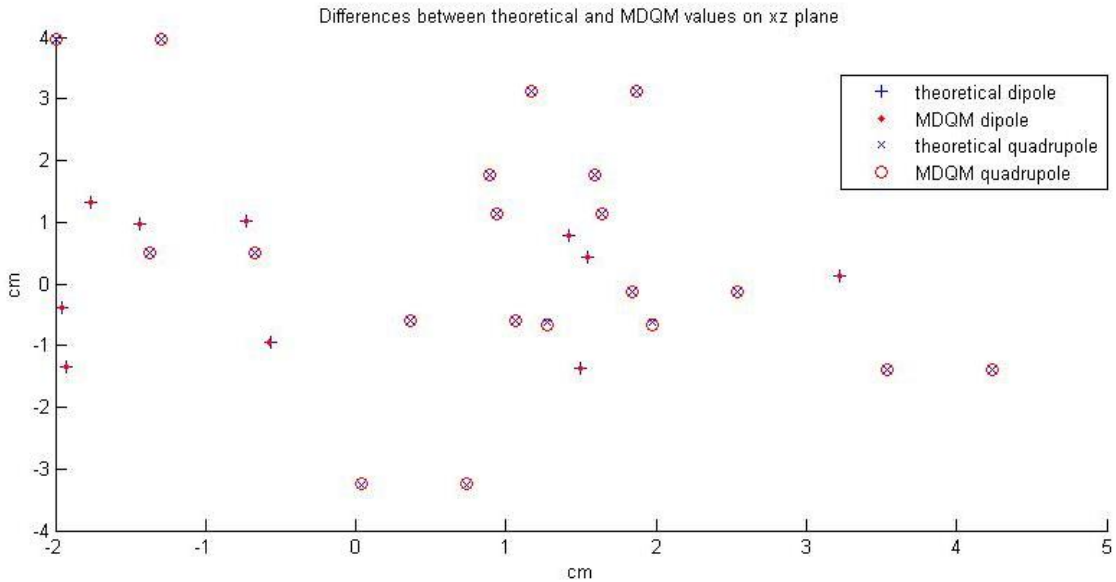
6.4.2 Περίπτωση B

Σε αυτή την περίπτωση τα EUT αποτελούνται από ένα δίπολο και ένα τετράπολο όμοια με την περίπτωση A αλλά οι θέσεις τους προκύπτουν από μία κανονική κατανομή με μέση τιμή $\mu = 0$ και τυπική απόκλιση $\sigma = 1$. Συνολικά δημιουργούνται 10 EUT. Για κάθε EUT δημιουργείται ένας πίνακας **TBth** που περιλαμβάνει το πεδίο που προκύπτει από τις εξισώσεις (6.2) – (6.6). Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιούνται σαν είσοδο στον αλγόριθμο. Στις Εικόνες 6.6 – 6.8 παρουσιάζονται οι θεωρητικές και οι MDQM θέσεις για τα 10 EUT σε 2-D για τα επίπεδα xy, xz και yz. Πιο συγκεκριμένα, οι μπλέ σταυροί '+' είναι οι θεωρητικές θέσεις των διπόλων, τα μπλε 'x' είναι οι θεωρητικές θέσεις των τετραπόλων και οι κόκκινες τελείες '.' και κύκλοι 'ο' είναι οι MDQM θέσεις των διπόλων και των τετραπόλων αντίστοιχα.

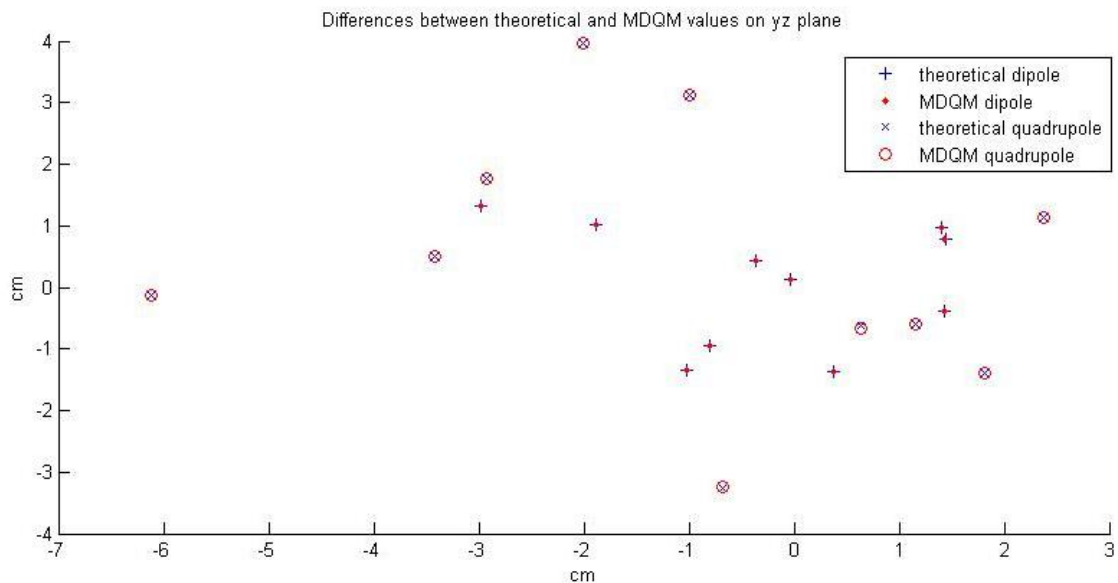
Από τις Εικόνες 6.6 – 6.8 φαίνεται καθαρά η ικανότητα του αλγορίθμου να προβλέπει με ακρίβεια τα θεωρητικά EUT. Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος είναι να ταυτίζονται οι θέσεις των ‘+’ με των ‘.’ και αντίστοιχα των ‘x’ με των ‘o’. Στις Εικόνες 6.6 – 6.8 φαίνεται καθαρά πως το παραπάνω συμβαίνει σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 6.6 - Παρουσίαση θέσεων MDQM συγκριτικά με τις θεωρητικές στο επίπεδο xy



Εικόνα 6.7 - Παρουσίαση θέσεων MDQM συγκριτικά με τις θεωρητικές στο επίπεδο xz



Εικόνα 6.8 - Παρουσίαση θέσεων MDQM συγκριτικά με τις θεωρητικές στο επίπεδο yz

6.4.3 Περίπτωση Γ

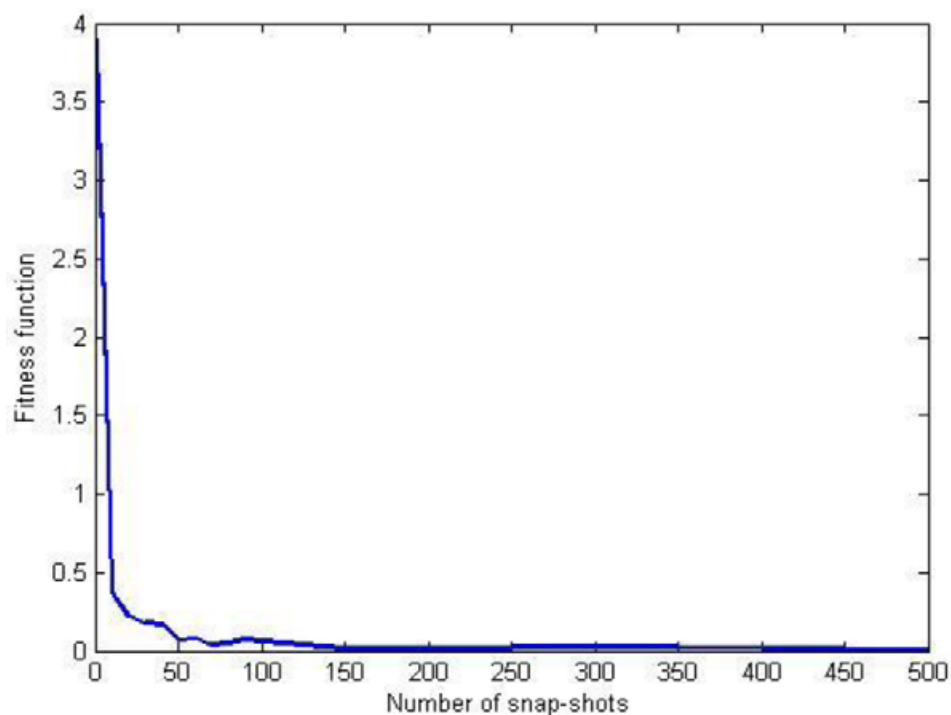
Ένα σετ θεωρητικών τιμών πεδίου παράγεται όμοια με την περίπτωση Α και συμπληρώνει τον πίνακα **TBth**. Οι τιμές αυτές διαταράσσονται κατά μέγιστο 5%. Σαν μέθοδο αποθρομβοποίησης χρησιμοποιείται η μέθοδος πολλαπλών στιγμιότυπων του πεδίου και σαν είσοδο στον αλγόριθμο χρησιμοποιείται ο μέσος όρος αυτών. Στην Εικόνα 6.9 παρουσιάζεται η σύγκλιση της F αναφορικά με τον αριθμό στιγμιότυπων που χρησιμοποιούνται. Προκύπτει λοιπόν πως 100 στιγμιότυπα είναι αρκετά για ακριβή πρόβλεψη ενός MDQM με τιμή $F = 0.0629$. Το ανακατασκευασμένο MDQM παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.6 ενώ οι θεωρητικές παράμετροι του EUT παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5 - Θεωρητικές τιμές παραμέτρων

	$x(cm)$	$y(cm)$	$z(cm)$	$m_x(mAm^2)$	$m_y(mAm^2)$	$m_z(mAm^2)$
Δίπολο	1	1	1	0	0	30
Δίπολο αναφοράς τετραπόλου	-0.35	10	-10	-10	-10	0
Δίπολο 2 τετραπόλου	0.35	10	-10	10	10	0

Πίνακας 6.6 - MDQM τιμές παραμέτρων

	$x(cm)$	$y(cm)$	$z(cm)$	$m_x(mAm^2)$	$m_y(mAm^2)$	$m_z(mAm^2)$
Δίπολο	1.0208	1.0029	0.9997	0.025	-0.0009	29.9956
Δίπολο αναφοράς τετραπόλου	-0.2698	10.0482	-9.9532	-9.8686	-10.4084	1.1269
Δίπολο 2 τετραπόλου	0.4302	10.0482	-9.9532	9.8686	10.4084	-1.1269



Εικόνα 6.9 - Σύγκλιση F ανάλογα με τον αριθμό των στιγμιότυπων

Από την σύγκριση των πινάκων 6.5 και 6.6 γίνεται αντιληπτό πως ο αλγόριθμος βρήκε με μεγάλη ακρίβεια τις παραμέτρους του MDQM ξεπερνώντας την παρουσία της διαταραχής 5% στις εικονικές μετρήσεις.

6.5. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μία στοχαστική μέθοδος βασισμένη στην τεχνική PSO για τον υπολογισμό μοντέλου ενός EUT χρησιμοποιώντας δίπολο και τετράπολο. Η προσθήκη τετραπόλου στην διαδικασία μοντελοποίησης αυξάνει την ακρίβεια του τελικού μοντέλου. Ο λόγος είναι πως μία μαγνητική πηγή, ένας μαγνήτης για παράδειγμα, δεν είναι τέλειος και η απόκλιση αυτή μπορεί να καλυφτεί

από την προσθήκη τετραπόλου. Έτσι, το MDQM είναι αρκετά σημαντικό σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες για βαθμονόμηση, εφόσον αυτοί οι μαγνήτες μπορεί να περιλαμβάνουν ανώτερους όρους όπως τετράπολο και οκτάπολο.

Η μέθοδος δοκιμάστηκε σε τρεις περιπτώσεις με εικονικές μετρήσεις στις οποίες περιλαμβάνεται και διαταραχή (θόρυβος) και από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι είναι ικανή να ξεχωρίσει την συνεισφορά του τετραπόλου στο εικονικά μετρούμενο μαγνητικό πεδίο και επιπλέον να υπολογίσει με ακρίβεια τις παραμέτρους του δίπολου και του τετραπόλου. Όλες οι περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν αφορούν σε ένα δίπολο και ένα τετράπολο γιατί, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο όρος του τετραπόλου θεωρείται η απόκλιση της μαγνητικής συμπεριφοράς του μαγνήτη από το θεωρητικό τέλειο.

Αναφορές

- [1] Howe, H. H., 1939, The Earth's quadrupole moments: Transactions of the American Geophysical Union, v. 20, p. 359-364.
- [2] Knapp, D. G., On Modeling Magnetic Fields on a Sphere with Dipoles and Quadrupoles, Geological Survey Professional Paper 1118, United States Government Printing Office, Washington, 1980.
- [3] Kapsalis, N. C., Kakarakis, S.-D. J. and Capsalis, C. N., "Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms", Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 34, 111-122, 2012.

Κεφάλαιο 7 - Νέα ημι-αναλυτική ευριστική προσέγγιση για την πρόβλεψη του μοντέλου πολλαπλών διπόλων ενός EUT - Μελέτη διατάξεων τοποθέτησης των μαγνητομέτρων

Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζεται ένας πρωτοποριακός αλγόριθμος για τον υπολογισμό μοντέλων πολλαπλών διπόλων (MDM) για πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός εξοπλισμού υπό εξέταση (EUT). Ο αλγόριθμος βασίζεται σε μία ημι-αναλυτική προσέγγιση οδηγώντας σε λιγότερους άγνωστους προς καθορισμό με αποτέλεσμα ένα αποτελεσματικό προσδιορισμό του MDM. Οι γενετικοί αλγόριθμοι και η PSO έχουν επιλεγεί σαν βάσεις για την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS) μεταξύ των μαγνητικών πεδίων του EUT και του MDM. Για την επικύρωση της προτεινόμενης μεθόδου και τον έλεγχο της απόδοσης της πραγματοποιήθηκαν πολλές προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις αυτές αφορούν σε διάφορα EUT και τα υπολογιζόμενα MDM από τον αλγόριθμο επιδεικνύουν την ικανότητα της μεθόδου να καθορίζει με ακρίβεια το MDM. Επιπλέον εξετάζονται θέματα σχετικά με την διαδικασία μέτρησης αναφορικά με την απόσταση, τον αριθμό των σημείων παρατήρησης και τη σημασία της σωστής επιλογής αριθμού διπόλων για το μοντέλο για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Τέλος ακολουθεί μία μελέτη πιθανών διατάξεων τοποθέτησης μαγνητομέτρων για πληρέστερη λήψη της μαγνητικής υπογραφής ενός EUT.

7.1. Εισαγωγή

Η ανάγκη εύρεσης ισοδύναμου μαγνητικού μοντέλου ενός EUT βασιζόμενο σε μετρήσεις του κοντινού μαγνητικού του πεδίου έχει αναφερθεί σε πολλά επιστημονικά προβλήματα [1]. Εφόσον το ισοδύναμο μοντέλο έχει καθοριστεί, ένα μαγνητοστατικό πεδίο, ταυτόσημο με το αρχικά μετρούμενο, μπορεί να υπολογιστεί σε οποιαδήποτε απόσταση και έτσι μπορεί να προβλεφτεί το πεδίο του EUT παντού στο χώρο. Η MDM τεχνική είναι η διαδοδομένη μέθοδος για την προσέγγιση του προβλήματος και έχει εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις [1]-[5]. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου για να υπολογίσει τις θέσεις και τις μαγνητικές ροπές των διπόλων που συνθέτουν το μοντέλο του οποίου το πεδίο είναι ισοδύναμο με του EUT.

Μια κρίσιμη παράμετρος στις διαστημικές αποστολές είναι η πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς του διαστημικού σκάφους διότι οι αποστολές επικεντρώνονται σε μετρήσεις πολύ αδύναμων μαγνητικών πεδίων [1]. Έτσι, οι συσκευές μέτρησης είναι ευάλωτες αφού βρίσκονται μέσα στο μαγνητοστατικό πεδίο του σκάφους. Για αυτό το λόγο, η μοντελοποίηση του εξοπλισμού πρέπει να γίνει με ακρίβεια [9], [10]. Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για να ελαχιστοποιήσουν αυτό το πρόβλημα και βασίζονται είτε σε ντετερμινιστικούς [6]-[8] είτε σε στοχαστικούς αλγορίθμους [2]-[5]. Στην παρούσα εργασία έχουν επιλεγεί οι γενετικοί αλγόριθμοι σαν μέθοδος βελτιστοποίησης.

Η πρόβλεψη ενός MDM βασίζεται πολύ στον αριθμό και τις θέσεις των σημείων μέτρησης του μαγνητικού πεδίου. Περισσότερα σημεία δεν σημαίνει απαραίτητα ακριβέστερη πρόβλεψη εφόσον είναι πιθανό να υπάρχουν πολλαπλές υποβέλτιστες λύσεις. Αντιθέτως, ο σωστά επιλεγμένος αριθμός των σημείων παρατήρησης καθώς και οι θέσεις τους είναι κρίσιμοι παράγοντες για την δημιουργία αποδοτικών εγκαταστάσεων και ως προς το κόστος και ως προς την αβεβαιότητα της όλης διαδικασίας μοντελοποίησης.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μία ημι-αναλυτική μέθοδος που αντί να χρησιμοποιεί 6 μεταβλητές (3 για τη θέση και 3 για τη μαγνητική ροπή) για τον καθορισμό ενός διπόλου, χρησιμοποιεί 4. Οι 3 μεταβλητές αφορούν στη θέση του διπόλου ενώ η τέταρτη επιλέγει κάποιο από τα σημεία παρατήρησης και οι τιμές του

πεδίου σε αυτή τη θέση χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του διπόλου. Χρησιμοποιώντας αυτές τις 4 μεταβλητές, οι μαγνητικές ροπές υπολογίζονται μέσω ενός γραμμικού συστήματος.

7.2. Μαθηματική ανάλυση του προβλήματος

Όμοια με το κεφάλαιο 4 για την ανάλυση του MDM ισχύει:

Το EUT βρίσκεται στην αρχή των αξόνων. Τα m_i , $i=1,\dots,N$ είναι τα μαγνητικά δίπολα από τα οποία αποτελείται το ισοδύναμο μοντέλο που θα υπολογίσει ο αλγόριθμος. Οι θέσεις των διπόλων είναι (x_i, y_i, z_i) . η μαγνητική ροπή του κάθε διπόλου είναι:

$$\vec{m}_i = m_{x_i} \cdot \hat{x} + m_{y_i} \cdot \hat{y} + m_{z_i} \cdot \hat{z} \quad (7.1)$$

Τα M σημεία παρατήρησης είναι τοποθετημένα στα σημεία (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) , όπου $j=1,\dots,M$.

Το μαγνητικό πεδίο του διπόλου i στο σημείο παρατήρησης j εκφράζεται ως η υπέρθεση των B_x, B_y, B_z :

$$\vec{B}_{ij} = B_{x_{ij}} \cdot \hat{x} + B_{y_{ij}} \cdot \hat{y} + B_{z_{ij}} \cdot \hat{z} \quad (7.2)$$

Όπου,

$$B_{x_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3 \cdot (x_{0j} - x_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{m_{x_i}}{\rho_{ij}^3}$$

$$B_{y_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3 \cdot (y_{0j} - y_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{m_{y_i}}{\rho_{ij}^3} \quad (7.3)$$

$$B_{z_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3 \cdot (z_{0j} - z_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{m_{z_i}}{\rho_{ij}^3}$$

$$L_{ij} = m_{x_i} \cdot (x_{0j} - x_i) + m_{y_i} \cdot (y_{0j} - y_i) + m_{z_i} \cdot (z_{0j} - z_i) \quad (7.4)$$

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_{0j} - x_i)^2 + (y_{0j} - y_i)^2 + (z_{0j} - z_i)^2} \quad (7.5)$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης j υπολογίζεται:

$$\vec{B}_j = \sum_1^n B_{x_{ij}} \cdot \hat{x} + \sum_1^n B_{y_{ij}} \cdot \hat{y} + \sum_1^n B_{z_{ij}} \cdot \hat{z} \quad (7.6)$$

Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις (7.3)-(7.6) είναι γραμμικές ως προς τις συνιστώσες των μαγνητικών ροπών $m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i}$. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν γραμμικά ως προς τις συνιστώσες αυτές σύμφωνα με τις θέσεις των διπόλων (x_i, y_i, z_i) και τις θέσεις παρατήρησης (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) . Για να είναι δυνατό αυτό να συμβεί μόνο N μετρήσεις από τα M σημεία παρατήρησης πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Για τις μετρήσεις κάθε σημείου παρατήρησης B_{m_j} , όταν το συνολικό μαγνητικό πεδίο θεωρείται ίσο με το μετρούμενο η εξίσωση (7.6) γίνεται:

$$\vec{B}_j = \vec{B}_{m_j}, j = 1, 2, \dots, M \quad (7.7)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να λυθεί ως προς τις συνιστώσες των μαγνητικών ροπών και έτσι τα $m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i}$ να εκφραστούν σαν συναρτήσεις των θέσεων των διπόλων (x_i, y_i, z_i) , των θέσεων παρατήρησης (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) και των τιμών του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο παρατήρησης B_{m_j} . Για γνωστά σημεία παρατήρησης και γνωστές θέσεις διπόλων η παραπάνω εξίσωση μπορεί να υπολογίσει τις μαγνητικές ροπές κάθε διπόλου όταν οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου $B_{m_{x_j}}, B_{m_{y_j}}, B_{m_{z_j}}$ έχουν μετρηθεί στα σημεία παρατήρησης M .

Ένας $(3 \times M)$ πίνακας \mathbf{TBm} εισάγεται για να συμπεριλάβει τις μετρήσεις, τα στοιχεία των οποίων, TBM_{ij} , $i=1,2,3$ και $j= 1,2,\dots,M$, είναι ίσα με τις συνιστώσες του αντίστοιχου μαγνητικού πεδίου $B_{m_{x_j}}, B_{m_{y_j}}, B_{m_{z_j}}$. Αυτές οι μετρήσεις αντιπροσωπεύουν ένα στιγμιότυπο του μαγνητικού πεδίου του EUT.

Γενικά, για να καθοριστεί το MDM ενός EUT χρειάζονται $N \times 6$ μεταβλητές, όπου N ο αριθμός των διπόλων του MDM. Ο νέος αλγόριθμος συνδυάζει τα ευρεστικά πλεονεκτήματα της ταχύτερης εξερεύνησης του χώρου λύσεων ενώ παράλληλα, ικανοποιεί τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τις αναλυτικές εξισώσεις (7.3)-(7.6) για τη μείωση του χώρου αναζήτησης.

7.3. Αλγόριθμος

Αρχικά καθορίζονται ο αριθμός (N) των διπόλων που συνθέτουν το MDM και ο αριθμός των σημείων παρατήρησης (M) και οι θέσεις τους (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) . Έπειτα, οι

εικονικές μετρήσεις στα M σημεία παρατήρησης συνθέτουν τον πίνακα **TBm** (μεγέθους $3 \times M$).

Η προτεινόμενη μέθοδος, αντί να χειρίζεται $N \times 6$ μεταβλητές για να επιλύσει το πρόβλημα, χειρίζεται $N \times 4$ μεταβλητές σαν είσοδο στους γενετικούς αλγόριθμους. Οι πρώτες $N \times 3$ μεταβλητές είναι οι θέσεις των N διπόλων (x_i, y_i, z_i) , $i=1, 2, \dots, N$. οι υπόλοιπες N μεταβλητές, στην συνέχεια θα αναφέρονται ως $\text{chr}(i)$, $i=1, 2, \dots, N$, είναι οι στήλες του πίνακα **TBm** (στον οποίο εκπροσωπούνται οι θέσεις μέτρησης) τις οποίες επιλέγει ο αλγόριθμος για να επιλύσει το $N \times N$ γραμμικό σύστημα που προκύπτει από την εξίσωση (7.7). Είναι σαφές πως το $\text{chr}(i)$ μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως M . Ο λόγος που το πλήθος των $\text{chr}(i)$ είναι N είναι γιατί το σύστημα που πρέπει να λυθεί, για να βρεθούν οι μαγνητικές ροπές των N διπόλων, χρειάζεται N σημεία παρατήρησης για να είναι καθορισμένο και επιλύσιμο. Αυτό επίσης σημαίνει πως σε κάθε γενιά δυο $\text{chr}(i)$ δεν μπορούν να πάρουν την ίδια τιμή. Η μέθοδος δεν χειρίζεται τις μαγνητικές ροπές σαν άγνωστες μεταβλητές για τον γενετικό αλγόριθμο.

Σε κάθε γενιά, ο γενετικός αλγόριθμος αποδίδει τιμές στις μεταβλητές θέσης (x_i, y_i, z_i) καθώς και στο $\text{chr}(i)$. Σε αυτό το σημείο ένα παράδειγμα παρουσιάζεται για να γίνει περισσότερο κατανοητή η χρήση των μεταβλητών $\text{chr}(i)$.

Ένα MDM αποτελείται από 3 δίπολα, κατά συνέπεια $N=3$, και το μαγνητικό πεδίο του μετράται σε 36 θέσεις παρατήρησης, άρα $M=36$. Στην γενιά n , υποθετικά, ο γενετικός αλγόριθμος αποδίδει τις τιμές 5, 24 και 33 στις μεταβλητές $\text{chr}(i)$ (δηλαδή $\text{chr}(1)=5$, $\text{chr}(2)=24$ και $\text{chr}(3)=33$). Αυτό σημαίνει πως η 5_n , η 24_n και η 33_n στήλες του πίνακα **TBm** θα χρησιμοποιηθούν στην n γενιά για την επίλυση του γραμμικού συστήματος.

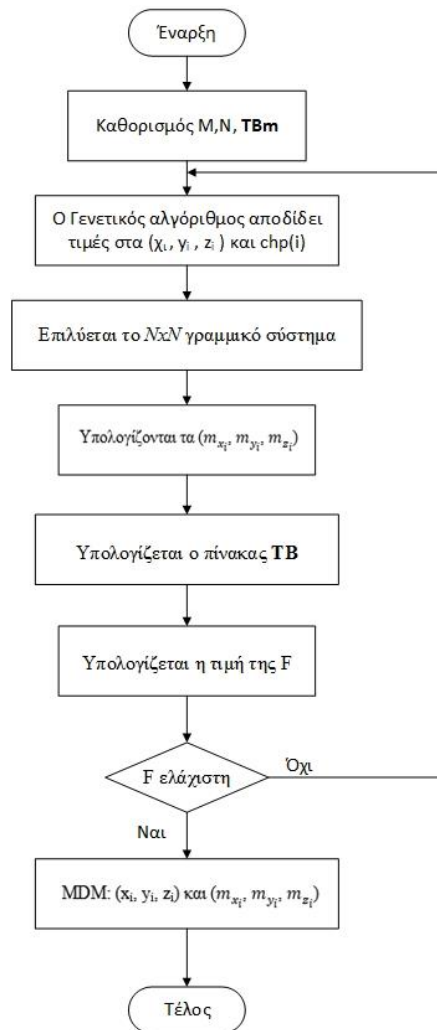
Έπειτα, ο αλγόριθμος επιλύει το $N \times N$ σύστημα με τις τιμές που έχουν ανατεθεί από τον γενετικό αλγόριθμο στις μεταβλητές και βρίσκει τις τιμές των μαγνητικών ροπών $(m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i})$ για κάθε δίπολο. Στη συνέχεια, για τις θέσεις (x_i, y_i, z_i) που έχει αποδώσει ο γενετικός και για τις μαγνητικές ροπές $(m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i})$ που προέκυψαν από το σύστημα, για κάθε δίπολο, στη συγκεκριμένη γενιά, το συνολικό μαγνητικό πεδίο αυτού του σετ διπόλων υπολογίζεται στα M σημεία παρατήρησης από τις εξισώσεις (7.3)-(7.6). Το μαγνητικό πεδίο που μόλις υπολογίστηκε περιλαμβάνεται

σε έναν ($3 \times M$) πίνακα **TB**. Οι τιμές των στοιχείων του **TB**, TB_{ij} , είναι οι τιμές των συνιστωσών ($Bm_{x_j}, Bm_{y_j}, Bm_{z_j}$) αντίστοιχα.

Στη μέθοδο που παρουσιάζεται, η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η καταλληλότητα κάθε γενιάς είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μεταξύ των τιμών των πινάκων **TB** και **TBm**.

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^M (TB_{ij} - TBm_{ij})^2}{3 \cdot M}} \quad (7.8)$$

Σύγκλιση της μεθόδου επιτυγχάνεται όταν η F γίνει 0 ή όταν για κάποιο αριθμό γενεών η τιμή της δεν βελτιώνεται. Το αποτέλεσμα είναι ένα υποβέλτιστο MDM καθοριζόμενο από τα (x_i, y_i, z_i) και $(m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i})$ για κάθε δίπολο. Στην Εικόνα 7.1 παρουσιάζεται και το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Εικόνα 7.1 - Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου

7.4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Για την αξιολόγηση της μεθόδου πρόβλεψης MDM δοκιμάστηκαν 3 διαφορετικές περιπτώσεις EUT. Αρχικά δοκιμάζεται η ικανότητα της μεθόδου να προβλέπει με ακρίβεια το MDM καθώς ο αριθμός των σημείων παρατήρησης μειώνεται. Έπειτα, δοκιμάζεται η ακρίβεια καθώς η απόσταση παρατήρησης αυξάνεται. Τέλος, εξετάζεται η σημασία της επιλογής αριθμού διπόλων που αποτελούν το MDM στην ακρίβεια του τελικού μοντέλου.

7.4.1 Περίπτωση A:

Ένα σετ 2 διπόλων τοποθετημένα στα $(-10, 0, 0)$ και $(10, 0, 0)$ cm αποτελούν το EUT. Οι μαγνητικές ροπές των διπόλων είναι $(0, 0, -30)$ και $(0, 0, 30)$ mA m^2 αντίστοιχα. Το θεωρητικό πεδίο που παράγει αυτό το EUT υπολογίζεται από τις εξισώσεις (7.3)-(7.6) και περιλαμβάνεται στον πίνακα **TBth**. Σε αυτή τη περίπτωση το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται για 5 διαφορετικά M σημεία παρατήρησης (36, 24, 18, 12, 6) τοποθετημένα σε κύκλο με ακτίνα 40 cm γύρω από το EUT. Έτσι, προκύπτουν 5 **TBth** πίνακες. Ο στόχος είναι να μελετηθεί η ακρίβεια πρόβλεψης του αλγορίθμου καθώς ο αριθμός των σημείων παρατήρησης μειώνεται.

Για τη δημιουργία εικονικών μετρήσεων, κάθε θεωρητικό πεδίο διαταράσσεται τυχαία κατά μέγιστο 5% και 10%. Αυτές οι εικονικές μετρήσεις περιέχονται σε 5 διαφορετικούς πίνακες **TBm** ($3 \times M$) για κάθε επίπεδο παραμόρφωσης.

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, το MDM για κάθε περίπτωση μπορεί να προβλεφτεί χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο M , **TBm** ($3 \times M$) και $N = 2$. Τα 5 MDM που προέκυψαν, ένα για κάθε M με 5% παραμόρφωση, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

Σημειώνεται πως κάθε ένα από τα MDM είναι αποδεκτό σαν μοντέλο του EUT συγκριτικά με τις θεωρητικές θέσεις και μαγνητικές ροπές των διπόλων.

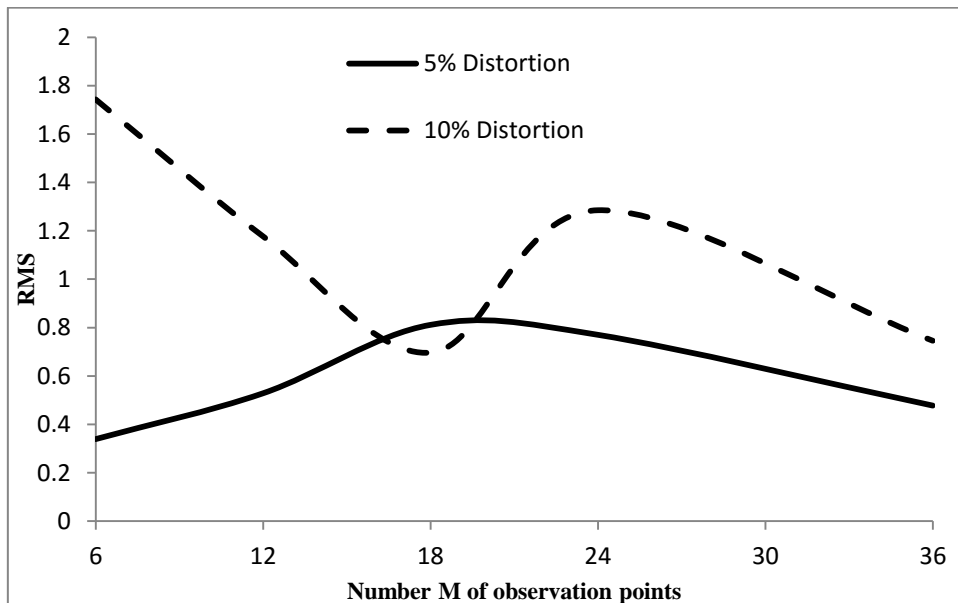
Για τη σύγκριση των 5 MDM που προέκυψαν, υπολογίζεται το θεωρητικό πεδίο για το κάθε ένα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (7.3)-(7.6), σε 36 σημεία σε κύκλο ακτίνας 40cm. Έπειτα το RMS ανάμεσα στο αρχικό θεωρητικό πεδίο **TBth** και στα θεωρητικά πεδία των MDM υπολογίζεται. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για 10% επίπεδο παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.2.

Πίνακας 7.1 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις 5 διαφορετικές τιμές σημείων παρατήρησης

5%	MDM 36		MDM 24		MDM 18	
$x (cm)$	-9.9663	9.7779	-10.186	10.3484	-9.0551	9.3289
$y (cm)$	0.024	0.068	0.0562	0.0322	0.0882	0.1199
$z (cm)$	0.0122	0.0114	0.0526	0.0533	0.0559	0.0492
$m_x (mA\cdot m^2)$	0.0103	0.0124	0.023	0.0579	0.0724	0.0182
$m_y (mA\cdot m^2)$	-0.0057	-0.001	0.0315	-0.0254	0.0016	-0.0057
$m_z (mA\cdot m^2)$	-30.8076	30.7248	-29.0802	29.0943	-32.8772	33.0578

	MDM 12		MDM 6	
$x (cm)$	-10.0973	9.9631	10.1284	-9.9704
$y (cm)$	0.249	0.1085	-0.1628	-0.055
$z (cm)$	0.0536	0.0491	0.0556	0.0628
$m_x (mA\cdot m^2)$	0.0628	0.0361	0.0558	0.0714
$m_y (mA\cdot m^2)$	-0.0039	0.0199	0.0001	-0.0002
$m_z (mA\cdot m^2)$	-29.7136	29.7725	29.7815	-29.9749

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 7.2, το RMS δεν αλλάζει σημαντικά καθώς μειώνεται ο αριθμός των σημείων παρατήρησης.



Εικόνα 7.2 - Σύγκριση τιμών RMS όσο αυξάνουν τα σημεία παρατήρησης

Επί του παρόντος, στην διεθνή πρακτική, ο αριθμός των σημείων παρατήρησης που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί το μαγνητικό πεδίο ενός EUT είναι συνήθως 36 με αποτέλεσμα οι εγκαταστάσεις μέτρησης να είναι πολύ σύνθετες και επιπλέον πολύ ακριβές. Αυτή η μελέτη παρόλα αυτά, δείχνει ότι ένα MDM μπορεί να υπολογιστεί,

με ακρίβεια, με λιγότερα σημεία παρατήρησης και κατά συνέπεια με πιο οικονομικές εγκαταστάσεις.

7.4.2 Περίπτωση Β:

Σε αυτή τη περίπτωση, θα ελεγχθεί η ακρίβεια του αλγορίθμου στην πρόβλεψη του MDM, του EUT της περίπτωσης Α, καθώς η ακτίνα του κύκλου, πάνω στον οποίο βρίσκονται τα σημεία παρατήρησης, αλλάζει.

Αρχικά, το θεωρητικό πεδίο του EUT υπολογίζεται με τις εξισώσεις (7.3)-(7.6). Ο αριθμός των σημείων παρατήρησης, M , είναι 36 ενώ η ακτίνα του κύκλου παίρνει τις τιμές 20, 40, 60, 80, 100 cm. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές ακτίνας στις εξισώσεις (7.3)-(7.6), 5 πίνακες μαγνητικού πεδίου, **T_{Bth}**, δημιουργούνται, ένας για κάθε τιμή ακτίνας.

Για να δημιουργηθούν εικονικές μετρήσεις, όμοια με την περίπτωση Α, οι τιμές των πινάκων **T_{Bth}** διαταράσσονται τυχαία κατά μέγιστο 5% και παράγονται 5 πίνακες **T_{Bm}** που περιλαμβάνουν τις εικονικές μετρήσεις που θα χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του MDM για κάθε τιμή ακτίνας. Χρησιμοποιώντας κάθε **T_{Bm}** σαν είσοδο στον αλγόριθμο με $N=2$ και $M=36$, παράγονται τα 5 MDM. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

Από τον Πίνακα 7.2 εύκολα φαίνεται πως, καθώς η ακτίνα του κύκλου αυξάνει, η ακρίβεια του προβλεπόμενου MDM μειώνεται. Αυτό γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας αύξηση της απόκλισης των θέσεων και των μαγνητικών ροπών των διπόλων όσο αυξάνει η ακτίνα. Από ένα σημείο και έπειτα, το προβλεπόμενο MDM δεν προσεγγίζει καθόλου το αρχικό θεωρητικό. Αυτό σημαίνει πως τα σημεία παρατήρησης πρέπει να είναι τοποθετημένα μέσα στο κοντινό πεδίο του EUT, όσο πιο κοντά γίνεται, ώστε οι τιμές του πεδίου να είναι αρκετά μεγάλες αφενός, για να υπάρχει μεγάλος σηματοθορυβικός λόγος (κατά συνέπεια ακριβέστερες μετρήσεις) και αφετέρου, για να μπορεί να τις χειριστεί ο αλγόριθμος.

Πίνακας 7.2 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις πέντε διαφορετικές τιμές απόστασης των σημείων παρατήρησης

5%	MDM 20 cm		MDM 40 cm		MDM 60 cm	
$x (cm)$	-10.0179	10.1027	-10.1217	9.9572	-8.7982	8.6225
$y (cm)$	0.0646	-0.0385	0.0269	0.0917	-0.0527	-0.1184
$z (cm)$	0.0136	0.0037	0.0222	0.0443	0.3195	0.3239
$m_x (mA\cdot m^2)$	0.0601	0.0124	0.0053	0.0588	0.1388	0.145
$m_y (mA\cdot m^2)$	0.0003	0.0032	-0.0009	-0.0129	-0.0861	0.0875
$m_z (mA\cdot m^2)$	-29.6468	29.4596	-29.9156	29.9544	-34.7427	34.7153
	MDM 80 cm		MDM 100 cm			
$x (cm)$	3.9146	-3.6602	-2.1288	1.6025		
$y (cm)$	0.0621	0.0769	0.0823	0.0922		
$z (cm)$	0.3832	0.4482	0.7021	0.701		
$m_x (mA\cdot m^2)$	-0.2682	0.495	0.2207	0.0242		
$m_y (mA\cdot m^2)$	-0.0031	0.0525	-0.2931	0.301		
$m_z (mA\cdot m^2)$	81.7268	-81.7357	-164.805	164.8092		

7.4.3 Περίπτωση Γ:

Σε αυτή τη μελέτη θα ερευνηθεί ο αντίκτυπος της σωστής επιλογής αριθμού διπόλων που θα αποτελούν το MDM στην ακρίβεια του τελικού μοντέλου. Ως EUT θεωρείται ένα σετ 3 διπόλων τοποθετημένα στις θέσεις (0, 10, 0), (10, 0, 0), και (0, 0, 0) cm. Οι μαγνητικές ροπές είναι (100, 100, 100), (200, 200, 200), και (300, 300, 300) mA \cdot m² αντίστοιχα. Το θεωρητικό μαγνητικό πεδίο που παράγεται από αυτό το σετ διπόλων υπολογίζεται από τις εξισώσεις (7.3)-(7.6) για $M=36$, δημιουργώντας τον **TBth** πίνακα.

Οι εικονικές μετρήσεις παράγονται, όπως και στις περιπτώσεις A και B, διαταράσσοντας τον πίνακα **TBth** κατά μέγιστο 5% δημιουργώντας τον πίνακα **TBm**. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα **TBm**, $M=36$ και λύνοντας 4 φορές για $N=1, 2, 3, 4$ παράγονται 4 MDM αποτελούμενα από 1, 2, 3 και 4 δίπολα αντίστοιχα. Τα παραγόμενα MDM παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

Για κάθε MDM, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (7.3)-(7.6), υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο στις ίδιες θέσεις παρατήρησης που είχαν δημιουργηθεί και οι εικονικές μετρήσεις. Στον Πίνακα 7.4 περιλαμβάνονται οι τιμές RMS μεταξύ του

κάθε προβλεπόμενου MDM και των εικονικών μετρήσεων καθώς και οι τιμές RMS μεταξύ του κάθε MDM και των θεωρητικών τιμών πεδίου του αρχικού σετ διπόλων.

Πίνακας 7.3 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις τέσσερις επιλογές αριθμού διπόλων που αποτελούν το μοντέλο

	MDM 1 διπόλου	MDM 2 διπόλων		MDM 3 διπόλων		
$x (cm)$	3.3781	13.3214	1.9145	12.9081	1.481	1.4772
$y (cm)$	1.667	-1.0331	2.3683	1.239	7.622	0.6885
$z (cm)$	-0.0544	-1.1717	0.3626	-1.1164	-0.3731	1.2359
$m_x (mAm^2)$	629.5518	80.6158	523.9853	129.4107	156.9876	305.6584
$m_y (mAm^2)$	611.5882	68.2062	539.9763	50.0382	152.671	401.5244
$m_z (mAm^2)$	645.303	68.722	558.3609	85.3599	35.4819	506.2884
		MDM 4 διπόλων				
$x (cm)$		2.9808	9.0473	6.4079	0.0063	
$y (cm)$		3.2288	2.9859	-0.0336	2.0102	
$z (cm)$		3.2841	2.2699	3.2852	3.5991	
$m_x (mAm^2)$		1,965.20	785.4	-1,307.40	-840	
$m_y (mAm^2)$		1714.2	-683.1	-471	43.4	
$m_z (mAm^2)$		-1119.2	-51.6	754.1	1018.1	

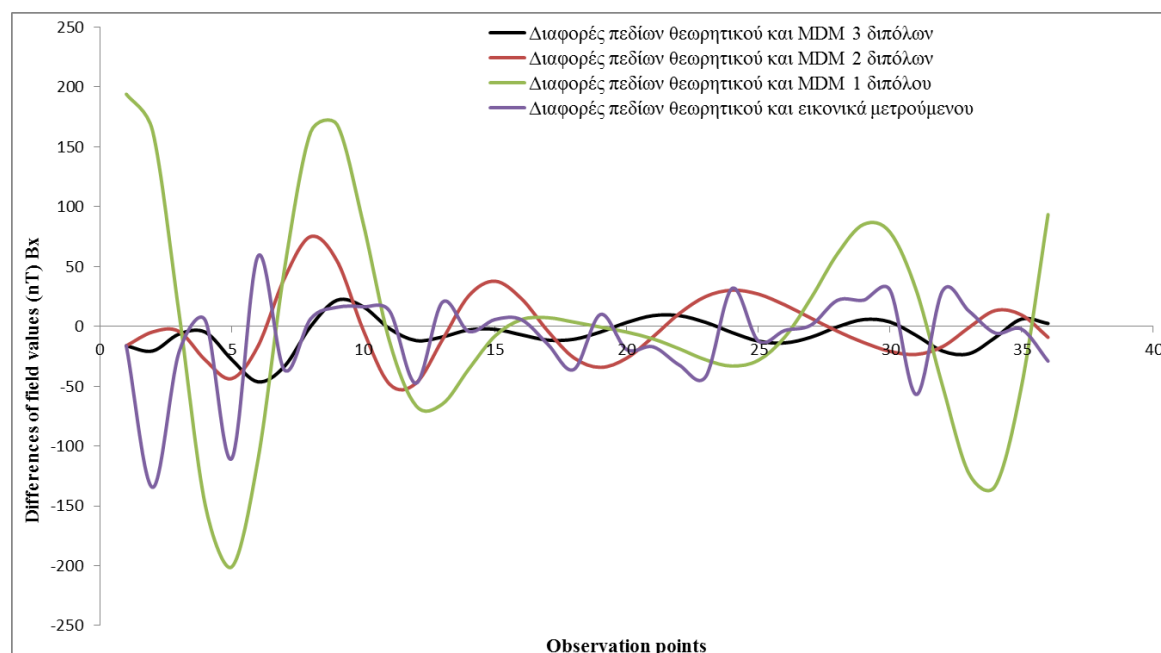
Από τον Πίνακα 7.4 παρατηρείται πως κάθε MDM είναι αποδεκτό ως προς την ακρίβεια του σε όρους RMS. Επιπλέον κάθε MDM παράγει μαγνητικό πεδίο πιο κοντά στο θεωρητικό από το «εικονικά» μετρούμενο.

Πίνακας 7.4 - RMS μεταξύ εικονικών μετρήσεων και παραγόμενων πεδίων των MDM του Πίνακα 7.3

	MDM 1 διπόλου	MDM 2 διπόλων	MDM 3 διπόλων	MDM 4 διπόλων
RMS (MDM-measurements)	81.506	39.9431	30.4256	31.5029
RMS (theoretical-MDM)	76.5968	28.675	14.9165	18.6536

Ενδεικτικά, στην Εικόνα 7.3 παρουσιάζονται οι διαφορές των πεδίων των MDM 1,2 και 3 διπόλων με το θεωρητικό και για αναφορά περιλαμβάνονται και οι διαφορές των εικονικών μετρήσεων με το θεωρητικό πεδίο. Η μωβ γραμμή είναι οι διαφορές των εικονικών μετρήσεων με το θεωρητικό πεδίο. Η μαύρη γραμμή δείχνει τη διαφορά του θεωρητικού πεδίου με το MDM 3 διπόλων. Οι κόκκινη και η πράσινη

γραμμή είναι οι διαφορές μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και των MDM 2 και 1 διπόλων αντίστοιχα.



Εικόνα 7.3 - Σύγκριση των διαφορών πεδίων των MDM 1, 2, 3 διπόλων και των εικονικών μετρήσεων από το θεωρητικό πεδίο

Από την Εικόνα 7.3 φαίνεται ότι, ενώ κάθε MDM είναι αποδεκτό σαν μοντέλο του αρχικού EUT, ο αριθμός των διπόλων που επιλέγεται για τη μοντελοποίηση παίζει σημαντικό ρόλο. Παρόλα αυτά, εφόσον στην πράξη δεν είναι γνωστός εξ αρχής ο κατάλληλος αριθμός των διπόλων για τη μοντελοποίηση, ο αλγόριθμος μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια διάφορα MDM για διαφορετικές τιμές N . Η διαδικασία θα μπορεί να ξεκινάει με MDM 1 διπόλου και να αυξάνει το N μέχρι να μην υπάρχει βελτίωση στην ακρίβεια του MDM. Τέλος, παρατηρείται πως για πιο δύσκολα MDM (MDM αποτελούμενα από περισσότερα των 2 διπόλων) είναι αποδεκτές περισσότερες της μίας λύσεις για τη μοντελοποίηση ενός EUT.

7.5. Υλοποίηση με PSO

Πραγματοποιήθηκε υλοποίηση του ίδιου αλγορίθμου με βάση την μέθοδο βελτιστοποίησης PSO. Η λογική των μεταβλητών, της απόδοσης τιμών στις μεταβλητές και η επίλυση με σύστημα είναι ακριβώς ίδια. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία πρώτη προσομοίωση της υλοποίησης με PSO. Είναι η περίπτωση Α που δοκιμάστηκε παραπάνω για $M=36$ σημεία παρατήρησης. Το μοντέλο που προκύπτει φαίνεται στον Πίνακα 7.5

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο αλγόριθμος υλοποιημένος με PSO μπορεί να προβλέψει με μεγάλη ακρίβεια το αρχικό μοντέλο.

Πίνακας 7.5 - MDM για 5% παραμόρφωση

5%	MDM	
$x (cm)$	-10.2057	10.3255
$y (cm)$	0.0085	-0.0961
$z (cm)$	0	0
$m_x (mA\cdot m^2)$	-0.0001	0.0003
$m_y (mA\cdot m^2)$	0.0006	-0.0006
$m_z (mA\cdot m^2)$	-29.1081	29.2485

Προσθήκη θορύβου περιβάλλοντος

Επιπλέον της σχετικής παραμόρφωσης (%), που εκφράζει εν μέρει και την αβεβαιότητα, κατά τη διαδικασία παραγωγής εικονικών μετρήσεων στη συνέχεια γίνεται προσθήκη θορύβου του περιβάλλοντος. Αυτό εκφράζει ένα σχετικό επίπεδο σφάλματος που παρουσιάζεται σε μετρήσεις και είναι της τάξης 250pT – 1nT. Για την εισαγωγή του στη διαδικασία παραγωγής των εικονικών μετρήσεων, οι τιμές του θορύβου περιβάλλοντος παράγονται τυχαία από μία κανονική κατανομή με μέση τιμή $\mu=0$ και τυπική απόκλιση $\sigma=1$.

Το επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος, αν και σχετικά μικρό, μπορεί να δυσκολέψει πολύ την διαδικασία μοντελοποίησης εάν οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου δεν έχουν γίνει αρκετά κοντά στο EUT.

Η περίπτωση Α δοκιμάστηκε εκ νέου προσθέτοντας και θόρυβο περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6. Αξίζει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκε η υλοποίηση με PSO.

Και πάλι παρατηρείται η σημασία της απόστασης των σημείων παρατήρησης αφού όταν απομακρύνονται πολύ από το EUT το μοντέλο που προκύπτει αποκλίνει από το θεωρητικό (60cm και μετά). Η μοντελοποίηση έγινε με χρήση της PSO υλοποίησης.

Μετά και την προσθήκη του θορύβου περιβάλλοντος, οι εικονικές μετρήσεις προσεγγίζουν περισσότερο τις πραγματικές. Παρόλα αυτά η μέθοδος επίλυσης που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο είναι ικανή να προβλέψει με ακρίβεια το MDM ενός EUT.

Πίνακας 7.6 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις 5 διαφορετικές τιμές σημείων παρατήρησης

5%	MDM 36		MDM 24		MDM 18	
$x (cm)$	10.2418	-10.0576	-10.0436	10.0402	-9.7085	9.8561
$y (cm)$	0.0144	-0.0724	0.0019	-0.0051	0.1241	0.0922
$z (cm)$	-0.6138	-0.595	0.465	0.5702	-0.733	-0.7254
$m_x (mAm^2)$	-0.6251	-0.61	0.2905	0.9286	-0.7021	-0.7
$m_y (mAm^2)$	0.0519	0.0129	-0.0181	0.3721	0.0284	0.0272
$m_z (mAm^2)$	28.988	-30.2733	-29.5157	30.0496	-30.6309	30.7602

	MDM 12		MDM 6	
$x (cm)$	-10.3974	10.6772	10.6171	-10.0109
$y (cm)$	0.114	0.0141	0.0717	-0.0511
$z (cm)$	-0.0945	-0.0956	-0.299	-0.2935
$m_x (mAm^2)$	-0.0841	-0.0848	-0.2764	-0.2692
$m_y (mAm^2)$	0.0039	0.0039	-0.0016	-0.0019
$m_z (mAm^2)$	-28.4991	27.8909	28.719	-29.7756

Αντίστοιχα δοκιμάστηκε και η περίπτωση Β. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.7.

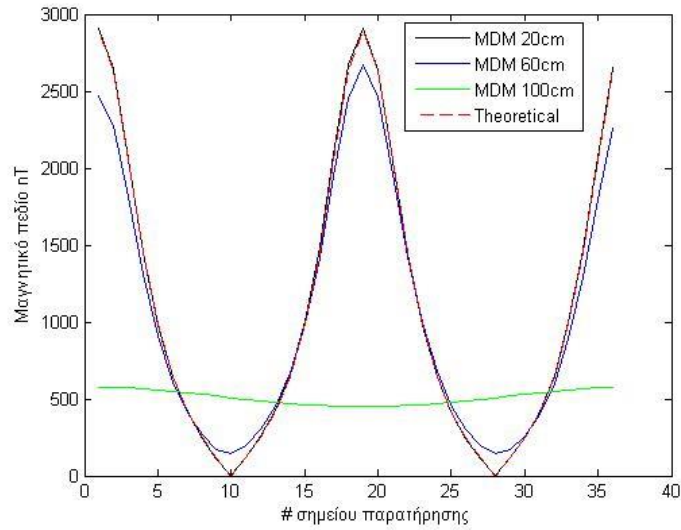
Για να τονιστεί η σημασία της ακρίβειας του τελικού μοντέλου στην μελέτη μαγνητικής καθαρότητας θα χρησιμοποιηθούν τα MDM 20 cm, MDM 60 cm και MDM 100 cm του Πίνακα 7.7. Χρησιμοποιώντας τις θέσεις και τις ροπές του κάθε MDM υπολογίζεται το πεδίο που παράγεται όταν τα 36 σημεία παρατήρησης βρίσκονται σε κύκλους ακτίνων 20, 60 και 100 cm. Ομοίως, υπολογίζεται και το παραγόμενο πεδίο από το θεωρητικό μοντέλο στις ίδιες θέσεις για λόγους σύγκρισης.

Πίνακας 7.7 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις πέντε διαφορετικές τιμές απόστασης των σημείων παρατήρησης

5%	MDM 20 cm		MDM 40 cm		MDM 60 cm	
$x (cm)$	10.0024	-9.9886	-9.9958	9.8473	-10.3343	10.5069
$y (cm)$	-0.027	0.0646	-0.0716	-0.0876	-0.0034	0.0237
$z (cm)$	-0.0005	-0.0021	-0.4495	-0.4243	5.606	6.0797
$m_x (mA\cdot m^2)$	-0.0063	-0.0166	-0.4125	-0.2623	2.3797	2.3982
$m_y (mA\cdot m^2)$	-0.0201	-0.0024	0.0688	0.1108	-0.1427	-0.1511
$m_z (mA\cdot m^2)$	30.1487	-30.2992	-30.2807	30.4438	-30.7216	28.3703
	MDM 80 cm		MDM 100 cm			
$x (cm)$	5.7587	-5.2266	2.9088	-1.713		
$y (cm)$	0.148	0.089	-0.0767	4.7229		
$z (cm)$	-4.0609	-3.6789	32.1966	-137.754		
$m_x (mA\cdot m^2)$	-0.6606	-0.634	8.8001	-10.2837		
$m_y (mA\cdot m^2)$	1.0507	1.1519	-0.9811	-33.8117		
$m_z (mA\cdot m^2)$	53.5136	-59.1713	151.719	395.6624		

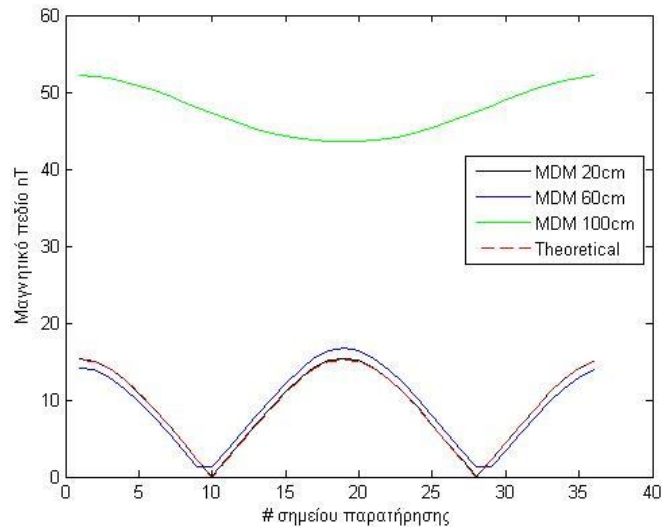
Στις εικόνες που ακολουθούν η μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει το πεδίο που παράγει το MDM 20cm, η μπλε γραμμή το πεδίο που παράγει το MDM 60cm, η πράσινη το πεδίο που παράγει το MDM 100cm και η κόκκινη (διακεκομμένη) το πεδίο που παράγει το θεωρητικό μοντέλο.

Στην Εικόνα 7.4 ο υπολογισμός του πεδίου έχει γίνει για ακτίνα 20cm. Όπως ήταν αναμενόμενο το MDM 20cm σχεδόν ταυτίζεται με το θεωρητικό, το MDM 60cm βρίσκεται αρκετά κοντά στα περισσότερα σημεία παρατήρησης (σε κάποιες θέσεις αποκλίνει μέχρι και περίπου 500 nT) ενώ το MDM 100cm δεν πλησιάζει καθόλου το θεωρητικό.



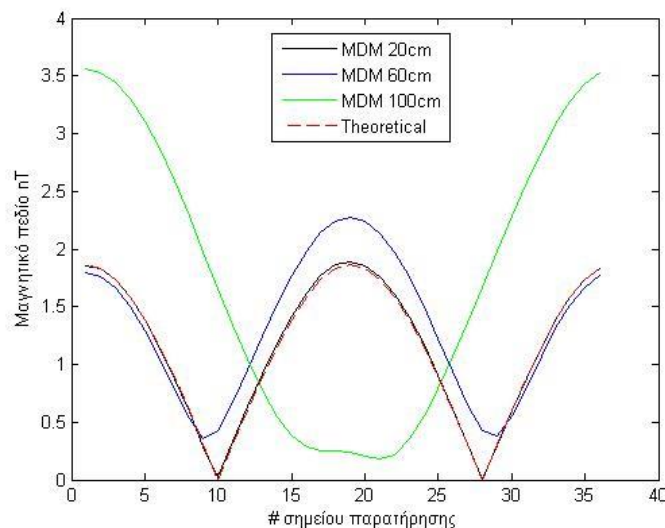
Εικόνα 7.4 - Σύγκριση των μαγνητικών πεδίων των επιλεγμένων MDM του Πίνακα 7.7 με το θεωρητικό όταν τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται σε απόσταση 20 cm

Στην Εικόνα 7.5 ο υπολογισμός του πεδίου έγινε για ακτίνα 60cm. Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά των MDM με πριν μόνο που τώρα ξεχωρίζει περισσότερο η απόκλιση της μαγνητικής συμπεριφοράς του MDM 100 cm από το θεωρητικό.



Εικόνα 7.5 - Σύγκριση των μαγνητικών πεδίων των επιλεγμένων MDM του Πίνακα 7.7 με το θεωρητικό όταν τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται σε απόσταση 60 cm

Τέλος στην Εικόνα 7.6 το πεδίο υπολογίστηκε σε ακτίνα 100cm. Προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα αλλά τονίζεται και η απόκλιση της μαγνητικής συμπεριφοράς του MDM 60 cm.



Εικόνα 7.6 - Σύγκριση των μαγνητικών πεδίων των επιλεγμένων MDM του Πίνακα 7.7 με το θεωρητικό όταν τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται σε απόσταση 100 cm

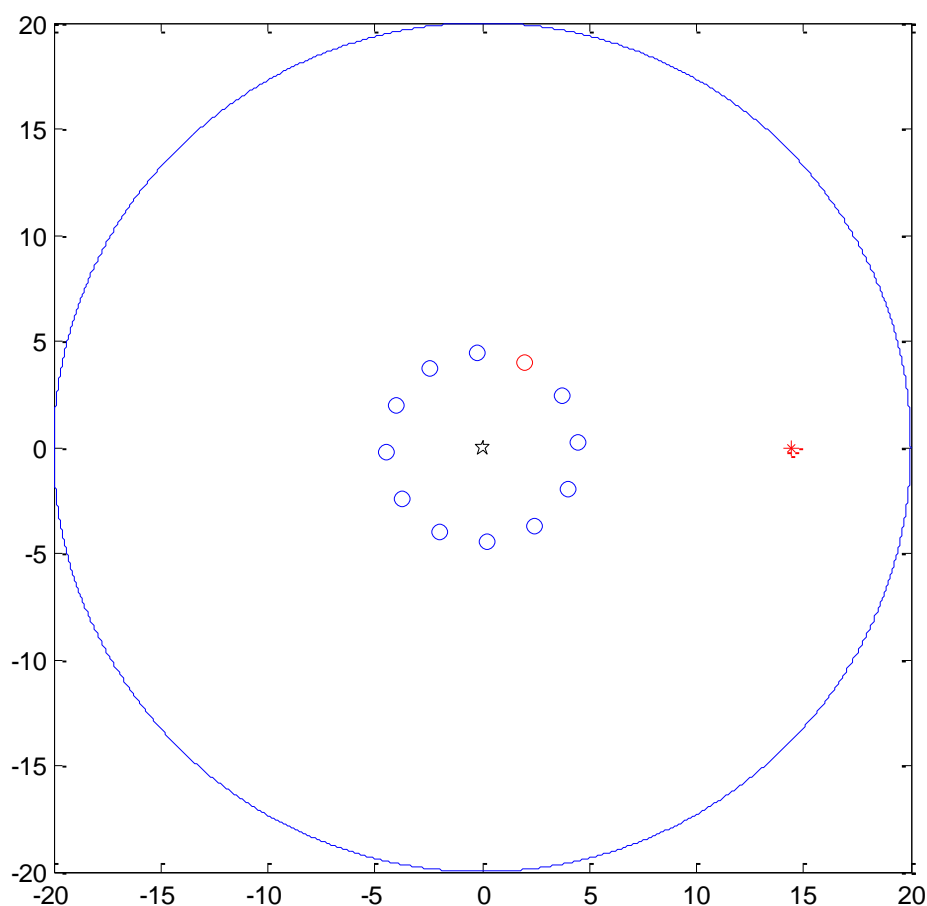
Στις μελέτες μαγνητικής καθαρότητας ο σκοπός είναι να υπολογιστεί το συνολικό πεδίο σε κάποιες συγκεκριμένες θέσεις (θέσεις μαγνητομέτρων των διαστημικών αποστολών) και έπειτα με διάφορες τεχνικές να αντισταθμιστεί αυτό το συνολικό πεδίο έτσι ώστε τα σημεία να γίνουν μαγνητικά καθαρά (το συνολικό πεδίο να είναι της τάξης 0.1-1nT). Για να μπορεί να υπολογιστεί το πεδίο κάθε συσκευής (EUT) του διαστημοπλοίου σε οποιαδήποτε θέση υπολογίζεται το αντίστοιχο MDM και έπειτα από αυτό το MDM μελετάται η μαγνητική συμπεριφορά του EUT. Από τις εικόνες παραπάνω γίνεται σαφές ότι εάν το MDM δεν είναι ακριβές, η μαγνητική συμπεριφορά που αναμένεται σε άλλες θέσεις αποκλίνει από την πραγματική σημαντικά. Δεδομένου ότι ο τελικός στόχος είναι συνολικό πεδίο μικρότερο του 1nT και λαμβάνοντας υπόψη ότι τα EUT (και τα ισοδύναμα MDM) μέσα σε ένα σκάφος είναι τουλάχιστον μερικές δεκάδες, η ακρίβεια του μοντέλου είναι ύψιστης σημασίας.

7.6. Μελέτη διατάξεων τοποθέτησης των μαγνητομέτρων

Στα πλαίσια της έρευνας αυτής της διατριβής θεωρήθηκε σκόπιμο να δοκιμαστούν εναλλακτικές διατάξεις για την τοποθέτηση των μαγνητομέτρων.

Μέχρι στιγμής, στην διεθνή πρακτική (όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο) ο τρόπος λήψης των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου ενός EUT γίνεται με τη χρήση ενός μαγνητομέτρου και περιστροφή του τραπεζιού για την λήψη πολλαπλών μετρήσεων σε άλλες γωνίες (Εικόνα 7.7). Ο κόκκινος αστερίσκος (*)

είναι το σημείο αναφοράς του μαγνητομέτρου, ο κόκκινος κύκλος (ο) είναι η αρχική θέση και τέλος οι μπλε μικροί κύκλοι (ο) δείχνουν τις θέσεις που να πάρει το EUT κατά την περιστροφή του τραπεζιού για τις απαραίτητες μετρήσεις (στην περίπτωση εδώ είναι 12 μετρήσεις).



Εικόνα 7.7 - Περιγραφή διαδικασίας μέτρησης με περιστροφή

Τα τελευταία χρόνια παρόλα αυτά, υπάρχει μία δραστηριοποίηση για την αλλαγή αυτής της διαδικασίας λήψης της μαγνητικής υπογραφής ενός EUT. Πιο συγκεκριμένα, αντί να υπάρχει περιστροφή και μόνο ένα μαγνητόμετρο, η νέα μεθοδολογία θα χρησιμοποιεί περισσότερα του ενός μαγνητόμετρα σε διάφορες θέσεις, σταθερό τραπέζι και η λήψη της μαγνητικής υπογραφής του EUT θα γίνεται με την ταυτόχρονη λήψη του πεδίου από όλα τα μαγνητόμετρα, δηλαδή σε ένα στιγμιότυπο. Η νέα μεθοδολογία ξεπερνά κάποια προβλήματα που υπήρχαν στην διαδικασία μετρήσεων και για αυτό έχει επιλεγθεί για τη θεωρητική μελέτη αυτής της διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, με την τεχνική του στιγμιότυπου η μέτρηση γίνεται με τρόπο A-B-A, δηλαδή λήψη πρώτα του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος (A), τοποθέτηση του EUT και ταυτόχρονη μέτρηση από όλα τα μαγνητόμετρα (B) και

τέλος αφαίρεση του EUT και εκ νέου μέτρηση του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος (A). Στη συνέχεια, με επεξεργασία αφαιρείται ο θόρυβος του περιβάλλοντος (λαμβάνοντας υπόψη και την πριν και τη μετά την τοποθέτηση του EUT μέτρηση) και λαμβάνεται το στιγμιότυπο στο αντίστοιχο software. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφονται παράγοντες αβεβαιότητας όπως:

- Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος στον χρόνο που μεσολαβεί στις διαδοχικές μετρήσεις της παλιάς μεθόδου.
- Τα DC-offsets στα μαγνητόμετρα που υπάρχουν και δεν είναι σταθερά από χρήση σε χρήση.
- Απλοποίηση της κατασκευής της εγκατάστασης πχ, δεν χρειάζεται το σύστημα μαγνήτισης/απομαγνήτισης και το σύστημα πηνίων για αντιστάθμιση του πεδίου της γης.

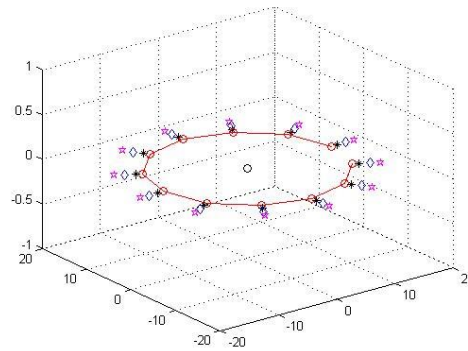
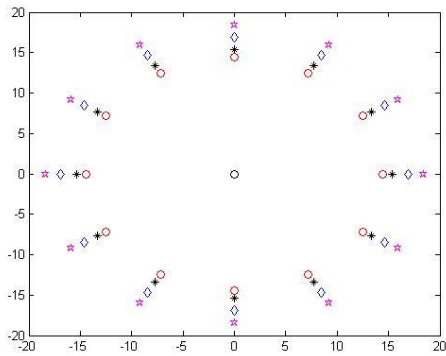
Παρόλα αυτά, ενδέχεται να είναι πιο μεγάλο το κόστος της εγκατάστασης λόγω του αυξημένου αριθμού μαγνητομέτρων.

Στη συνέχεια θα εξεταστούν 4 πιθανές διατάξεις για την τοποθέτηση των μαγνητομέτρων για $M=12$ μαγνητόμετρα. Οι παράμετροι των διατάξεων (πχ. ακτίνες, αριθμός μαγνητομέτρων, γωνίες κλπ) είναι ενδεικτικές. Επιπλέον θα αξιολογηθούν ως προς την επίδοση τους με προσομοίωση.

7.6.1 Διάταξη 1

Η διάταξη που πλησιάζει περισσότερο στην παλαιότερη λογική είναι η τοποθέτηση των μαγνητομέτρων σε ένα κύκλο με κέντρο το κέντρο του τραπεζιού, στο ίδιο επίπεδο με το τραπέζι (όχι κατ' ανάγκη) και με σταθερή γωνία ανά μαγνητόμετρο. Δηλαδή η διάταξη που έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής στα προηγούμενα κεφάλαια και απεικονίζεται στην Εικόνα 7.8.

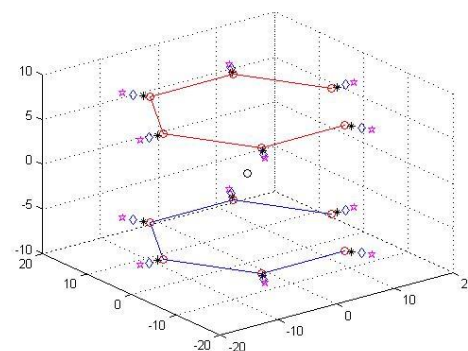
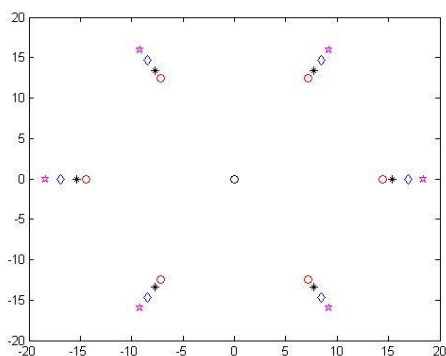
Στην Εικόνα 7.8 ο κόκκινος κύκλος (ο) αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς του κάθε μαγνητομέτρου ενώ τα σύμβολα πίσω από το σημείο αναφοράς είναι οι θέσεις των αισθητήρων για την μέτρηση των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου. Ανάλογα τον τύπο του μαγνητομέτρου αλλάζει η απόσταση και η σειρά των αισθητήρων από το σημείο αναφοράς.



Εικόνα 7.8 - Διάταξη 1 σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση

7.6.2 Διάταξη 2

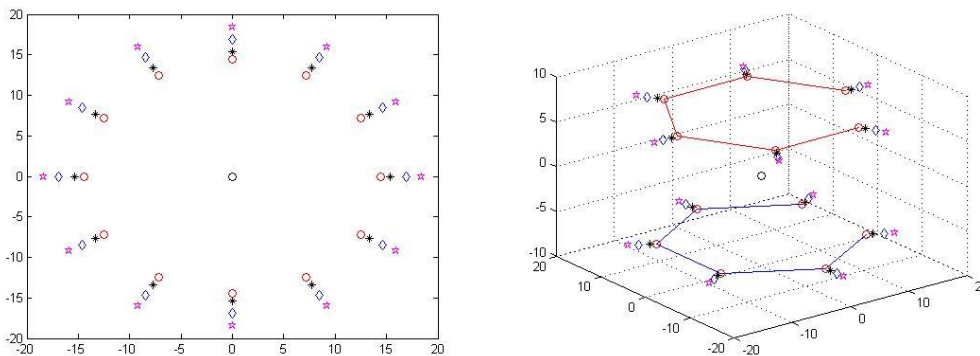
Σε αυτή τη διάταξη, αντί να τοποθετηθούν τα μαγνητόμετρα όλα στο ίδιο επίπεδο (σε ένα κύκλο), τοποθετούνται σε δύο κύκλους (ή αλλιώς επίπεδα), ομόκεντρους, ίδιας ακτίνας αλλά ο ένας κύκλος βρίσκεται πάνω από το επίπεδο του τραπεζιού ενώ ο άλλος κάτω. Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται σε ίδιες γωνίες στα δύο επίπεδα. Στην Εικόνα 7.9 απεικονίζεται η διάταξη αυτή. Όπως και πριν, ο κόκκινος κύκλος (ο) αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς του κάθε μαγνητομέτρου ενώ τα σύμβολα πίσω από αυτόν είναι οι θέσεις των αισθητήρων μέτρησης. Επιπλέον φαίνονται τα δύο διαφορετικά επίπεδα τοποθέτησης των μαγνητομέτρων (μπλε και κόκκινη γραμμή). Στην κάτοψη φαίνονται μόνο 6 από τα 12 μαγνητόμετρα γιατί όπως ήδη αναφέρθηκε τα μαγνητόμετρα βρίσκονται σε ίδιες γωνίες. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι μπορεί να μετρήσει το μαγνητικό πεδίο του EUT λαμβάνοντας μεγαλύτερη σε όρους όγκου κάλυψη.



Εικόνα 7.9 - Διάταξη 2 σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση

7.6.3 Διάταξη 3

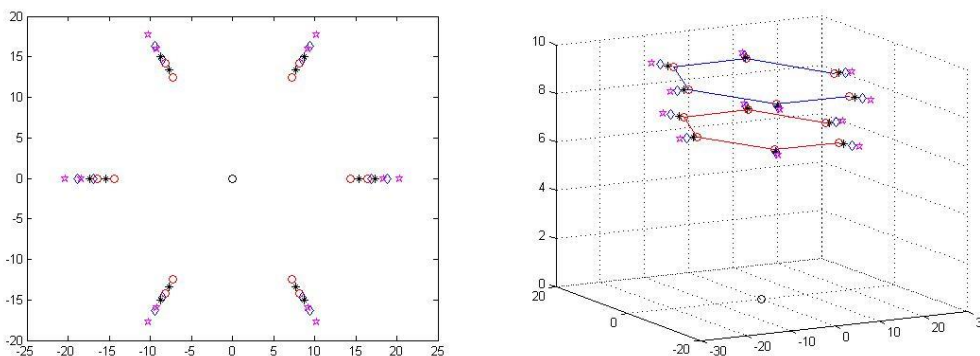
Η διάταξη αυτή διαφέρει από την διάταξη 2 μόνο στο ότι τα μαγνητόμετρα δεν είναι τοποθετημένα στις ίδιες γωνίες στα δύο επίπεδα αλλά είναι μετατοπισμένα κατά 30° μεταξύ των επιπέδων. Στην Εικόνα 7.10 απεικονίζεται η διάταξη αυτή. Όπως και πριν, ο κόκκινος κύκλος (ο) αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς του κάθε μαγνητομέτρου ενώ τα σύμβολα πίσω από αυτόν είναι οι θέσεις των αισθητήρων μέτρησης. Επιπλέον φαίνονται τα δύο διαφορετικά επίπεδα τοποθέτησης των μαγνητομέτρων (μπλε και κόκκινη γραμμή). Στην κάτοψη φαίνονται και τα 12 μαγνητόμετρα γιατί όπως ήδη αναφέρθηκε τα μαγνητόμετρα του ενός επιπέδου είναι μετατοπισμένα κατά 30° σχετικά με του άλλου επιπέδου.



Εικόνα 7.10 - Διάταξη 3 σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση

7.6.4 Διάταξη 4

Σε αυτή τη διάταξη επιλέγονται πάλι 2 κύκλοι (επίπεδα) για την τοποθέτηση των μαγνητομέτρων αλλά διαφέρουν σε ακτίνες και επιπλέον βρίσκονται σχετικά κοντά μεταξύ τους. Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται σε ίδιες γωνίες στα δύο επίπεδα. Στην Εικόνα 7.11 απεικονίζεται η διάταξη αυτή.



Εικόνα 7.11 - Διάταξη 4 σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση

Όπως και πριν, ο κόκκινος κύκλος (ο) αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς του κάθε μαγνητομέτρου ενώ τα σύμβολα πίσω από αυτόν είναι οι θέσεις των αισθητήρων μέτρησης. Επιπλέον φαίνονται τα δύο διαφορετικά επίπεδα τοποθέτησης των μαγνητομέτρων (μπλε και κόκκινη γραμμή). Στην κάτοψη φαίνονται και τα 12 μαγνητόμετρα τα οποία βρίσκονται σε ίδιες γωνίες αλλά σε διαφορετικές ακτίνες με αποτέλεσμα να επικαλύπτονται. Η σκέψη πίσω από την επιλογή τέτοιας τοποθέτησης των μαγνητομέτρων είναι η πιθανή χρησιμοποίηση των τιμών των κοντινών μαγνητομέτρων για τον υπολογισμό της κλίσης (gradient) του μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με τον τύπο

$$\Delta B = \frac{f(x+h)-f(x)}{h} \quad (7.9)$$

7.6.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Για την αξιολόγηση των 4 διατάξεων θα δοκιμαστεί η επίδοση τους σε όρους ακρίβειας του παραγόμενου MDM από την μαγνητική υπογραφή που κάθε διάταξη λαμβάνει.

Αρχικά επιλέγεται το EUT που θα χρησιμοποιηθεί, το οποίο θα είναι το ίδιο για όλες τις διατάξεις και παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.8. Το EUT αποτελείται από 2 δίπολα.

Πίνακας 7.8 - Θεωρητικό EUT

x (cm)	11.5	-8.5
y (cm)	1.5	1.5
z (cm)	1.5	1.5
m_x (mAm ²)	0	0
m_y (mAm ²)	0	0
m_z (mAm ²)	30	30

Από αυτό το EUT παράγεται το μαγνητικό πεδίο του στις θέσεις των μαγνητομέτρων της κάθε διάταξης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\vec{B}_{d_j} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left[\frac{3(\vec{m}_d \cdot \hat{\rho}_{d_j})\hat{\rho}_{d_j}}{\rho_{d_j}^3} - \frac{\vec{m}_d}{\rho_{d_j}^3} \right] \quad (7.10)$$

όπου, $\vec{m}_d = m_{x_d} \cdot \hat{x} + m_{y_d} \cdot \hat{y} + m_{z_d} \cdot \hat{z}$ και (x_d, y_d, z_d) είναι η μαγνητική ροπή και η θέση της πηγής αντίστοιχα και

$$\rho_{d_j} = \sqrt{(x_{0_j} - x_d)^2 + (y_{0_j} - y_d)^2 + (z_{0_j} - z_d)^2} \quad (7.11)$$

είναι η απόσταση της πηγής από τις πραγματικές θέσεις (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) των σημείων παρατήρησης.

Για την παραγωγή εικονικών μετρήσεων, τα πεδία που υπολογίστηκαν παραπάνω για κάθε διάταξη, διαταράσσονται. Οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου διαταράσσονται κατά μέγιστο q σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\begin{cases} B_{dx_j} = B_{dx_j} + (q \cdot rand - q \cdot rand) \cdot B_{dx_j} \\ B_{dy_j} = B_{dy_j} + (q \cdot rand - q \cdot rand) \cdot B_{dy_j} \\ B_{dz_j} = B_{dz_j} + (q \cdot rand - q \cdot rand) \cdot B_{dz_j} \end{cases} \quad (7.12)$$

όπου, $q = 5\%$ είναι το μέγιστο ποσοστό διαταραχής και η συνάρτηση $rand$ παίρνει τιμές μεταξύ $[0, 1]$ ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή.

Στην συνέχεια, για κάθε διάταξη, δίνουμε στον αλγόριθμο (υλοποίηση με PSO) σαν είσοδο τα διαταραγμένα πεδία και προκύπτουν τα MDM που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.9.

Πίνακας 7.9 - Παρουσίαση MDM από κάθε διάταξη

	MDM Διατ. #1		MDM Διατ. #2		MDM Διατ. #3		MDM Διατ. #4	
$x (cm)$	11.3308	-8.3212	11.5447	-8.5197	11.3492	-8.5681	11.6969	-8.5246
$y (cm)$	1.4715	1.5953	1.5485	1.4619	1.6057	1.3886	1.5537	1.3037
$z (cm)$	1.5574	1.4459	1.4899	1.5991	1.5407	1.4296	1.4698	1.4728
$m_x (mA \cdot m^2)$	-0.2608	0.5925	-0.1753	-0.1532	-0.0404	0.1577	-0.1541	0.0482
$m_y (mA \cdot m^2)$	-0.1309	0.1812	0.0375	0.1325	-0.0248	-0.1272	-0.0049	0.0602
$m_z (mA \cdot m^2)$	30.6144	30.9277	29.4886	29.5588	30.5435	29.7773	29.5906	29.6655

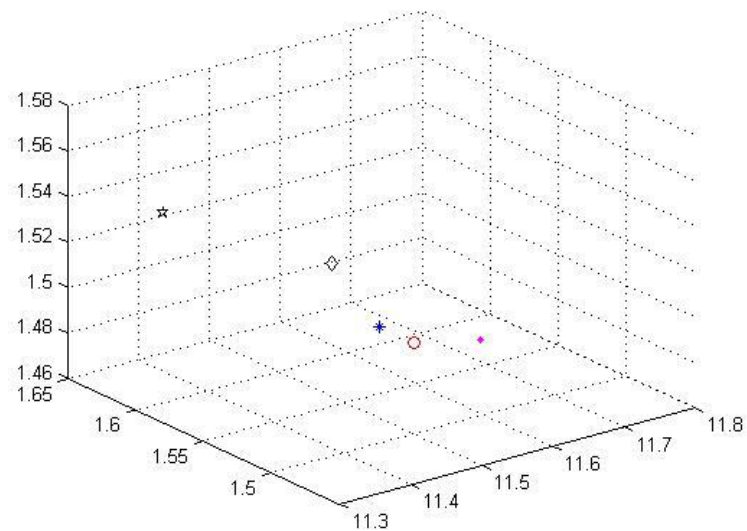
Τα MDM που προκύπτουν είναι όλα πολύ κοντά στο θεωρητικό όμως, για να γίνει αξιολόγηση ακριβέστερα θα υπολογιστεί η απόσταση κάθε διπόλου του κάθε MDM από το θεωρητικό και τα αποτελέσματα περιλαμβάνονται στον Πίνακα 7.10.

Πίνακας 7.10 - Απόσταση διπόλων από τα αντίστοιχα θεωρητικά

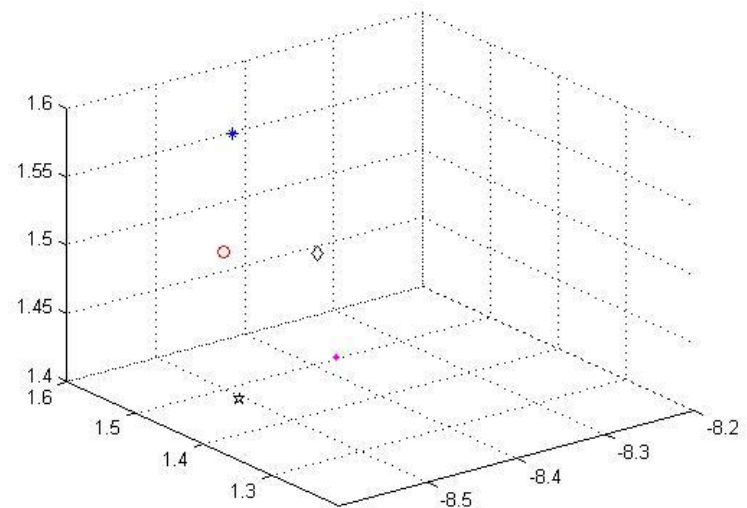
	Διάταξη 1	Διάταξη 2	Διάταξη 3	Διάταξη 4
Δίπολο 1 (cm)	0.18093	0.06673	0.1886	0.20631
Δίπολο 2 (cm)	0.20971	0.10798	0.14834	0.1997

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η διάταξη 2 έχει δώσει το κοντινότερο MDM στο θεωρητικό EUT ενώ η διάταξη 3 που μοιάζει αρκετά με την διάταξη 2 ήταν η επόμενη καλύτερη.

Στις Εικόνες 7.12 και 7.13 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα δίπολα του Πίνακα 7.9. Στην Εικόνα 7.12 φαίνεται το θεωρητικό δίπολο 1 με κόκκινο κύκλο (ο), ενώ κατά σειρά διάταξης 1, 2, 3, 4 παρουσιάζονται με μαύρο ρόμβο, μπλε αστερίσκο, μαύρο πεντάγωνο και πορφυρή κουκίδα οι θέσεις του διπόλου 1 κάθε διάταξης. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 7.13 παρουσιάζονται οι θέσεις του διπόλου 2.



Εικόνα 7.12 - Θέσεις διπόλου 1 των MDM κάθε διάταξης συγκριτικά με το θεωρητικό



Εικόνα 7.13 - Θέσεις διπόλου 2 των MDM κάθε διάταξης συγκριτικά με το θεωρητικό
Επίσης φαίνεται ότι το MDM της διάταξης 2 (μπλε αστερίσκος) βρίσκεται πιο κοντά στο θεωρητικό EUT.

7.7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μία μέθοδος υπολογισμού MDM χρησιμοποιώντας μετρήσεις του κοντινού πεδίου ενός EUT. Στη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται μείωση των παραμέτρων προς εύρεση για κάθε δίπολο σε τέσσερις (αντί για έξι). Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε τρεις περιπτώσεις για την ικανότητά του να επιλύσει το πρόβλημα και τα αποτελέσματα δείχνουν πως το MDM που προκύπτει έχει μεγάλη ακρίβεια σε κάθε περίπτωση. Παράλληλα μελετήθηκε η σημασία του αριθμού των σημείων παρατήρησης, της απόστασης των σημείων παρατήρησης από το EUT καθώς και του αριθμού των διπόλων που θα αποτελούν το MDM, στην μελέτη μαγνητικής καθαρότητας. Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως για ακριβή υπολογισμό MDM δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν 36 σημεία παρατήρησης αλλά είναι πολύ σημαντικό οι θέσεις των σημείων παρατήρησης να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά το EUT. Επιπλέον, δεδομένου ότι σε πραγματικές εφαρμογές δεν είναι εκ των προτέρων γνωστός ο κατάλληλος αριθμός διπόλων για το MDM, για πιο ακριβή αποτελέσματα είναι απαραίτητο να γίνονται δοκιμές για MDM με παραπάνω από ένα δίπολα και να επιλέγεται το καλύτερο.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τέσσερις διατάξεις τοποθέτησης των 12 σημείων παρατήρησης και με χρήση του αλγορίθμου αυτού του κεφαλαίου έγινε έλεγχος αυτών των διατάξεων για εύρεση της πιο ικανής στην λήψη μαγνητικού στιγμιότυπου. Για τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκε ένα EUT δύο διπόλων του οποίου το πεδίο διαταράχθηκε κατά μέγιστο 5% για την παραγωγή εικονικών μετρήσεων στα σημεία παρατήρησης κάθε διάταξης. Η διάταξη 2 ξεχώρισε ως καλύτερη.

Σύμφωνα με τη μελέτη αυτού του κεφαλαίου για να υπολογιστεί με ακρίβεια ένα MDM πρέπει αρχικά να γίνει σωστή και προσεκτική επιλογή των παραμέτρων (διάταξη, απόσταση και αριθμός μαγνητομέτρων) για σωστή μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής του EUT. Επιπλέον, πρέπει να μετρηθούν με ακρίβεια, ή να υπολογιστούν με βαθμονόμηση, τα σημεία παρατήρησης του μαγνητικού πεδίου και να γίνει σωστή επιλογή του αριθμού των διπόλων που θα αποτελέσουν το MDM για να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερη η μοντελοποίηση. Τέλος, ο αλγόριθμος θα μπορέσει να υπολογίσει με ακρίβεια τις παραμέτρους του MDM.

Αναφορές

- [1] S.Weikert, K. Mehlem, and A.Wiegand, “Spacecraft magnetic cleanliness prediction and control,” in Proc. ESA Workshop Aerosp. EMC, May 21–23, 2012, pp. 1–5.
- [2] E. Carrubba, A. Junge, F. Marliani, and A. Monorchio, “Particle swarm optimization to solve multiple dipole modelling problems in space applications,” in Proc. ESA Workshop Aerosp. EMC, May 21–23, 2012, pp. 1–6.
- [3] N.Wahlstrom, J. Callmer, and F. Gustafsson, “Single target tracking using vector magnetometers,” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process., May 22–27, 2011, pp. 4332–4335.
- [4] N.Wahlstrom and F. Gustafsson, “Magnetometer modeling and validation for tracking metallic targets,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 3, pp. 545–556, Feb. 1, 2014
- [5] N. C. Kapsalis, S.-D. J. Kakarakis, and C. N. Capsalis, “Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms,” *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, vol. 34, pp. 111–122, 2012.
- [6] K. Mehlem, “Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 14, no. 5, pp. 1064–1071, Sep. 1978.
- [7] K. Mehlem, A. Wiegand, and S. Weickert, “New developments in magnetostatic cleanliness modeling,” in Proc. ESA Workshop Aerosp. EMC, May 21–23, 2012, pp. 1–6.
- [8] J. C. Springmann, J.W. Cutler, and H. Bahcivan, “Magnetic sensor calibration and residual dipole characterization for application to nanosatellites,” presented at the AIAA/AAS Astrodyn. Spec. Conf., Toronto, ON, Canada, Aug. 2–5, 2010.
- [9] A. Junge and F. Marliani, “Prediction of DC magnetic fields for magnetic cleanliness on spacecraft,” in Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., Aug. 14–19, 2011, pp. 834–839.
- [10] O. Dumond and R. Berge, “Determination of the magnetic moment with spherical measurements and spherical harmonics modelling,” in Proc. ESA Workshop Aerosp. EMC, May 21–23, 2012, pp. 1–5.

Κεφάλαιο 8 - Εφαρμογή σε πραγματικές μετρήσεις

8.1. Εισαγωγή

Στα πλαίσια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διατριβής, δόθηκε η δυνατότητα λήψης πραγματικών μετρήσεων με χρήση μίας διάταξης δύο μαγνητομέτρων (κεφάλαιο 5, Εικόνα 5.3). Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει δύο μαγνητόμετρα της Bartington Instruments και το σύστημα λήψης δεδομένων (DAQ) της National Instruments. Ο εξοπλισμός αυτός βρέθηκε διαθέσιμος στα πλαίσια του προγράμματος “Multi-Magnetometer Methods for Magnetic Dipole Modelling (4000111736/14/NL/GLC)”, της ESA, του οποίου η θεωρητική μελέτη ολοκληρώθηκε επιτυχώς στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων, Ε.Μ.Π., με διευθυντή τον Καθηγητή Χ. Καψάλη και έγινε αποδεκτή από την ESA τον Μάρτιο του 2015.

Όπως αναπτύχθηκε παραπάνω, η διαδικασία μέτρησης του μαγνητικού πεδίου που λήφθηκε υπόψη στη θεωρητική μελέτη βασίζεται στην λογική του στιγμιότυπου, δηλαδή, πολλά μαγνητόμετρα σε διάφορες θέσεις, σταθερό EUT και ταυτόχρονη λήψη πεδίου από όλα τα μαγνητόμετρα. Λόγω του περιορισμού της διαθέσιμης διάταξης όμως, έπρεπε να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις στην υλοποίηση χωρίς όμως να αλλάζει ο πυρήνας του αλγορίθμου για τον υπολογισμό του MDM. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα μαγνητόμετρο για την λήψη των μετρήσεων σε σταθερή θέση, το EUT περιστρεφόταν με βήμα 30° και κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου έγιναν μικρές τροποποιήσεις για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στη θέση του μαγνητομέτρου καθώς στρέφεται το EUT στις διάφορες γωνίες μέτρησης. Ουσιαστικά, αντί να υπάρχουν πολλά μαγνητόμετρα (M) γύρω από το EUT, γίνονται (M) μετρήσεις σε διάφορες γωνίες. Επιπλέον, όλες οι μετρήσεις προσεγγίζουν τη διάταξη 1.

Στο υπόλοιπο κεφάλαιο, για τον περιορισμό της επανάληψης, το μαγνητόμετρο βρίσκεται στη θέση (14.4, 0, 7) cm και ο αριθμός των περιστροφών για τη λήψη μετρήσεων είναι $M=12$, δηλαδή με βήμα 30° .

8.2. Υπολογισμός MDM με χρήση του αλγορίθμου του

Κεφαλαίου 4

8.2.1 Περίπτωση 1

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης περίπτωσης χρησιμοποιήθηκε ένα πηνίο που δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ιδανικό. Τα χαρακτηριστικά του είναι (i) Κυκλικό σχήμα, (ii) Διάμετρος $D=50$ mm, (iii) Αριθμός περιελίξεων $N=295$ (+/- 2%) και (iv) Το ρεύμα $I=35$ mA. Η μαγνητική ροπή του έχει μέτρο περίπου 20.4 mA m^2 . Το πηνίο τοποθετήθηκε στη θέση (2, -2, 1.25) cm και πραγματοποιήθηκε μέτρηση του μαγνητικού του πεδίου. Το MDM που προέκυψε παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.1. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου είναι της τάξης του 6% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 1.53%.

Πίνακας 8.1 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

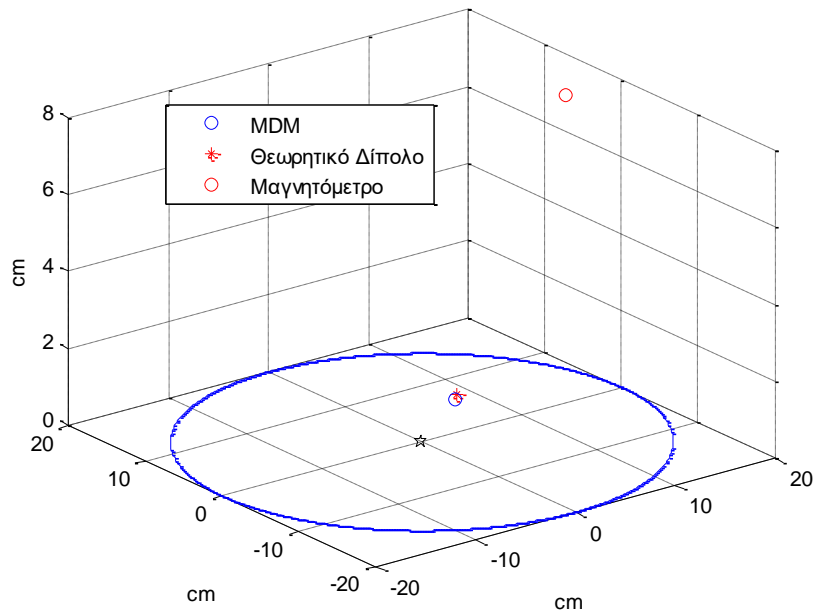
x (cm)	1.9418
y (cm)	-1.8811
z (cm)	1.1168
m_x (mA m^2)	-0.8327
m_y (mA m^2)	-0.3005
m_z (mA m^2)	-20.5158

Στην Εικόνα 8.1 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητομέτρου.

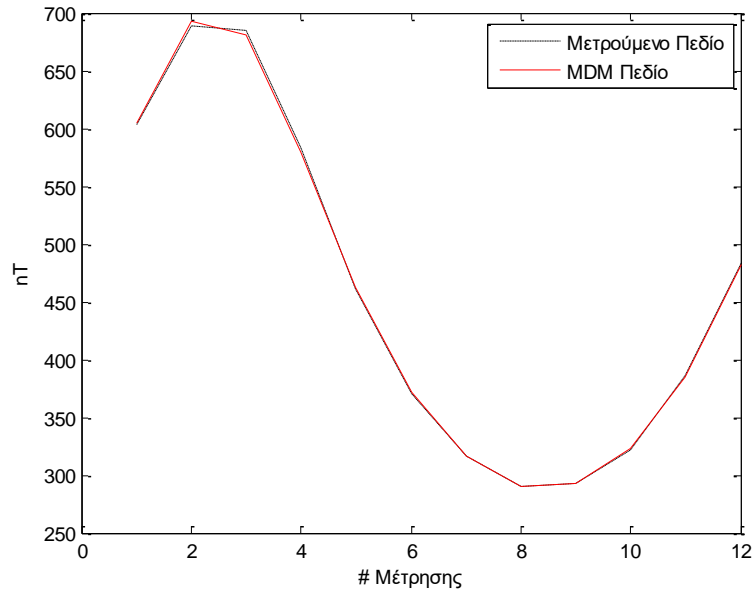
Από τον Πίνακα 8.1 και από την Εικόνα 8.1 φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προέκυψε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια παρόλο που το σφάλμα των μετρήσεων ήταν σχετικά μεγάλο (6%).

Στην Εικόνα 8.2 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη

γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δείγμα της καλής προσέγγισης του αλγορίθμου στο MDM.



Εικόνα 8.1 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.



Εικόνα 8.2 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

8.2.2 Περίπτωση 2

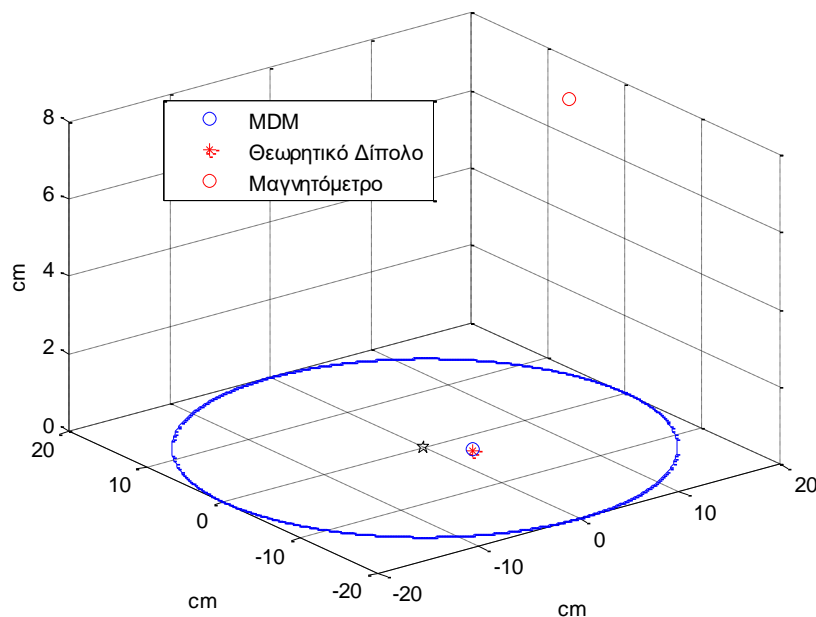
Εδώ ως EUT χρησιμοποιήθηκε ένας μη-ιδανικός μαγνήτης με μέτρο μαγνητικής ροπής περίπου 30 mAm^2 τοποθετημένος στο $(1, -5, 0.3) \text{ cm}$ και έγινε μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγει. Το MDM που έλυσε ο αλγόριθμος φαίνεται στον

Πίνακα 8.2. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου είναι της τάξης του 7% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 1.57%.

Πίνακας 8.2 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

$x (cm)$	1.0355
$y (cm)$	-4.8256
$z (cm)$	0.3224
$m_x (mA\cdot m^2)$	1.2868
$m_y (mA\cdot m^2)$	-0.8927
$m_z (mA\cdot m^2)$	27.6034

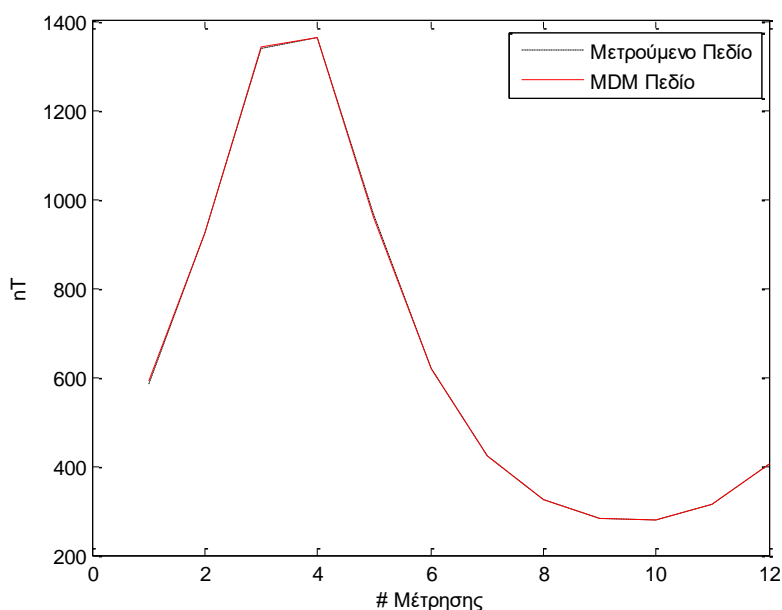
Στην Εικόνα 8.3 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητόμετρου.



Εικόνα 8.3 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.

Από τον Πίνακα 8.2 και από την Εικόνα 8.3 φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προέκυψε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια παρόλο που το σφάλμα των μετρήσεων ήταν σχετικά μεγάλο (7%).

Στην Εικόνα 8.4 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δείγμα της καλής προσέγγισης του αλγορίθμου στο MDM.



Εικόνα 8.4 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

8.2.3 Περίπτωση 3

Σε αυτή την περίπτωση ως EUT χρησιμοποιήθηκε ένα σετ δύο μαγνητών τοποθετημένων στις θέσεις (7, 0, 2.3) και (-3, -1, 2.3) cm με μέτρο μαγνητικών ροών περίπου 30 και 150 mAm² αντίστοιχα. Το MDM που προκύπτει μετά την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγει αυτό το σετ μαγνητών παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.3. Στην Εικόνα 8.5 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητομέτρου.

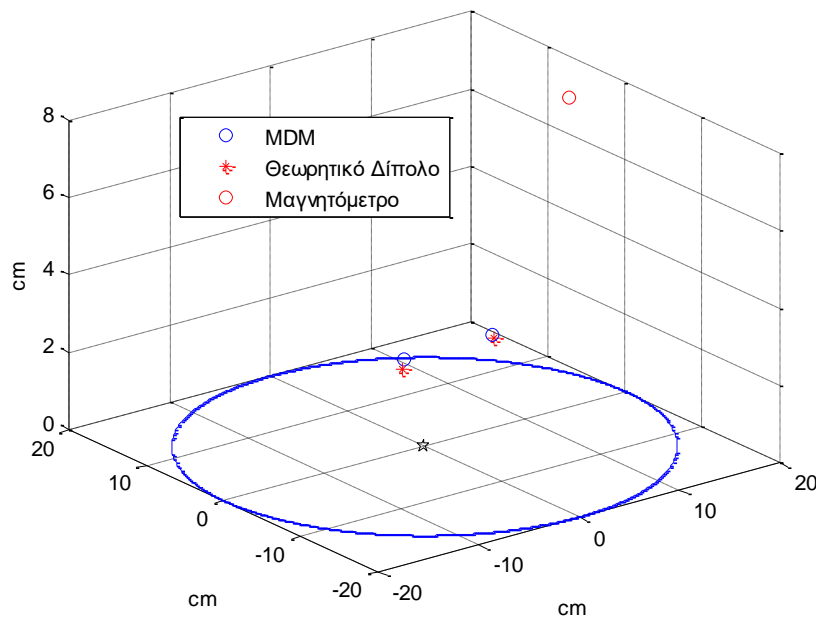
Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου είναι της τάξης του 8% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 2.42%.

Από τον Πίνακα 8.3 και την Εικόνα 8.5 φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προέκυψε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια παρόλο που το σφάλμα των μετρήσεων ήταν σχετικά μεγάλο (8%).

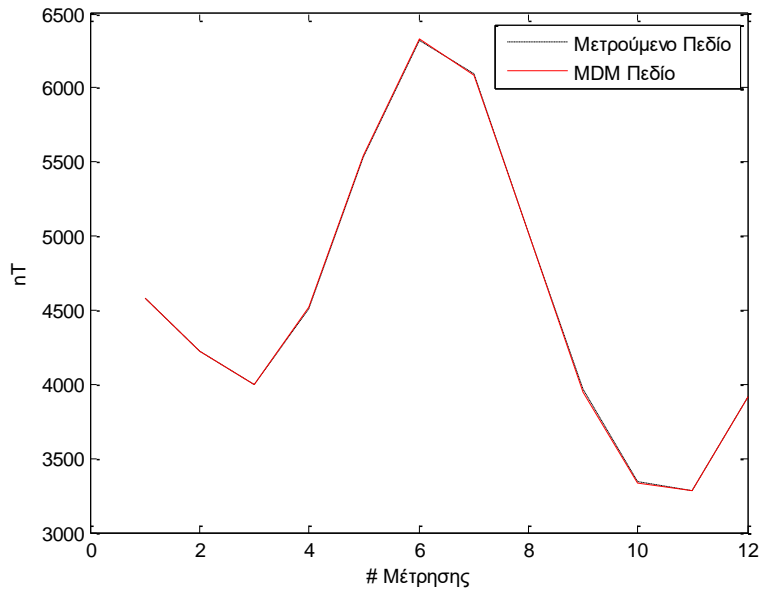
Στην Εικόνα 8.6 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δείγμα της καλής προσέγγισης του αλγορίθμου στο MDM.

Πίνακας 8.3 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

x (cm)	6.7412	-2.8465
y (cm)	0.0639	-1.1052
z (cm)	2.4162	2.5495
m_x (mAm ²)	1.1223	4.6374
m_y (mAm ²)	-2.2906	-2.1744
m_z (mAm ²)	-29.4561	-150.066



Εικόνα 8.5 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.



Εικόνα 8.6 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

8.2.4 Περίπτωση 4

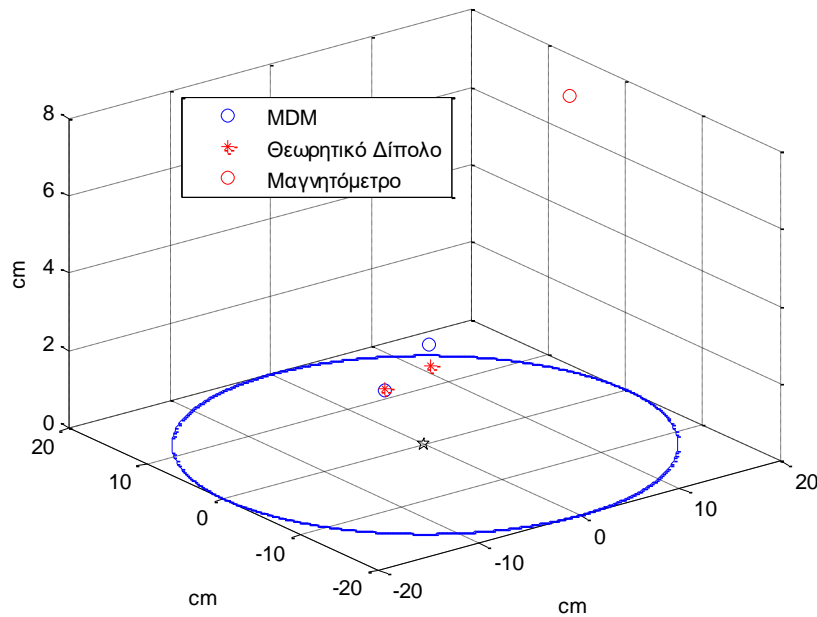
Σε αυτή την περίπτωση ως EUT χρησιμοποιήθηκε ένα σετ δύο μαγνητών τοποθετημένων στις θέσεις (-1, -2, 2.3) και (-7, -4, 2.3) cm με μέτρο μαγνητικών ροπών περίπου 30 και 30 mAm^2 αντίστοιχα. Το MDM που προκύπτει μετά την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγει αυτό το σετ μαγνητών παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.4. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου είναι της τάξης του 8% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 1.03%.

Πίνακας 8.4 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

x (cm)	-6.9696	-1.1459
y (cm)	-3.9731	-2.0326
z (cm)	2.2549	2.8297
m_x (mAm^2)	-1.7328	-0.487
m_y (mAm^2)	2.5467	-0.4803
m_z (mAm^2)	-30.4744	-29.6755

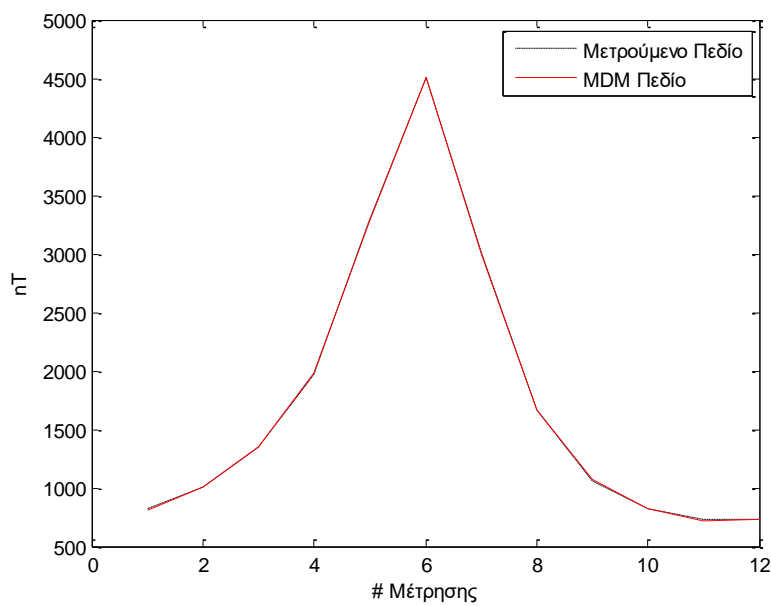
Στην Εικόνα 8.7 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητομέτρου. Από τον Πίνακα 8.4 και την Εικόνα 8.7

φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προέκυψε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια παρόλο που το σφάλμα των μετρήσεων ήταν σχετικά μεγάλο (8%).



Εικόνα 8.7 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.

Στην Εικόνα 8.8 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δείγμα της καλής προσέγγισης του αλγορίθμου στο MDM.



Εικόνα 8.8 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

8.2.5 Περίπτωση 5

Σε αυτή την περίπτωση ως EUT χρησιμοποιήθηκε ένα σετ δύο μαγνητών τοποθετημένων στις θέσεις (4, -1, 2.3) και (2, 5, 2.3) cm με μέτρο μαγνητικών ροών περίπου 30 και 30 mAm^2 αντίστοιχα και ένα πηνίο στη θέση (-6, 2, 1.25) cm με μέτρο μαγνητικής ροπής περίπου 20.4 mAm^2 . Το MDM που προκύπτει μετά την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγει αυτό το σετ μαγνητών παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.5. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου ξεπερνάει το 10% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 1.57%.

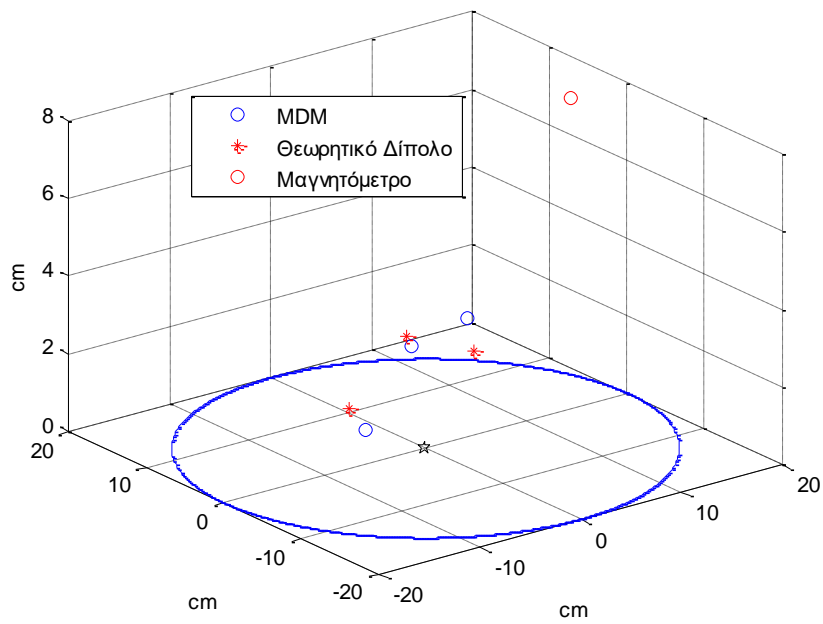
Πίνακας 8.5 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

$x \text{ (cm)}$	-6.1853	1.828	3.4549
$y \text{ (cm)}$	-0.2327	4.2837	-0.9369
$z \text{ (cm)}$	0.9288	2.0836	3.1797
$m_x \text{ (mAm}^2\text{)}$	1.0361	3.4843	-2.4007
$m_y \text{ (mAm}^2\text{)}$	0.2693	2.2283	1.0512
$m_z \text{ (mAm}^2\text{)}$	-18.7941	-39.7912	-24.4375

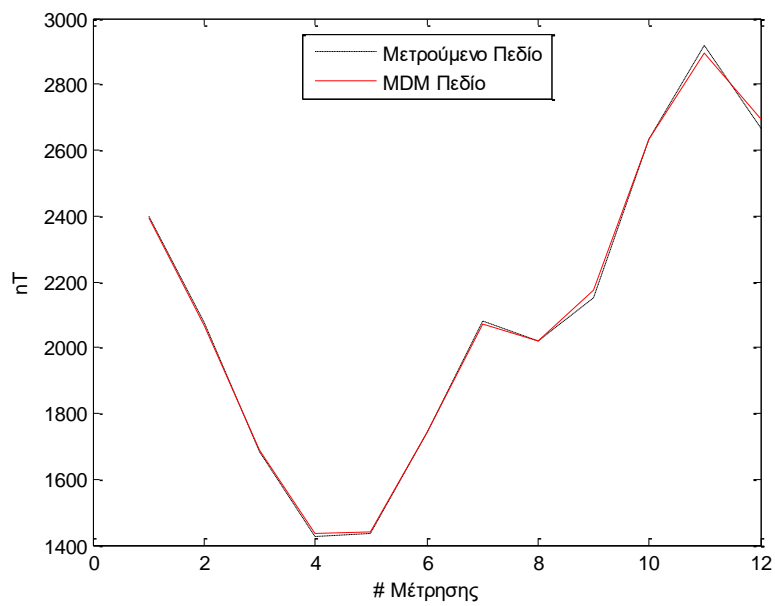
Στην Εικόνα 8.9 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητομέτρου.

Από τον Πίνακα 8.5 και την Εικόνα 8.9 φαίνεται ότι το MDM που προέκυψε πλησιάζει το θεωρητικό αλλά η ακρίβεια του δεν είναι τόσο καλή όσο στις προηγούμενες περιπτώσεις. Βέβαια το σφάλμα σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μεγάλο ($\text{RMS} > 10\%$) αλλά ο αλγόριθμος κατάφερε να υπολογίσει ένα MDM του οποίου το πεδίο πλησιάζει πολύ το μετρούμενο ($\text{RMS} = 1.57\%$).

Στην Εικόνα 8.10 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως αναφέρθηκε, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, παρά την απόκλιση στις θέσεις των διπόλων του MDM.



Εικόνα 8.9 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.



Εικόνα 8.10 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων

8.3. Υπολογισμός MDM με χρήση του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 7

8.3.1 Περίπτωση 1

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης περίπτωσης χρησιμοποιήθηκε ένα πηνίο που δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ιδανικό. Τα χαρακτηριστικά του είναι (i) Κυκλικό σχήμα, (ii) Διάμετρος $D=50$ mm, (iii) Αριθμός περιελίξεων $N=295$ (+/- 2%) και (iv) Το ρεύμα $I=35$ mA. Η μαγνητική ροπή του έχει μέτρο περίπου 20.4 mA m^2 . Το πηνίο τοποθετήθηκε στη θέση (2, -2, 1.25) cm και πραγματοποιήθηκε μέτρηση του μαγνητικού του πεδίου. Το MDM που προέκυψε παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.6. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου είναι της τάξης του 6% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 1.89%.

Πίνακας 8.6 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

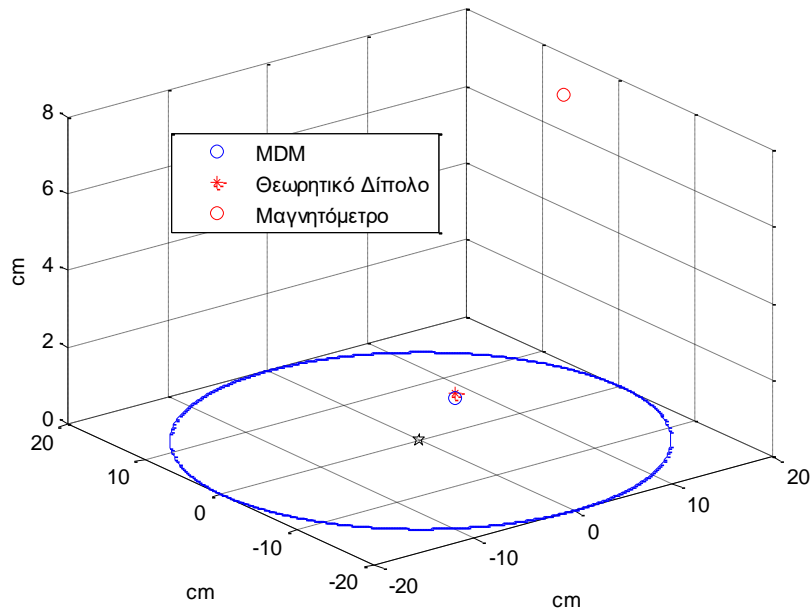
x (cm)	1.9806
y (cm)	-1.8813
z (cm)	1.1536
m_x (mA m^2)	-0.7397
m_y (mA m^2)	-0.1533
m_z (mA m^2)	-20.433

Στην Εικόνα 8.11 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητομέτρου.

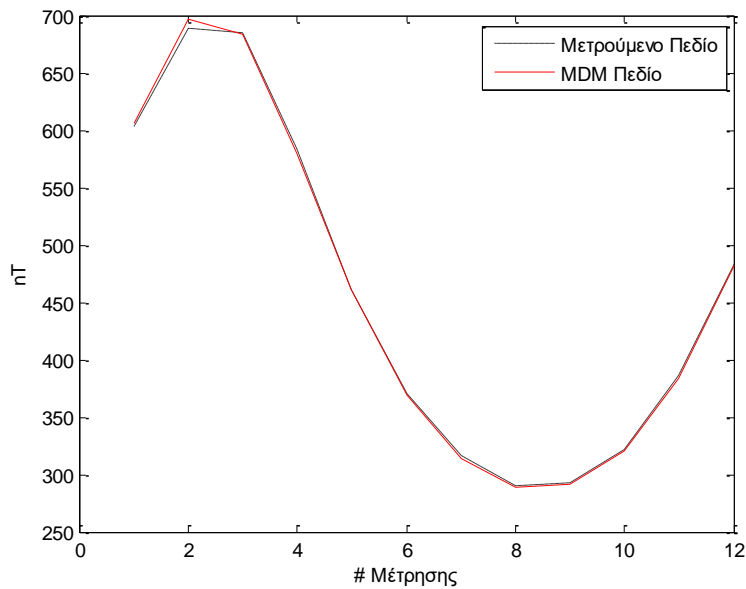
Από τον Πίνακα 8.6 και από την Εικόνα 8.11 φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προέκυψε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια παρόλο που το σφάλμα των μετρήσεων ήταν σχετικά μεγάλο (6%).

Στην Εικόνα 8.12 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη

γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δείγμα της καλής προσέγγισης του αλγορίθμου στο MDM.



Εικόνα 8.11 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.



Εικόνα 8.12 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

8.3.2 Περίπτωση 2

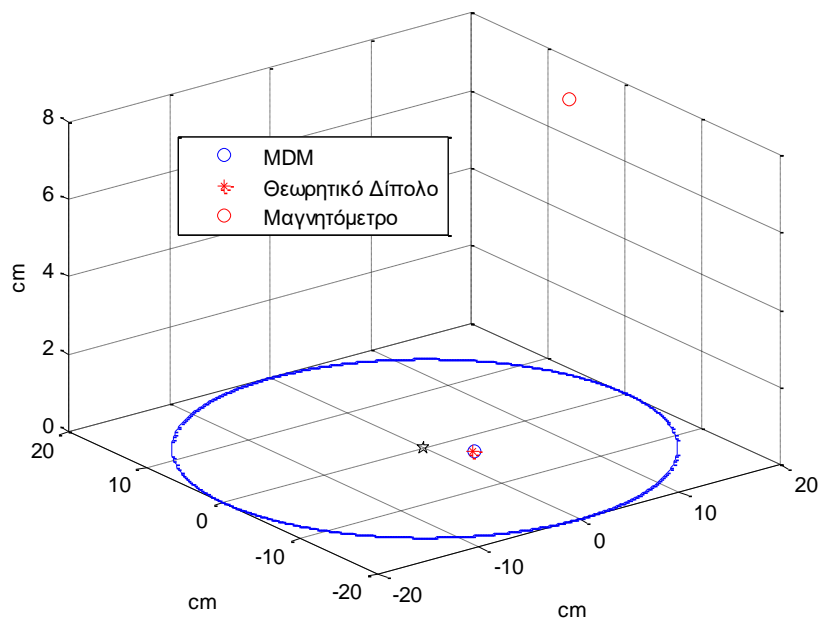
Εδώ ως EUT χρησιμοποιήθηκε ένας μη-ιδανικός μαγνήτης με μέτρο μαγνητικής ροπής περίπου 30 mAm^2 τοποθετημένος στο $(1, -5, 0.3) \text{ cm}$ και έγινε μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγει. Το MDM που έλυσε ο αλγόριθμος φαίνεται στον

Πίνακα 8.7. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου είναι της τάξης του 7% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 4.02%.

Πίνακας 8.7 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

$x (cm)$	1.1243
$y (cm)$	-4.9752
$z (cm)$	0.3057
$m_x (mA\cdot m^2)$	0.5768
$m_y (mA\cdot m^2)$	-0.0525
$m_z (mA\cdot m^2)$	27.0263

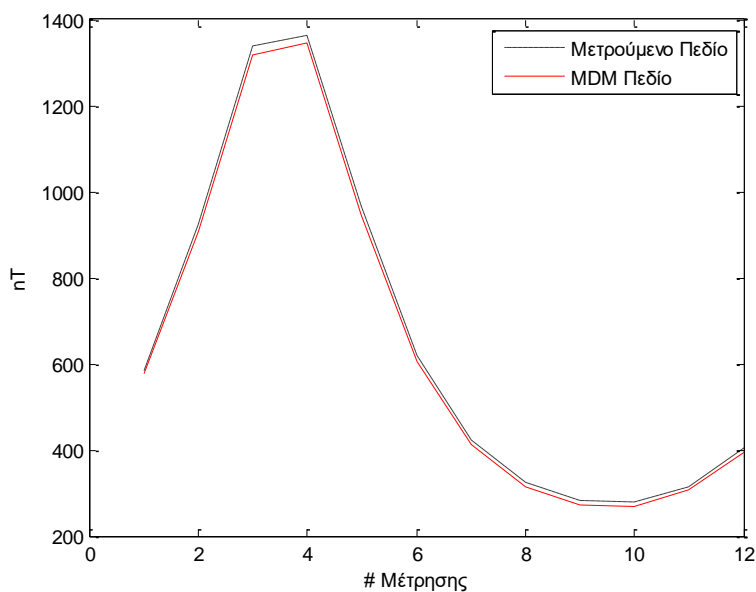
Στην Εικόνα 8.13 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητομέτρου.



Εικόνα 8.13 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.

Από τον Πίνακα 8.7 και από την Εικόνα 8.13 φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προέκυψε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια παρόλο που το σφάλμα των μετρήσεων ήταν σχετικά μεγάλο (7%).

Στην Εικόνα 8.14 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δείγμα της καλής προσέγγισης του αλγορίθμου στο MDM.



Εικόνα 8.14 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

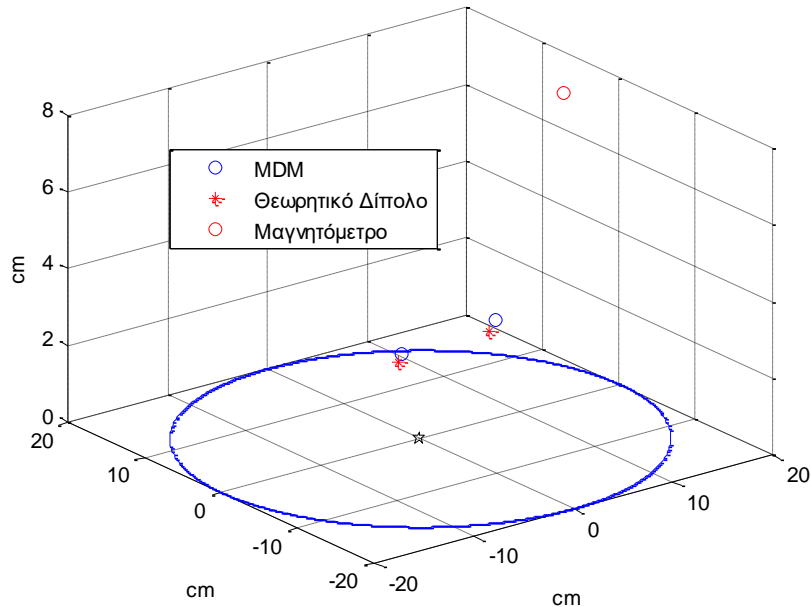
8.3.3 Περίπτωση 3

Σε αυτή την περίπτωση ως EUT χρησιμοποιήθηκε ένα σετ δύο μαγνητών τοποθετημένων στις θέσεις (7, 0, 2.3) και (-3, -1, 2.3) cm με μέτρο μαγνητικών ροπών περίπου 30 και 150 mAm^2 αντίστοιχα. Το MDM που προκύπτει παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.8. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου είναι της τάξης του 8% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 2.98%.

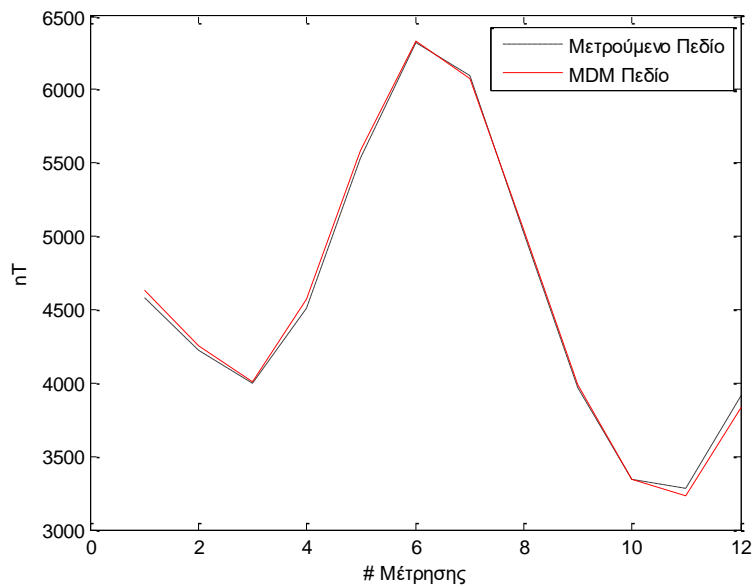
Πίνακας 8.8 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

x (cm)	-2.6969	7.497
y (cm)	-1.0773	-0.062
z (cm)	2.5088	2.5539
m_x (mAm^2)	4.1327	0.95
m_y (mAm^2)	-1.4572	-3.1502
m_z (mAm^2)	-156.733	-23.5025

Στην Εικόνα 8.1.5 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητόμετρο.



Εικόνα 8.15 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.



Εικόνα 8.16 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

Από τον Πίνακα 8.8 και την Εικόνα 8.15 φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προέκυψε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια παρόλο που το σφάλμα των μετρήσεων ήταν σχετικά μεγάλο (8%).

Στην Εικόνα 8.16 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δείγμα της καλής προσέγγισης του αλγορίθμου στο MDM.

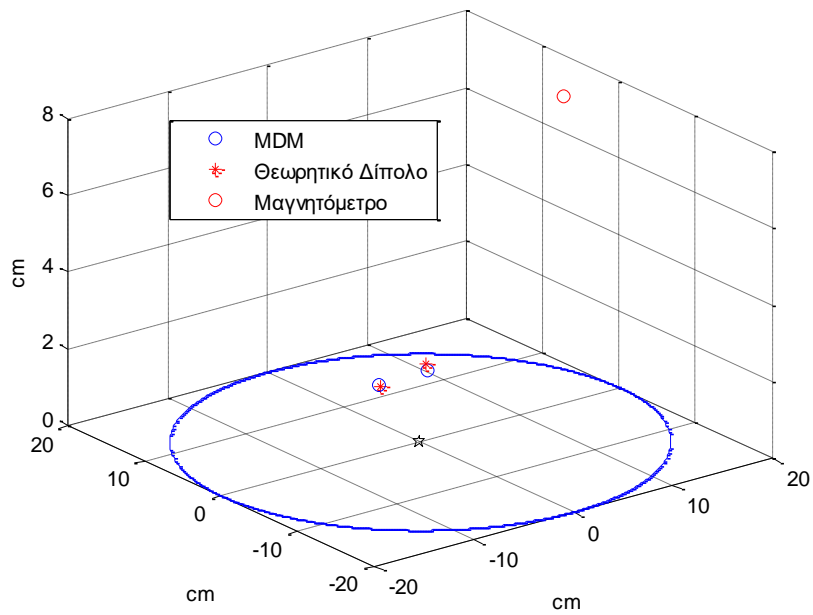
8.3.4 Περίπτωση 4

Σε αυτή την περίπτωση ως EUT χρησιμοποιήθηκε ένα σετ δύο μαγνητών τοποθετημένων στις θέσεις (-1, -2, 2.3) και (-7, -4, 2.3) cm με μέτρο μαγνητικών ροπών περίπου 30 και 30 mAm^2 αντίστοιχα. Το MDM που προκύπτει μετά την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγει αυτό το σετ μαγνητών παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.9. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου είναι της τάξης του 8% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 5.25%.

Πίνακας 8.9 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

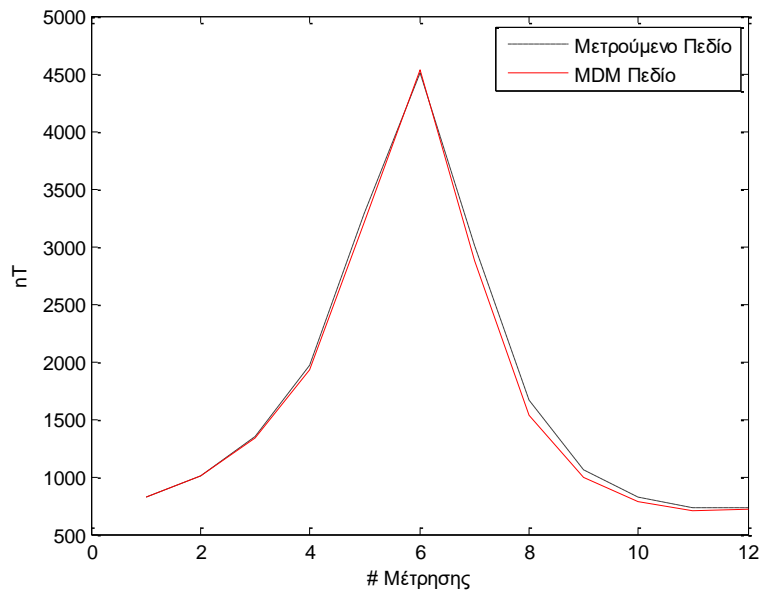
$x (cm)$	-0.8527	-7.3672
$y (cm)$	-2.1414	-4.2657
$z (cm)$	2.1192	2.374
$m_x (mAm^2)$	2.1064	-2.6756
$m_y (mAm^2)$	-0.3337	0.5606
$m_z (mAm^2)$	-32.0452	-26.5182

Στην Εικόνα 8.17 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητομέτρου. Από τον Πίνακα 8.9 και την Εικόνα 8.17 φαίνεται καθαρά ότι το MDM που προέκυψε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια παρόλο που το σφάλμα των μετρήσεων ήταν σχετικά μεγάλο (8%).



Εικόνα 8.17 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.

Στην Εικόνα 8.18 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δείγμα της καλής προσέγγισης του αλγορίθμου στο MDM.



Εικόνα 8.18 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

8.3.5 Περίπτωση 5

Σε αυτή την περίπτωση ως EUT χρησιμοποιήθηκε ένα σετ δύο μαγνητών τοποθετημένων στις θέσεις (4, -1, 2.3) και (2, 5, 2.3) cm με μέτρο μαγνητικών ροπών περίπου 30 και 30 mAm^2 αντίστοιχα και ένα πηνίο στη θέση (-6, 2, 1.25) cm με μέτρο μαγνητικής ροπής περίπου 20.4 mAm^2 . Το MDM που προκύπτει μετά την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγει αυτό το σετ μαγνητών παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.10. Το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του θεωρητικού πεδίου και του μετρούμενου ξεπερνάει το 10% ενώ το σχετικό RMS σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του MDM πεδίου είναι 2.22%.

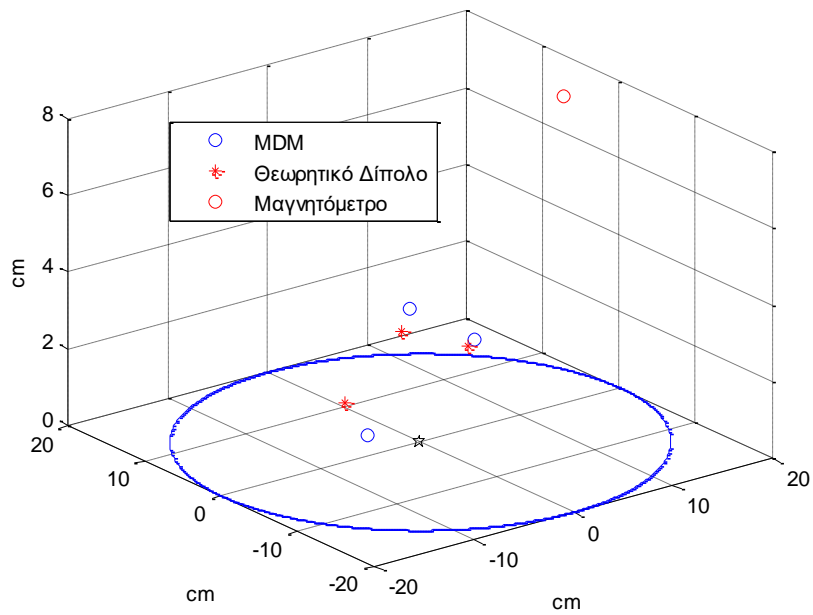
Πίνακας 8.10 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος

x (cm)	2.1551	-5.4143	4.3371
y (cm)	4.2759	-0.1641	-1.4916
z (cm)	2.9137	0.5817	2.5103
m_x (mAm^2)	2.1691	0.2687	-0.9538
m_y (mAm^2)	-0.059	0.2849	-0.5753
m_z (mAm^2)	-34.815	-25.9026	-21.7279

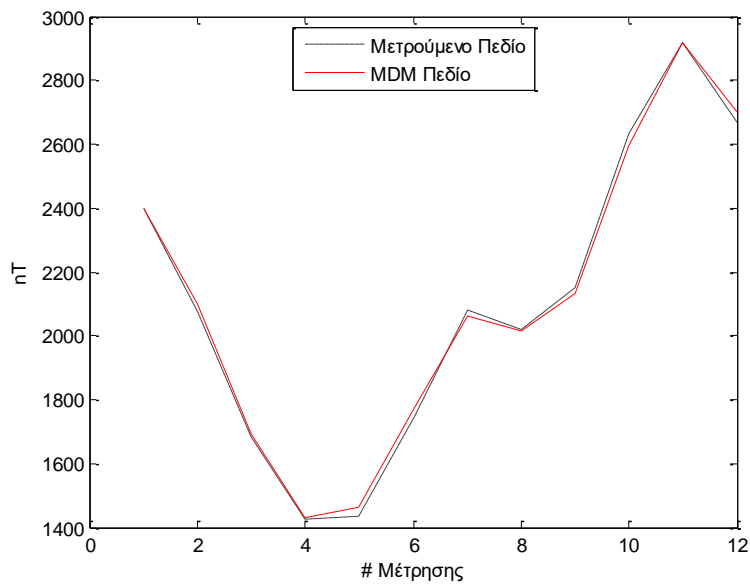
Στην Εικόνα 8.19 οπτικοποιείται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Ο μπλε κύκλος είναι η θέση του MDM, ο κόκκινος αστερίσκος είναι η θεωρητική θέση και ο κόκκινος κύκλος είναι η θέση του μαγνητομέτρου.

Από τον Πίνακα 8.10 και την Εικόνα 8.19 φαίνεται ότι το MDM που προέκυψε πλησιάζει το θεωρητικό αλλά η ακρίβεια του δεν είναι τόσο καλή όσο στις προηγούμενες περιπτώσεις. Βέβαια το σφάλμα σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μεγάλο ($\text{RMS}>10\%$) αλλά ο αλγόριθμος κατάφερε να υπολογίσει ένα MDM του οποίου το πεδίο πλησιάζει πολύ το μετρούμενο ($\text{RMS}=2.22\%$).

Στην Εικόνα 8.20 συγκρίνεται το μέτρο του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με το μέτρο του πεδίου που παράγει το MDM (κόκκινη γραμμή) στις ίδιες θέσεις. Όπως αναφέρθηκε, τα δύο πεδία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, παρά την απόκλιση στις θέσεις των διπόλων του MDM.



Εικόνα 8.19 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.



Εικόνα 8.20 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.

8.4. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, έγινε έλεγχος των αλγορίθμων που έχουν αναπτυχθεί κατά την εκπόνηση της διατριβής και αναλύονται στα κεφάλαια 4 και 7 με σκοπό την εκτίμηση της συμπεριφοράς τους σε πραγματικές μετρήσεις και έπειτα την επιβεβαίωση της

ικανότητας τους να επιλύουν με ακρίβεια το πρόβλημα εύρεσης ισοδύναμου μοντέλου MDM από μετρήσεις του κοντινού πεδίου ενός EUT. Παρόλο που τα θεωρητικά αποτελέσματα ήταν εξαιρετικά, κρίθηκε σκόπιμο για την πληρότητα της μελέτης και της γενικότερης ερευνητικής διαδικασίας να δοκιμαστούν σε πραγματικές συνθήκες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε δεν ήταν στις ιδανικές συνθήκες μιας MCF εγκατάστασης (όπως αυτές που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 1) με αποτέλεσμα τα σφάλματα των μετρήσεων να είναι μεγαλύτερα της τάξεως του 5%, ποσοστό στο οποίο είχαν δοκιμαστεί οι αλγόριθμοι κατά την θεωρητική μελέτη.

Επιπλέον, στη θεωρητική μελέτη έγινε η υπόθεση της χρήσης πολλών μαγνητομέτρων και λήψη της μαγνητικής υπογραφής ταυτόχρονα από όλα τα μαγνητόμετρα με χρήση της μεθόδου A-B-A (όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 7). Όμως, λόγω έλλειψης πολλών μαγνητομέτρων, η λήψη του μαγνητικού πεδίου έγινε με την κλασσική τεχνική της περιστροφής του EUT, γεγονός το οποίο δημιούργησε την ανάγκη για μικρές αλλαγές στον υπολογισμό του πεδίου στο σημείο παρατήρησης που επίσης αποκλίνει από την θεωρητική μελέτη.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο όμως, φαίνεται η ικανότητα των αλγορίθμων που αναπτύχτηκαν σε αυτή τη διατριβή να επιλύσουν το πρόβλημα με ακρίβεια. Επιπλέον, κατάφεραν να ανταπεξέλθουν και να ξεπεράσουν τα μεγάλα σφάλματα που υπήρχαν κατά τη διαδικασία μετρήσεων, και τα οποία δεν θα υπήρχαν σε μία πιστοποιημένη εγκατάσταση MCF, δίνοντας την αίσθηση πως τα αποτελέσματα θα ήταν ακόμη πιο ακριβή σε μία τέτοια περίπτωση.

Κεφάλαιο 9 - Συμπεράσματα – Σημεία στα οποία προάγεται η επιστήμη – Μελλοντική εργασία

9.1. Συμπεράσματα

Η παρουσία ή απουσία μαγνητικού πεδίου αποτελεί βασική παράμετρο για την κατάσταση του εσωτερικού ενός πλανήτη. Η φύση του πεδίου (διπολικό, πολυπολικό κ.α.) παρέχει επιπλέον ενδείξεις για παρούσα κατάσταση του και χρησιμοποιείται εκτενώς για την δημιουργία μοντέλων πλανητικών δομών. Ενώ το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι πολύ γνωστό, χάρη στις εκτενείς μετρήσεις που έχουν γίνει στο έδαφος με αυξημένη ακρίβεια με την πάροδο των ετών, τα μαγνητικά πεδία των άλλων πλανητών μετρούνται από απόσταση γύρω από την τροχιά του εκάστοτε πλανήτη (ή πλανητικού σώματος), από διαστημικές αποστολές που φέρουν μαγνητόμετρα και στη συνέχεια από αυτές τις μετρήσεις γίνεται η ανίχνευση, η μέτρηση και η μοντελοποίηση του μαγνητικού πεδίου. Στο ηλιακό σύστημα είναι πλέον γνωστό ότι υπάρχουν πολλά είδη μαγνητισμένων και μη-μαγνητισμένων σωμάτων με διαφορετικές εσωτερικές και εξωτερικές ιδιότητες και κατά συνέπεια οι μετρήσεις τους να έχουν σημαντικές διαφορές ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι οι μετρήσεις των μαγνητικών πεδίων αυτών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβείς γίνεται και δεδομένου ότι οι τιμές των μαγνητικών πεδίων από τις αποστάσεις παρατήρησής τους στις θέσεις των διαστημικών αποστολών είναι εξαιρετικά μικρές, η δυσκολία για την εξασφάλιση της ποιότητας τους αυξάνεται.

Μία βασική παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί στην προσπάθεια για ακριβείς μετρήσεις είναι το συνολικό μαγνητικό πεδίο που υπάρχει στο σημείο τοποθέτησης του μαγνητομέτρου να είναι γνωστό εκ των προτέρων και όσο το δυνατόν μικρότερο. Οι διαστημικές αποστολές που προορίζονται για μετρήσεις μαγνητικών πεδίων έχουν πολύ συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά με την τιμή αυτού του μαγνητικού πεδίου. Για να επιτευχθούν αυτές οι απαιτήσεις, η μελέτη μαγνητικής καθαρότητας πρέπει να έχει υψηλή προτεραιότητα κατά τον σχεδιασμό και, το σχέδιο, η επιλογή και η

τοποθέτηση των εξαρτημάτων πτήσης και ο επιπλέον εξοπλισμός πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά για πιθανή μαγνητική μόλυνση. Για την ολοκλήρωση της μελέτης, εφόσον έχουν μοντελοποιηθεί όλες οι πηγές (εξοπλισμός του σκάφους) που παράγουν μαγνητικό πεδίο, χρησιμοποιώντας το μοντέλο για κάθε πηγή και την θέση της μέσα στο σκάφος μπορεί να υπολογιστεί η συνεισφορά κάθε μίας στην θέση που θα τοποθετηθεί τελικά το μαγνητόμετρο (ή μαγνητόμετρα), είτε αυτό είναι σε κάποιο σημείο του σκάφους είτε, συχνότερα, σε κάποιο ιστό σε απόσταση μερικών μέτρων από το σκάφος. Το επιλεγμένο τελικό σχέδιο τοποθέτησης του εξοπλισμού πρέπει φυσικά να μην δημιουργεί προβλήματα σε κριτήρια απόδοσης άλλων προδιαγραφών με αποτέλεσμα η μελέτη μαγνητικής καθαρότητας να είναι μία πολύ απαιτητική διαδικασία.

Στα πλαίσια αυτά, στην παρούσα διατριβή προτάθηκαν δύο αλγόριθμοι βασισμένοι σε στοχαστικές μεθόδους για την εύρεση μοντέλων MDM ενός EUT με χρήση μετρήσεων του κοντινού πεδίου του. Ο πρώτος αλγόριθμος (κεφάλαιο 4) χρησιμοποιεί αυτές τις μετρήσεις και τις θέσεις που έγιναν και καταλήγει στον καθορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου μοντέλου MDM που αποτελούνται από τις θέσεις (τρεις παράμετροι για κάθε δίπολο) και τις μαγνητικές ροπές (τρεις παράμετροι για κάθε δίπολο) των διπόλων του MDM. Η αξιολόγηση του αλγορίθμου έγινε, αρχικά, με δημιουργία «εικονικών μετρήσεων» και οι λύσεις που προέκυψαν ήταν εξαιρετικά ακριβείς. Στη συνέχεια δόθηκε η δυνατότητα λήψης πραγματικών μετρήσεων, σε συνθήκες που απείχαν βέβαια από τις ιδανικές μίας πιστοποιημένης MCF εγκατάστασης, και παρά το αυξημένο επίπεδο θορύβου που εισήχθη στις μετρήσεις, τα αποτελέσματα είχαν εξαιρετική ακρίβεια. Ο δεύτερος αλγόριθμος (κεφάλαιο 7) διαφέρει από τον πρώτο στην προσέγγιση των παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν για την μοντελοποίηση μειώνοντας τον αριθμό των μεταβλητών από 6 σε 4. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η μείωση, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μέρος των συνολικών μετρήσεων για την επίλυση του γραμμικού συστήματος που προκύπτει από τις βασικές εξισώσεις του μαγνητικού πεδίου του διπόλου όταν θεωρηθεί γνωστό το πεδίο (επιλέγοντας από τις μετρήσεις) και οι θέσεις (τιμές που δίνει ο αλγόριθμος κατά την εκτέλεση του) του διπόλου. Αντίστοιχα με τον πρώτο αλγόριθμο η αξιολόγηση έγινε δημιουργώντας «εικονικές μετρήσεις» αλλά και με πραγματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα που προέκυψαν είχαν μεγάλη ακρίβεια. Αξίζει να σημειωθεί πως η αντικειμενική συνάρτηση που έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί

και στους δύο αλγορίθμους ήταν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) ανάμεσα στο πεδίο που μετρήθηκε και στο πεδίο που παρήγαγε ο αλγόριθμος κατά την εκτέλεση του χρησιμοποιώντας τις ενδιάμεσες τιμές που έβρισκε μέχρι να καταλήξει στην τελική λύση.

Χρησιμοποιώντας σαν βάση την λογική του αλγορίθμου του κεφαλαίου 4, παράλληλα αναπτύχθηκε μία στοχαστική μέθοδος βαθμονόμησης για MCF εγκαταστάσεις ενός ή περισσότερων μαγνητομέτρων και ένας αλγόριθμος εύρεσης μοντέλου EUT αποτελούμενο από ένα δίπολο και ένα τετράπολο (MDQM). Κατά την αξιολόγηση της μεθόδου βαθμονόμησης με «εικονικές μετρήσεις» καθώς και με πραγματικές μετρήσεις, προέκυψε πως η μέθοδος προσφέρει μεγάλη ακρίβεια στον καθορισμό των θέσεων τοποθέτησης των μαγνητομέτρων και κατά συνέπεια αυξάνει την ακρίβεια και την απόδοση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ισοδύναμου MDM ενός EUT. Ο αλγόριθμος εύρεσης MDQM δοκιμάστηκε μόνο σε «εικονικές μετρήσεις» και επίσης, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, καταλήγει σε λύσεις με μεγάλη ακρίβεια.

Τέλος, στην προσπάθεια για πληρότητα της μελέτης για αύξηση της ακρίβειας των παραγόμενων μοντέλων MDM στην διαδικασία μαγνητικής καθαρότητας, μελετήθηκαν 4 διατάξεις τοποθέτησης πολλαπλών μαγνητομέτρων με στόχο την εύρεση κάποιας διάταξης που, αφενός, να είναι δυνατόν να κατασκευαστεί και, αφετέρου, να είναι ικανότερη στην λήψη μαγνητικής υπογραφής μίας συσκευής. Οι διατάξεις ελέγχθηκαν ως προς την ικανότητα τους χρησιμοποιώντας «εικονικές μετρήσεις» του ίδιου EUT στις θέσεις παρατήρησης που ορίζει η κάθε διάταξη και από τα αποτελέσματα, που προέκυψαν με χρήση του αλγορίθμου του κεφαλαίου 7, συγκρίνοντας τις θέσεις των θεωρητικών διπόλων και των διπόλων των MDM, ξεχώρισε η διάταξη 2.

Σαν αποτέλεσμα αυτής της διατριβής χρησιμοποιώντας τους αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν για παραγωγή MDM, MDQM και για βαθμονόμηση αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που μελετήθηκαν σχετικά με τις διατάξεις μέτρησης και τα χαρακτηριστικά τους (απόσταση, αριθμός σημείων παρατήρησης) αλλά και με τις παραμέτρους μοντελοποίησης (αριθμός διπόλων μοντέλου) επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην μελέτη της μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές εφαρμογές.

9.2. Μελλοντική εργασία

Αναφορικά με τα μελλοντικά πεδία σχετικής έρευνας, η βασικότερη κατεύθυνση που εμφανίζει τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι η μελέτη μαγνητικής καθαρότητας μελετώντας πηγές όχι συνεχούς ρεύματος (θέμα που έχει εξαντλήσει η συγκεκριμένη διατριβή) αλλά εναλλασσόμενου. Η έρευνα σε αυτό το θέμα είναι ακόμα σε πρώιμα στάδια και η πολυπλοκότητα του το καθιστά εξαιρετικά ενδιαφέρον. Η προσέγγιση του διαφέρει σημαντικά από ό, τι είναι γνωστό μέχρι τώρα όμως η εμπειρία από αυτή τη διατριβή μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αντιμετώπιση του. Ήδη στο εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του Ε.Μ.Π. έχει αρχίσει η μελέτη του προβλήματος με αποτέλεσμα μία δημοσίευση με προκαταρκτικά αποτελέσματα συμπεριφοράς βρόχων ως προς τον ρυθμό μείωσης του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και το σχήμα του βρόχου. Τα ανοικτά θέματα μελέτης είναι πάρα πολλά με κυριότερο τους νόμους απόστασης – συχνότητας που ακολουθούν τα μαγνητικά πεδία παραγόμενα από τέτοιους βρόγχους. Τέλος, ένα άλλο μεγάλο κεφάλαιο έρευνας είναι η συμπεριφορά επαγόμενων μαγνητικών διπόλων (induced magnetic dipole moments) από εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία καθώς και η μοντελοποίηση πεδίων με πολλαπλά επαγόμενα μαγνητικά δίπολα από όγκους μαγνητικών υλικών.

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1.1 - Διαστημόπλοιο μαζί με μαγνητόμετρο	2
Εικόνα 1.2 - Επίπεδα διαπλανητικών μαγνητικών πεδίων	5
Εικόνα 1.3 - Διαστημικές αποστολές NASA με τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους...7	
Εικόνα 1.4 - Διαστημικές αποστολές NASA με τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους...8	
Εικόνα 1.5 - Διάταξη μέτρησης μαγνητικού πεδίου.....	10
Εικόνα 1.6 - Φωτογραφία και σχεδιάγραμμα του συστήματος πηνίων.....	10
Εικόνα 1.7 - MCF εγκατάσταση στην ESA.....	14
Εικόνα 1.8 - MCF εγκατάσταση στο CNES	14
Εικόνα 1.9 - MCF εγκατάσταση στο Braunbek.....	14
Εικόνα 1.10 - MCF εγκατάσταση στο IABG	15
Εικόνα 1.11 - Σύστημα μαγνητομέτρων του Giotto	15
Εικόνα 1.12 - Διαστημόπλοιο Ulysses.....	17
Εικόνα 1.13 - Το διαστημόπλοιο Cassini με τα μαγνητόμετρα του	18
Εικόνα 3.1 - Τοπίο καταλληλότητας με ολικό και τοπικά βέλτιστα	34
Εικόνα 3.2 - Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου.....	36
Εικόνα 3.3 - Διάγραμμα ροής PSO αλγορίθμου.....	40
Εικόνα 4.1 - Παρουσίαση προβλήματος.....	47
Εικόνα 4.2 - Διαφορές θεωρητικού και MDM πεδίου για $\alpha=1\%$. (α) x συνιστώσα, (b) y συνιστώσα, (c) z συνιστώσα.....	51
Εικόνα 4.3 - Διαφορές θεωρητικού και MDM πεδίου για $\alpha=5\%$. (α) x συνιστώσα, (b) y συνιστώσα, (c) z συνιστώσα.....	51
Εικόνα 5.1 - Παρουσίαση του προβλήματος.....	59
Εικόνα 5.2 - Πηνίο.....	64

Εικόνα 5.3 - Διάταξη μετρήσεων με δύο μαγνητόμετρα	65
Εικόνα 5.4 - Οπτική απόδοση του Πίνακα 5.6	67
Εικόνα 5.5 - Σύγκριση μαγνητικών πεδίων	68
Εικόνα 5.6 - Οπτική απόδοση του Πίνακα 5.8	69
Εικόνα 5.7 - Σύγκριση μαγνητικών πεδίων	70
Εικόνα 6.1 - Γραμμικό τετράπολο με γωνία $2\omega = 0^\circ$ και 180°	75
Εικόνα 6.2 - Κανονικό τετράπολο	76
Εικόνα 6.3 - Μαγνητικά πεδία διπόλου (αριστερά) και τετραπόλου (δεξιά)	76
Εικόνα 6.4 - Διατάξεις ισοδύναμων τετραπόλων	78
Εικόνα 6.5 - Πρόοδος της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου	81
Εικόνα 6.6 - Παρουσίαση θέσεων MDQM συγκριτικά με τις θεωρητικές στο επίπεδο xy.....	82
Εικόνα 6.7 - Παρουσίαση θέσεων MDQM συγκριτικά με τις θεωρητικές στο επίπεδο xz.....	82
Εικόνα 6.8 - Παρουσίαση θέσεων MDQM συγκριτικά με τις θεωρητικές στο επίπεδο yz.....	83
Εικόνα 6.9 - Σύγκλιση F ανάλογα με τον αριθμό των στιγμιότυπων.....	84
Εικόνα 7.1 - Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.....	92
Εικόνα 7.2 - Σύγκριση τιμών RMS όσο αυξάνουν τα σημεία παρατήρησης	94
Εικόνα 7.3 - Σύγκριση των διαφορών πεδίων των MDM 1, 2, 3 διπόλων και των εικονικών μετρήσεων από το θεωρητικό πεδίο	98
Εικόνα 7.4 - Σύγκριση των μαγνητικών πεδίων των επιλεγμένων MDM του Πίνακα 7.7 με το θεωρητικό όταν τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται σε απόσταση 20 cm	102
Εικόνα 7.5 - Σύγκριση των μαγνητικών πεδίων των επιλεγμένων MDM του Πίνακα 7.7 με το θεωρητικό όταν τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται σε απόσταση 60 cm	102

Εικόνα 7.6 - Σύγκριση των μαγνητικών πεδίων των επιλεγμένων MDM του Πίνακα 7.7 με το θεωρητικό όταν τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται σε απόσταση 100 cm	103
Εικόνα 7.7 - Περιγραφή διαδικασίας μέτρησης με περιστροφή.....	104
Εικόνα 7.8 - Διάταξη 1 σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση.....	106
Εικόνα 7.9 - Διάταξη 2 σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση.....	106
Εικόνα 7.10 - Διάταξη 3 σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση.....	107
Εικόνα 7.11 - Διάταξη 4 σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση.....	107
Εικόνα 7.12 - Θέσεις διπόλου 1 των MDM κάθε διάταξης συγκριτικά με το θεωρητικό.....	110
Εικόνα 7.13 - Θέσεις διπόλου 2 των MDM κάθε διάταξης συγκριτικά με το θεωρητικό.....	110
Εικόνα 8.1 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.....	115
Εικόνα 8.2 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	115
Εικόνα 8.3 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.....	116
Εικόνα 8.4 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	117
Εικόνα 8.5 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.....	118
Εικόνα 8.6 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	119
Εικόνα 8.7 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.....	120
Εικόνα 8.8 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	120
Εικόνα 8.9 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.....	122
Εικόνα 8.10 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων	122
Εικόνα 8.11 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.	124
Εικόνα 8.12 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	124
Εικόνα 8.13 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.	125
Εικόνα 8.14 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	126
Εικόνα 8.15 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.	127

Εικόνα 8.16 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	127
Εικόνα 8.17 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.	129
Εικόνα 8.18 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	129
Εικόνα 8.19 - Σύγκριση θέσεων MDM με θεωρητική.	131
Εικόνα 8.20 - Σύγκριση μέτρων μαγνητικών πεδίων.	131

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1.1 - Αποτέλεσμα μαγνητικής καθαρότητας Giotto.....	16
Πίνακας 2.1 - Ενδεικτικές πηγές αβεβαιότητας, η κατανομή που ακολουθούν και η τεχνική εκτίμησης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας	30
Πίνακας 2.2 - Μετρούμενο και θεωρητικό μαγνητικό πεδίο πρότυπου μαγνήτη ανά συνιστώσα.....	31
Πίνακας 4.1 - Παρουσίαση MDM για επίπεδο μέγιστης διαταραχής 1 και 5 %.....	50
Πίνακας 4.2 - Παράμετροι του θεωρητικού μοντέλου τριών διπόλων.....	52
Πίνακας 4.3 - Παράμετροι του MDM τριών διπόλων που υπολόγισε ο αλγόριθμος..	53
Πίνακας 4.4 - Τρία διαφορετικά MDM για διαφορετικές τιμές αντικειμενικής συνάρτησης (καλή, μέτρια, κακή)	54
Πίνακας 5.1 - Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	62
Πίνακας 5.2 - MDM από τις 5 μετρήσεις	65
Πίνακας 5.3 - Τιμές μαγνητικού πεδίου	65
Πίνακας 5.4 - Βαθμονομημένες θέσεις.....	66
Πίνακας 5.5 - Ιδανικό EUT.....	66
Πίνακας 5.6 - Βαθμονομημένες θέσεις.....	67
Πίνακας 5.7 - Σύγκριση MDM	68
Πίνακας 5.8 - Βαθμονομημένες θέσεις.....	69
Πίνακας 5.9 - Σύγκριση MDM	69
Πίνακας 6.1 - Θεωρητικές τιμές παραμέτρων	80
Πίνακας 6.2 - MDQM τιμές παραμέτρων.....	80
Πίνακας 6.3 - Θεωρητικές τιμές παραμέτρων	80
Πίνακας 6.4 - MDQM τιμές παραμέτρων.....	80
Πίνακας 6.5 - Θεωρητικές τιμές παραμέτρων	83

Πίνακας 6.6 - MDQM τιμές παραμέτρων.....	84
Πίνακας 7.1 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις 5 διαφορετικές τιμές σημείων παρατήρησης	94
Πίνακας 7.2 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις πέντε διαφορετικές τιμές απόστασης των σημείων παρατήρησης	96
Πίνακας 7.3 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις τέσσερις επιλογές αριθμού διπόλων που αποτελούν το μοντέλο	97
Πίνακας 7.4 - RMS μεταξύ εικονικών μετρήσεων και παραγόμενων πεδίων των MDM του Πίνακα 7.3	97
Πίνακας 7.5 - MDM για 5% παραμόρφωση.....	99
Πίνακας 7.6 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις 5 διαφορετικές τιμές σημείων παρατήρησης	100
Πίνακας 7.7 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος για τις πέντε διαφορετικές τιμές απόστασης των σημείων παρατήρησης	101
Πίνακας 7.8 - Θεωρητικό EUT.....	108
Πίνακας 7.9 - Παρουσίαση MDM από κάθε διάταξη.....	109
Πίνακας 7.10 - Απόσταση διπόλων από τα αντίστοιχα θεωρητικά.....	109
Πίνακας 8.1 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	114
Πίνακας 8.2 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	116
Πίνακας 8.3 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	118
Πίνακας 8.4 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	119
Πίνακας 8.5 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	121
Πίνακας 8.6 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	123
Πίνακας 8.7 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	125
Πίνακας 8.8 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	126
Πίνακας 8.9 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	128
Πίνακας 8.10 - MDM που υπολόγισε ο αλγόριθμος	130

Κατάλογος δημοσιεύσεων

Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά

1. N. C. Kapsalis, S.-D. J. Kakarakis, and C. N. Capsalis, "Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 34, 111-122, 2012.
2. T.-H. Velivasaki, S.-D. J. Kakarakis, N. Kapsalis and C. Capsalis, "Metaheuristic Channel Assignment in DVB-T Networks in Conformity with Digital Dividend Requirements," *Wireless Personal Communications*, Volume 70, Issue 2 , pp 709-730, 2013
3. S. Spantideas, N. C. Kapsalis, S.-D. J. Kakarakis, and C. N. Capsalis, " A method of predicting composite magnetic sources employing particle swarm optimization " *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 39, 161-170, 2014
4. Kakarakis, S.J.; Kapsalis, N.C.; Capsalis, C.N., "A Semianalytical Heuristic Approach for Prediction of Eut's Multiple Dipole Model by Reducing the Number of Heuristics," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol.57, no.1, pp.87-92, Feb. 2015, (Date of publication 29 – 9 – 2014)
5. Spantideas, S.; Kakarakis, S.; Kapsalis, N.; Capsalis, C., "Theoretical Methods for Studying Distance and Frequency Scaling for AC Magnetic Fields in Satellite Missions," in *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.PP, no.99, pp.1-1, 2015
6. S.-D. J. Kakarakis, S. T. Spantideas, N. C. Kapsalis, C. N. Capsalis, A. Junge, "A software-based calibration technique for characterizing the magnetic signature of EUTs in measuring facilities," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, υπό κρίση.

Διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια

1. S. Spantideas, N. C. Kapsalis, S.-D. J. Kakarakis, and C. N. Capsalis, " A novel technique for accurate extrapolation of complex magnetic sources ", in *Proc. ESA Workshop Aerospace EMC*, 2016, το οποίο έχει γίνει δεκτό για παρουσίαση και δημοσίευση στο συνέδριο.