ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΥΠΟΓΡΑΦΗΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2]

[1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος

[2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

stelios.tsatalas@emtech.global

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να περιγράψει τον σχεδιασμό, ανάπτυξη και την κατασκευή μιας πρωτότυπης μετρητικής διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση DC μαγνητικών πεδίων από συσκευές που τοποθετούνται σε διαστημικά σκάφη για την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας. Η μαγνητική καθαρότητα των διαστημικών σκαφών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη των επιστημονικών στόχων που συνήθως έχει η εκάστοτε διαστημική αποστολή, αλλά επίσης και για λειτουργικούς λόγους. Το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί έπειτα να προσεγγιστεί με ένα μοντέλο Πολλαπλών Μαγνητικών Διπόλων (MDM), που στόχο έχει να αναπαράγει τη μαγνητική υπογραφή της αρχικής συσκευής και ουσιαστικά να την αντιπροσωπεύει.

Η μεθοδολογία της μέτρησης μαγνητικού πεδίου της πρωτότυπης αυτής διάταξης ακολουθεί την φιλοσοφία του στιγμιοτύπου (snapshot), ενώ ο σχεδιασμός της βασίζεται στο αποτέλεσμα μελέτης πολλών πιθανών διευθετήσεων στο χώρο των μαγνητομέτρων γύρω από την υπό μέτρηση συσκευή. Παράγοντες που αξιολογήθηκαν είναι το πλήθος των απαιτούμενων μαγνητομέτρων, η γεωμετρία τους, η επιθυμητή ακρίβεια, η εργονομία, η πολυπλοκότητα της κατασκευής και το κόστος.

Η διάταξη που αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε σε μορφή πρωτοτύπου περιλαμβάνει μια πολύπλοκη μηχανολογική κατασκευή που φιλοξενεί τα μαγνητόμετρα καθώς και περιστρεφόμενο τραπέζι για την τοποθέτηση της υπό μέτρηση συσκευής. Τα μαγνητόμετρα κινούνται ακτινικά ως προς το κέντρο της διάταξης αλλά και καθ' ύψος.

Επίσης, περιλαμβάνει τις διατάξεις τροφοδοσίας των μαγνητομέτρων καθώς και το σύστημα συλλογής των μετρήσεων. Η διαδικασία της μέτρησης με την λογική του στιγμιοτύπου καθώς και η συλλογή, επεξεργασία και αποθήκευση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με λογισμικό που αναπτύχθηκε ειδικά για την μετρητική διάταξη.

Η πρωτότυπη μετρητική διάταξη έχει ήδη εγκατασταθεί και λειτουργεί στο Τεχνολογικό Κέντρο του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ΕΟΔ) στην Ολλανδία και είναι το αποτέλεσμα διαγωνισμού που κατοχυρώθηκε στην κοινοπραξία EMTECH SPACE P.C και στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του ΕΜΠ.

The scope of this paper is to provide the results of the work performed to design and develop a facility utilizing multiple magnetometers to be used for measurement of DC magnetic

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

Ανάπτυξη πρωτοτύπου διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων για μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής διαστημικού εξοπλισμού

7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018

fields emanating from equipment installed in spacecrafts in order to achieve magnetic cleanliness. Magnetic cleanliness is very important for the success of space missions as well as for spacecrafts functional purposes. Using the measured magnetic field data, the magnetic signature of the equipment can then be determined by applying Multiple Dipole Modelling (MDM).
The measurement methodology follows the philosophy of snapshot measurement of the field. During the design phase several multi-magnetometer test setups for obtaining a snapshot of the magnetic field were investigated, identifying the optimum number of magnetometers and their position. Advantages and disadvantages of different configurations by means of measurement time, optimum number and type of sensors (magnetometers or gradiometers) and magnetometer location were explored in order to reduce measurement uncertainty and reproducibility of test results.
The result of the study resulted in the manufacturing of a prototype of an innovative facility for purposes of magnetic dipole modeling of spacecraft equipment and consists of a mechanical construction hosting 12 magnetometers which can be moved radially in respect to the center of the facility. It also includes the necessary power supplies for the magnetometers but also the data acquisition system to collect the measurement data. Moreover, a software application was developed to control the operation of the facility, to collect, filter and report the measurement data.
This prototype facility is installed at EMC laboratory at ESA Technology Center (ESTEC) at Noordwijk, The Netherlands.

Keywords – Μαγνητική Καθαρότητα, Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, Μοντελοποίηση Πολλαπλών Μαγνητικών Διπόλων, Διάταξη Πολλαπλών Μαγνητομέτρων.

1. Εισαγωγή

Η μέτρηση των μαγνητικών πεδίων που περιβάλλουν την Γη, άλλους πλανήτες, τον Ήλιο ή τον διαπλανητικό χώρο είναι σημαντικός στόχος τόσο των τωρινών διαστημικών αποστολών όσο και παλαιότερων αλλά και μελλοντικών [1] – [6]. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής μπορεί να δώσει περισσότερες πληροφορίες για την εσωτερική δομή των ουράνιων σωμάτων, όπως επίσης και να βοηθήσουν στην κατανόηση των φυσικών μηχανισμών πίσω από τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις του ηλεκτρομαγνητικού πλάσματος μεταξύ των. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν αυτές οι μετρήσεις στο πεδίο τα διαστημικά σκάφη μεταφέρουν εξειδικευμένο ευαίσθητο μετρητικό εξοπλισμό, συνήθως μαγνητόμετρα τύπου fluxgate ή search coil. Στο σκάφος υπάρχουν, επίσης, πολλές συσκευές και εξαρτήματα τα οποία γεννούν ένα σύνθετο πεδίο στη θέση τοποθέτησης του μαγνητομέτρου που μπορεί να επηρεάσει την μετρούμενη τιμή του μαγνητικού πεδίου. Επομένως, οι θέσεις τοποθέτησης τους πάνω στο σκάφος πρέπει να είναι «μαγνητικά καθαρές». Τα μαγνητόμετρα, προκειμένου να βρίσκονται σε «μαγνητικά καθαρό» σημείο τοποθετούνται συνήθως σε ένα βραχίονα μερικά μέτρα έξω από το σκάφος με το σκεπτικό ότι το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνητικού διπόλου εξασθενεί με τον κύβο της απόστασης [7]. Συνήθεις απαιτήσεις για το μαγνητικό πεδίο στο σημείο τοποθέτησης είναι 0,1-1nT [8].

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

Λόγω του ότι οι μεταβολές του μαγνητικού πεδίου οφείλονται σε εξοπλισμό που βρίσκεται στο σκάφος οι διαστημικές αποστολές περιλαμβάνουν δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας στο έδαφος τόσο σε επίπεδο μονάδας (συσκευών) όσο και σε επίπεδο συστήματος και γίνεται σύγκριση με τις απαιτήσεις της αποστολής. Μέρος των δοκιμών είναι και οι δοκιμές «μαγνητικής καθαρότητας» που σκοπό έχουν να αποδώσουν την «μαγνητική υπογραφή» των συσκευών και εξαρτημάτων αλλά και ολόκληρου του συστήματος του σκάφους. Με τα αποτελέσματα των δοκιμών, οι μηχανικοί έχουν την δυνατότητα να εφαρμόσουν διάφορες λύσεις προκειμένου να μειώσουν το μαγνητικό επίπεδο στα επιθυμητά επίπεδα που καθορίζονται από την αποστολή.

Σε θεωρητικό επίπεδο έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές τεχνικές για το πρόβλημα καθορισμού ενός μοντέλου ισοδύναμου μαγνητικού διπόλου που δίνει την δυνατότητα να εκτιμήσουμε το πραγματικό πεδίο σε ένα σημείο ενδιαφέροντος, το σημείο που θα τοποθετηθεί το μαγνητόμετρο [8] – [11]. Η μέθοδος είναι καλά εγκατεστημένη και περιλαμβάνει την δημιουργία μοντέλου πολλαπλών μαγνητικών διπόλων (MDM) για το αντικείμενο υπό δοκιμή (συσκευή, εξάρτημα ή σύστημα) από μετρήσεις μαγνητικού πεδίου σε αυτό. Οι παράμετροι του μοντέλου πολλαπλών μαγνητικών διπόλων, η θέση και τα διανύσματα μαγνητικής ροπής, μπορούν να καθοριστούν εφαρμόζοντας είτε ντετερμινιστικές [12] – [14] είτε στοχαστικές μεθόδους [15] – [19]. Το παραγόμενο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει την μαγνητική υπογραφή του δοκιμίου.

Μέχρι τώρα οι μετρήσεις μαγνητικού πεδίου για σκοπούς μαγνητικής καθαρότητας λαμβάνονται με την χρήση εγκαταστάσεων φορητού πηνίου (Mobile Coil Facility, MCF) το οποίο χρησιμοποιείται προκειμένου να αντισταθμίζεται το μαγνητικό πεδίο της Γης. Το MCF αποτελείται από 3 ζεύγη πηνίων Helmholtz σημαντικών διαστάσεων (π.χ 1,5x1,5m) τα οποία διαρέονται από ρεύμα κατάλληλης τιμής ώστε να ακυρώνεται το πεδίο της Γης σε κάθε διεύθυνση (x, y, z). Σε αυτή την εγκατάσταση περιλαμβάνονται μικρός αριθμός μαγνητομέτρων ενώ το δοκίμιο (EUT) περιστρέφεται προκειμένου να ληφθεί η μαγνητική υπογραφή του δοκιμίου. Μια αδυναμία της μεθόδου είναι ότι μεταβολές στο περιβάλλον μαγνητικό πεδίο (μαγνητικό πεδίο της Γής και τοπικά πεδία) επηρεάζει τις μετρήσεις και χρειάζονται μερικές περιστροφές του δοκιμίου προκειμένου να ληφθεί μια αξιόπιστη μέτρηση.

Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε έναν διαγωνισμό του ΕΟΔ και περιλαμβάνει την αντικατάσταση της διαδικασίας περιστροφής του δοκιμίου, που χρειάζεται σημαντικό χρόνο να πραγματοποιηθεί, με πολλά μαγνητόμετρα που βρίσκονται σε σταθερή θέση γύρω από το δοκίμιο. Η διαδικασία περιλαμβάνει την μέτρηση του δοκιμίου πραγματοποιώντας μια μέτρηση «στιγμιοτύπου» της μαγνητικής υπογραφής του. Σκοπός της μεθόδου είναι να μειωθεί η ευαισθησία της μεθόδου στις μεταβολές του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου βελτιώνοντας την αναπαραγωγιμότητα των μετρήσεων με αποτέλεσμα να έχουμε την δυνατότητα για καλύτερη εκτίμηση του μαγνητικού πεδίου. Το αποτέλεσμα είναι ένα ισοδύναμο μοντέλο πολλαπλών μαγνητικών διπόλων ή τετραπόλων για κάθε δοκίμιο.

Η παρούσα εργασία σκοπό έχει να περιγράψει την έρευνα και την ανάπτυξη μιας διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων Multi Magnetometer Facility (MMF) με την δυνατότητα να πραγματοποιεί μετρήσεις στιγμιοτύπου μαγνητικής υπογραφής μειώνοντας τον χρόνο

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

μέτρησης και βελτιώνοντας την αναπαραγωγιμότητα. Η εργασία περιλαμβάνει α) την μελέτη πιθανών σχηματισμών πολλαπλών μαγνητομέτρων προκειμένου να εντοπιστούν οι περισσότερο κατάλληλες με βάση θεωρητική ανάλυση και εξομοιώσεις (παράγραφος 2), β) την μηχανολογική κατασκευή, τα ηλεκτρονικά μέρη (παράγραφος 3), γ) το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων (παράγραφος 4), ενώ το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει μετρήσεις επικύρωσης της μεθόδου μετρώντας καλά χαρακτηρισμένες γνωστές πηγές.

2. Μελέτη σχηματισμών πολλαπλών μαγνητομέτρων

Σε αυτήν την παράγραφο διατυπώνεται το πρόβλημα, περιγράφεται το αναγκαίο θεωρητικό υπόβαθρο μαζί με τους περιορισμούς και τις υποθέσεις που θα χρησιμοποιηθούν στην προτεινόμενη μέθοδο. Προκειμένου να αναπτυχθεί η διάταξη μέτρησης ερευνήθηκαν αρκετοί διαφορετικοί σχηματισμοί πολλαπλών μαγνητομέτρων. Σκοπός της μελέτης είναι να εξασφαλίζει ότι η διάταξη α) μπορεί να πραγματοποιεί μέτρηση στιγμιοτύπου μαγνητικού πεδίου (χρόνος μέτρησης <1s), β) να χρησιμοποιεί έναν βέλτιστο (με όρους αναπαραγωγιμότητας και επαναληψιμότητας) αριθμό μαγνητομέτρων και σχηματισμό και γ) επιτρέπει την χρήση των μαγνητομέτρων σε διάταξη gradio. Στην φάση της έρευνας πολλοί σχηματισμοί με διαφορετικό αριθμό μαγνητομέτρων μελετήθηκαν ενώ όσοι κάλυπταν τις απαιτήσεις σχεδίασης και εμφάνισαν αποδεκτή απόδοση συμπεριλήφθηκαν στην τελική ανάλυση χρυσής τομής (trade-off analysis). Οι απαιτήσεις σχεδίασης προέρχονται από τον προαναφερθέντα διαγωνισμό του ΕΟΔ και σχετίζονται με τις απαιτήσεις ακρίβειας στην μέτρηση της διάταξης.
Οι πιό σημαντικές σχεδιαστικές απαιτήσεις είναι: α) ακρίβεια τοποθέτησης μαγνητομέτρου 1mm και ακρίβεια διεύθυνσης $<0,5^0$ μεταξύ μαγνητομέτρου και δοκιμίου, β) ο μηχανολογικός σχεδιασμός θα πρέπει να εμφανίζει αναισθησία στις δονήσεις κατά την διάρκεια της μέτρησης <1mm, γ) τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στην μηχανολογική διάταξη, ειδικά κοντά στο δοκίμιο, θα πρέπει να είναι μη-μαγνητικά, δ) να υποστηρίζει δοκίμια συγκεκριμένων διαστάσεων και βάρους (60x60x30 cm, 35 kg), ε) το σύστημα συντεταγμένων να είναι καρτεσιανό με τον άξονα z να είναι κάθετος στην επιφάνεια της Γής, στ) τα μαγνητόμετρα θα πρέπει να μπορούν να μετακινηθούν και στις τρεις διευθύνσεις και ακτινικά σε συγκεκριμένο εύρος ακτινικής απόστασης από το κέντρο του δοκιμίου.

Οι απαιτήσεις για την πιστοποίηση καλής λειτουργίας της διάταξης με όρους ακρίβειας της εκτίμησης του μοντέλου πολλαπλών διπόλων περιγράφονται στην παράγραφο 2.4.

2.1 Μαθηματικό υπόβαθρο

Η υπόθεση που χρησιμοποιούμε είναι ότι οι πραγματικές μαγνητικές πηγές εντός του δοκιμίου μπορούν να αναπαρασταθούν από έναν μικρό αριθμό διπόλων. Πρέπει να τονιστεί ότι δεν μπορούν όλες οι πηγές μαγνητικού πεδίου σε ένα σκάφος να αναπαρασταθούν από μαγνητικά δίπολα καθώς σε κάποιες περιπτώσεις τα ηλεκτρικά ρεύματα που κυκλοφορούν σε εξοπλισμό όπως π.χ η φωτοβολταϊκή διάταξη πρέπει να αντιμετωπιστούν αναλυτικά π.χ

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

με τον νόμο των Biot-Savart [10]. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα μαγνητικό δίπολο ροπής m στο σημείο παρατήρησης r στον ελεύθερο χώρο δίνεται από την [21]:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3(\mathbf{r}-\mathbf{r}')[(\mathbf{r}-\mathbf{r}')\cdot\mathbf{m}]}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^5} - \frac{\mathbf{m}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3}\right] \quad (1)$$

Όπου $\mathbf{r}'$ είναι η θέση της μαγνητικής ροπής m και μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα στον ελεύθερο χώρο. Η εξίσωση 1 επιτρέπει, επίσης, να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο B στις θέσεις των μαγνητομέτρων $\mathbf{r}_{mag}$, στο σύστημα συντεταγμένων του σκάφους για οποιαδήποτε μαγνητική ροπή παράγεται από το δοκίμιο (επαγόμενη ή παραμένουσα).

2.2 Σχηματισμός του προβλήματος

Υποθέτουμε ότι το δοκίμιο τοποθετείται στην θέση αναφοράς και η μαγνητική του συμπεριφορά μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα σύνολο από M μαγνητικά δίπολα που βρίσκονται σε θέσεις $\mathbf{r'}_i = (x_i, y_i, z_i)$ με i = 1,2,…M σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων με μαγνητικές ροπές m_i:

$$\mathbf{m}_i = m_{i_x}\hat{\mathbf{x}} + m_{i_y}\hat{\mathbf{y}} + m_{i_z}\hat{\mathbf{z}} \quad (2)$$

Επίσης, τα σημεία παρατήρησης (οι θέσεις των μαγνητομέτρων N_{MAG}) βρίσκονται στις θέσεις $\mathbf{r}_{0j} = (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j})$, όπου $\mathbf{r}_{0j} = (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j})$, (Σχήμα 1). Οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το μαγνητικό δίπολο i στο σημείο παρατήρησης j μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την (3):

$$\begin{aligned} Bx_{ij} &= \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3(x_{0j}-x_i)}{\left|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r'}_i\right|^5}L_{ij} - \frac{m_{i_x}}{\left|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r'}_i\right|^3}\right] \\ By_{ij} &= \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3(y_{0j}-y_i)}{\left|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r'}_i\right|^5}L_{ij} - \frac{m_{i_y}}{\left|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r'}_i\right|^3}\right] \\ Bz_{ij} &= \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3(z_{0j}-z_i)}{\left|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r'}_i\right|^5}L_{ij} - \frac{m_{i_z}}{\left|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r'}_i\right|^3}\right] \end{aligned} \quad (3)$$

Το εσωτερικό γινόμενο L_{ij} και η απόσταση μεταξύ της πηγής και του σημείου παρατήρησης είναι:

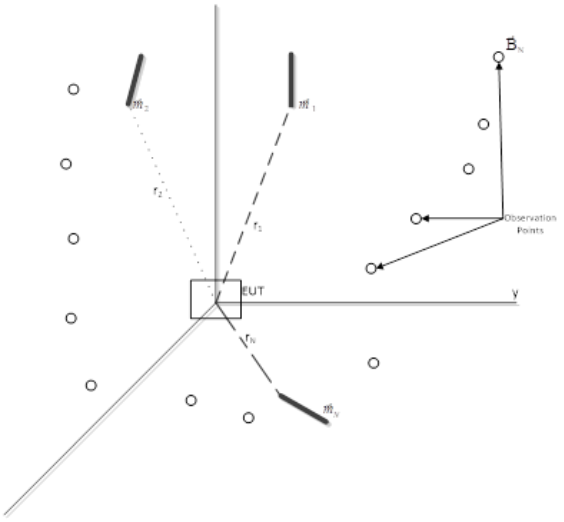
$$L_{ij} = m_{i_x}(x_{0j}-x_i) + m_{i_y}(y_{0j}-y_i) + m_{i_z}(z_{0j}-z_i) \quad (4)$$

$$\left|\boldsymbol{r}_{0j}-\boldsymbol{r'}_i\right| = \sqrt{(x_{0j}-x_i)^2 + (y_{0j}-y_i)^2 + (z_{0j}-z_i)^2} \quad (5)$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τα M μαγνητικά δίπολα στα σημεία παρατήρησης j θα είναι η υπέρθεση όλων των συνεισφορών τους:

$$\mathbf{B}_j = \sum_{i=1}^{M} Bx_{ij}\,\hat{\mathbf{x}} + \sum_{i=1}^{M} By_{ij}\,\hat{\mathbf{y}} + \sum_{i=1}^{M} Bz_{ij}\,\hat{\mathbf{z}} \quad (6)$$

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα



Σχήμα 1: Περιγραφή του προβλήματος

2.3 Πλήθος & Σχηματισμός των μαγνητομέτρων

Οι παράμετροι της πηγής του μαγνητικού πεδίου που πρέπει να καθοριστούν είναι η θέση του διπόλου (x, y, z) καθώς και η αντίστοιχη μαγνητική ροπή (m_x, m_y, m_z)**.** Ο αλγόριθμος MDM χρησιμοποιεί το μαγνητικό δίπολο (εξ.3) προκειμένου να εκτιμήσει αυτές τις 6 παραμέτρους για κάθε πηγή-δίπολο οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την σύνθεση της μαγνητικής υπογραφής του δοκιμίου.

Δεδομένου ότι οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι 6 για κάθε πηγή-δίπολο και τα τρι-αξονικά μαγνητόμετρα παρέχουν τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (B_x, B_y, B_z) είναι επιτακτική ανάγκη να χρησιμοποιηθούν αρκετά μαγνητόμετρα για να καταγράφουν ταυτόχρονα την μαγνητική υπογραφή του δοκιμίου. Επίσης, πολύπλοκα δοκίμια μπορεί να αποτελούνται από περισσότερα από ένα μαγνητικά δίπολα. Με βάση τα παραπάνω, εξετάστηκαν αρκετοί σχηματισμοί με πλήθος μαγνητομέτρων από 6 έως 12 προκειμένου να μπορούν να εκτιμηθούν από την μέτρηση οι παράμετροι έως και 5 μαγνητικών διπόλων. Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα εξετάστηκαν αρκετοί σχηματισμοί αλλά αναλύθηκαν εκτενέστερα 6 από αυτούς και περιγράφονται στο παράρτημα 1.

2.4 Κριτήρια αποδοχής και ανάλυση

Κατά την αρχή της εργασίας δεν ήταν διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις οπότε ήταν απαραίτητο να παραχθούν σύνολα μετρήσεων προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην μέθοδο ανάλυσης των προτεινόμενων σχηματισμών. Για να παραχθούν τα σύνολα μετρήσεων («εικονικές μετρήσεις») χρησιμοποιήθηκαν εικονικά δίπολα-πηγές στις θέσεις x, y, z με μαγνητικές ροπές m_x, m_y, m_z που παράγουν μαγνητικό πεδίο στις προκαθορισμένες θέσεις (τις θέσεις των μαγνητομέτρων) (εξ. 3). Οι παραγόμενες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου παραμορφώνονται κατά μια ποσότητα q:

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

$$\begin{cases} B_{distortedx_j} = B_{dx_j} + q \cdot (rand - rand) \cdot B_{dx_j} \\ B_{distortedy_j} = B_{dy_j} + q \cdot (rand - rand) \cdot B_{dy_j} \\ B_{distortedz_j} = B_{dz_j} + q \cdot (rand - rand) \cdot B_{dz_j} \end{cases} (7)$$

Όπου q είναι η μέγιστη (%) τιμή της παραμόρφωσης, η $rand$ παίρνει μια τιμή στο διάστημα [0,1] ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή, και $B_{dx_j}, B_{dy_j}, B_{dz_j}$ είναι οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου των εικονικών μαγνητικών διπόλων-πηγών που παράγονται σύμφωνα με την εξίσωση 3. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 7 εισάγεται θόρυβος μαγνητικού πεδίου με αποτέλεσμα τιμές συνιστωσών μαγνητικού πεδίου με παραμόρφωση.

Στις μετρήσεις μαγνητικού πεδίου για διαστημικές αποστολές (μαγνητική καθαρότητα) ένας παράγοντας που συνεισφέρει στην αβεβαιότητα της μέτρησης είναι η ακρίβεια μέτρησης της απόστασης μεταξύ του δοκιμίου και των μαγνητομέτρων. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η αβεβαιότητα οι θέσεις των μαγνητομέτρων μετατοπίστηκαν με τυχαίο τρόπο με μέγιστη τιμή 1 mm και τρία δίπολα-πηγές χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμιο. Η, εικονική, μέτρηση στιγμιοτύπου επαναλήφθηκε 20 φορές ώστε να υπάρχουν αρκετά δείγματα. Η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ των τιμών μαγνητικού πεδίου που μετρήθηκαν στην αρχική και στην μετατοπισμένη θέση υπολογίστηκε 1,46%. Επειδή δεν ελήφθησαν υπόψιν και άλλες πηγές αβεβαιότητας, όπως ο θόρυβος των μαγνητομέτρων, η θερμοκρασία και η υγρασία αλλά και οι μεταβολές του περιβάλλοντος θορύβου (του πεδίου της Γής) αποφασίστηκε ότι μια λογικά αναμενόμενη τιμή της αβεβαιότητας θα ήταν 5% [22]. Για την παρούσα μελέτη, η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι 10% προκειμένου να συμπεριληφθούν ακραία σενάρια στα οποία οι μετρήσεις περιέχουν αρκετό θόρυβο. Επίσης, η μελέτη των σχηματισμών συμπεριλαμβάνει περιβάλλον θόρυβο του χώρου μετρήσεων ο οποίος υπερτίθεται στις παραμορφωμένες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου (εξ. 7). Ο περιβάλλον θόρυβος θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή $\mu = 0$ και απόκλιση $\sigma = 1$ nT. Τα παραπάνω έχουν ώς αποτέλεσμα ο θόρυβος που υπερτίθεται στις μετρήσεις για τους σκοπούς της μελέτης να αντιπροσωπεύει θόρυβο πραγματικών μετρήσεων (τυπικά μεταξύ 250 pT και 1 nT).

Οι 6 σχηματισμοί εξετάστηκαν με χρήση των «εικονικών μετρήσεων» που παράχθηκαν με την προαναφερθείσα διαδικασία. Πολλά αποτελέσματα μετρήσεων παράχθηκαν με εξομοιώσεις και δόθηκε μεγάλη έμφαση σε αυτό διότι ο βέλτιστος σχηματισμός θα πρέπει να λειτουργεί δίνοντας αποτελέσματα με βάση πραγματικές μετρήσεις. Να σημειωθεί ότι σε αυτή την φάση εξετάστηκαν και τεχνικές αποθορυβοποίησης μετρήσεων, όπως για παράδειγμα να συλλέγονται αρκετά σύνολα μετρήσεων στιγμιοτύπου (πολλά στιγμιότυπα) στον χρόνο που προβλέπεται (<1s). Η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων ελέγχθηκε για όλους τους σχηματισμούς αλλά και για διαφορετικό αριθμό μαγνητομέτρων (μικρότερων από 12). Προκειμένου να καταλήξουμε σε αποδεκτές λύσεις σχηματισμών χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα κριτήρια:

Ι) Η σχετική απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων και των «μοντελοποιημένων» μαγνητικών πεδίων και έλεγχος καλής προσαρμογής (*Goodness of Fit).*

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

$$C_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{MAG}} (\Delta Bx_i{}^2 + \Delta By_i{}^2 + \Delta Bz_i{}^2)}{\sum_{i=1}^{N_{MAG}} (Bx_i{}^2 + By_i{}^2 + Bz_i{}^2)}} \quad (8)$$

όπου Bx_i, By_i και Bz_i είναι οι μετρούμενες τιμές του μαγητικού πεδίου στο σημείο παρατήρησης i και ΔBx_i, ΔBy_i και ΔBz_i είναι οι διαφορές μεταξυ των μετρούμενων και των τιμών που παράγονται από το μοντέλο.

ΙΙ) Η απόκλιση της θέσης του δοκιμίου σε σχέση με τα μαγνητόμετρα όπως προέρχεται από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου. Αυτή η απόκλιση είναι ισοδύναμη με την διαφορά μεταξύ της θεωρητικής τιμής θέσης και της τιμής που παράγει το μοντέλο πολλαπλών διπόλων (MDM), $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_2 = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (9)$$

Από τον διαγωνισμό του ΕΟΔ είχαν τεθεί οι ακόλουθες τιμές ορίων των δυο κριτηρίων [23]: i) $C_1 < 10\%$, ii) $C_2 < 5$ mm. Με αυτές τιμές να ικανοποιούνται το μοντέλο πολλαπλών διπόλων μπορεί να αναπαραστήσει την μαγνητική υπογραφή του δοκιμίου.

2.5 Αποτελέσματα εξομοιώσεων και ανάλυση χρυσής τομής

Προκειμένου να είναι δυνατή η αξιολόγηση της ακρίβειας αλλά και της επίδοσης της υπό ανάπτυξης μετρητικής διάταξης αλλά και της μεθόδου 5 περιπτώσεις προτύπων δοκιμίων που αντιστοιχούν σε γνωστά μοντέλα πολλαπλών μαγνητικών διπόλων χρησιμοποιήθηκαν: α) 1 δίπολο με μικρή μαγνητική ροπή, β) 2 δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές, γ) 2 δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές σε απόσταση 20 cm, δ) 2 δίπολα με αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές σε απόσταση 7 mm και ε) ένα πηνίο με γνωστή μαγνητική ροπή ~69 mAm^2.
Για τους σκοπούς της μελέτης, εικονικά δίπολα-πηγές χρησιμοποιήθηκαν για να παράξουν το θεωρητικό μαγνητικό πεδίο στα σημεία παρατήρησης ενώ σε αυτό εισήχθη παραμόρφωση σύμφωνα με την εξ.7 ενώ επίσης προστέθηκε τυχαίος περιβάλλον θόρυβος. Οι παραγόμενες εικονικές μετρήσεις τροφοδότησαν τον αλγόριθμο [25] της μοντελοποίησης πολλαπλών μαγνητικών διπόλων (MDM) μέσω του λογισμικού RIBOSOME που αναπτύχθηκε για τους σκοπούς της εργασίας, (και θα αναλυθεί στη συνέχεια) με σκοπό να αντιστοιχηθούν σε δυο, το πολύ, δίπολα-πηγές. Τότε, το παραγόμενο μοντέλο αξιολογείται με βάση τα κριτήρια της προηγούμενης παραγράφου. Πλήρη στοιχεία των εξομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν δίνονται στο [24] όπου υπάρχουν δεδομένα και από εξομοιώσεις περισσότερο πολύπλοκων δομών μοντέλου πολλαπλών μαγνητικών διπόλων όπως 3 δίπολα, 1 δίπολο και ένα τετράπολο, 5 δίπολα. Στη συνέχεια, προκειμένου να εξασφαλίζεται η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων μερικές από τις παραμέτρους των εικονικών διπόλων-πηγών μεταβάλλονταν ώστε να διαπιστωθεί ότι οι εξεταζόμενοι σχηματισμοί μπορούν να ικανοποιήσουν τα κριτήρια αποδοχής. Παράμετροι που μεταβάλλονταν ήταν η θέση των διπόλων ακολουθώντας κανονική κατανομή, ο περιβάλλον θόρυβος και οι μεταβολές του.

Όσον αφορά τον αριθμό των μαγνητομέτρων οι εξομοιώσεις αλλά και η ανάλυση των απαιτήσεων έδειξε ότι δεν μπορεί να είναι μικρότερος από 10 ενώ ο βέλτιστος αριθμός τους

είναι 12. Οι 6 σχηματισμοί με 12 μαγνητόμετρα που αναλύθηκαν ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις καλύπτοντας τα κριτήρια αποδοχής. Όμως, στην επιλογή του σχηματισμού που θα αποτελέσει και την διάταξη που θα κατασκευαστεί, λήφθηκαν υπόψιν και άλλοι, περισσότερο πρακτικοί παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα της σχεδίασης, η σταθερότητα της κατασκευής, το κόστος, η ευκολία στην χρήση, ο χρόνος ανάπτυξης, ο ωφέλιμος χώρος μέτρησης κ.α. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυση χρυσής τομής των 6 σχηματισμών μπορούν να εξαχθούν, συνοπτικά, τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όλοι οι σχηματισμοί έχουν καλή απόδοση όσον αφορά το παραγόμενο μοντέλο πολλαπλών διπόλων (MDM),
- Η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων όλών των σχηματισμών είναι πολύ καλή,
- Οι σχηματισμοί 5 και 6 είναι πολύπλοκης κατασκευής ενώ εμφανίζουν δυσκολία στην χρήση από τον χειριστή,
- Ο σχηματισμός 1 δεν προσφέρει ευελιξία για μελλοντικές αλλαγές,
- Οι σχηματισμοί 2 και 4 φαίνεται να καλύπτουν πολύ καλά όλες τις απαιτήσεις.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο μεγαλύτεροι για πιο σημαντικά κριτήρια όπως η ακρίβεια του μοντέλου ή η πολυπλοκότητα και μικρότεροι για κριτήρια όπως ο χρόνος ανάπτυξης ή ευκολία στην χρήση.

3. Περιγραφή της διάταξης μέτρησης πολλαπλών μαγνητομέτρων (MMF)

Με βάση την ανάλυση που έγινε στην παράγραφο 2.5 στην οποία εντοπίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σχηματισμών, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια πρωτότυπη διάταξη πολλαπλών μαγνητομέτρων με την δυνατότητα να μπορούν να πραγματοποιούνται κάποιοι από τους σχηματισμούς [26]. Τα κύρια στοιχεία της διάταξης είναι:

i. ο μετρητικός εξοπλισμός, τα μαγνητόμετρα, που το πλήθος τους είναι 12 καθώς και το σύστημα συλλογής δεδομένων μετρήσεων (DAQ) της μαγνητικής υπογραφής ενός δοκιμίου,
ii. το μηχανολογικό σύστημα που αποτελείται από μια δομή κοινού πάνελ (common panel) που υποστηρίζει όλα τα μηχανολογικά μέρη που χρησιμοποιούνται για την στήριξη των μαγνητομέτρων και την κίνησή τους ακτινικά και καθ' ύψος καθώς και την στήριξη του δοκιμίου,
iii. το λογισμικό, το οποίο ονομάζεται RIBOSOME, το οποίο ελέγχει την λειτουργία της διάταξης και παρέχει το μοντέλο πολλαπλών διπόλων (MDM).

3.1 Μετρητικός Εξοπλισμός και Σύστημα Συλλογής Δεδομένων Μετρήσεων

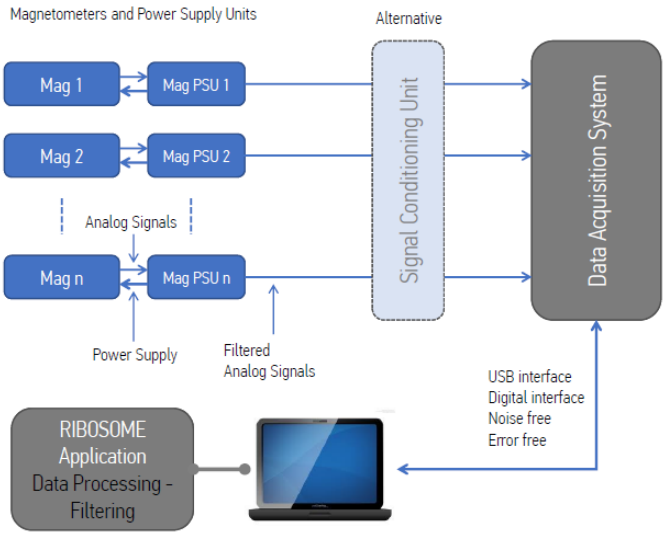
Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας της μέτρησης της διάταξης MMF είναι η στιγμιαία καταγραφή του μαγνητικού πεδίου ενός δοκιμίου (στιγμιότυπο) και να παρέχει τα αποτελέσματα αυτά σε έναν αλγόριθμο MDM που παρέχει την πρόβλεψη του μοντέλου πολλαπλών μαγνητικών διπόλων του δοκιμίου. Με βάση τα παραπάνω, ο συνολικός χρόνος της μέτρησης της μαγνητικής υπογραφής ενός δοκιμίου είναι σχετικά μικρός προκειμένου

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

να μην υπάρχει επίδραση της μεταβολής του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου; του πεδίο της Γής αλλά και του μαγνητικού πεδίου που υπάρχει τοπικά στον χώρο μέτρησης. Μετά από ανάλυση των απαιτήσεων αλλά και της διαδικασίας που χρησιμοποιούνταν μέχρι τώρα επιλέχθηκε η παρακάτω διαδικασία μέτρησης του μαγνητικού πεδίου ενός δοκιμίου που είναι μια ακολουθία τριών διαδοχικών μετρήσεων στιγμιοτύπου:

(i) Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος (πρίν), $B_{AMBbefore}$,
(ii) Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου του δοκιμίου (EUT), B_{EUT},
(iii) Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου περιβάλλοντος (μετά), $B_{AMBafter}$.

Ο λόγος που γίνονται οι παραπάνω τρεις μετρήσεις είναι ότι η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου του δοκιμίου που είναι μικρής τιμής (1 έως 2000 nT) γίνεται παρουσία του μαγνητικού πεδίου της Γής που είναι της τάξης 20000 έως 45000 nT. Επομένως, η πρώτη και η τελευταία μέτρηση χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί το πεδίο της Γης στο χώρο μέτρησης (μαζί με την συνεισφορά μαγνητικού πεδίου που υπάρχει τοπικά π.χ από την ηλεκτρολογική υποδομή του κτηρίου) και να υπολογιστεί μια μέση τιμή αυτής. Επίσης, οι δυο αυτές μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως κριτήριο για την εγκυρότητα της μέτρησης του δοκιμίου (στην περίπτωση που διαφέρουν αρκετά). Η δεύτερη μέτρηση ενσωματώνει και την συνεισφορά του μαγνητικού πεδίου του δοκιμίου μαζί με αυτό της Γής. Οπότε, η μαγνητική υπογραφή του δοκιμίου προκύπτει από την αφαίρεση της μέσης τιμής των μετρήσεων 1 και 3 από την μέτρηση 2. Διαπιστώνουμε λοιπόν, ότι είναι σημαντικό η ακολουθία αυτών των τριών μετρήσεων να πραγματοποιηθεί σχετικά γρήγορα ώστε να μην υπάχρει σημαντική διαφορά μεταξύ των μετρήσεων 1 και 3. Στις μετρήσεις 1 και 3 το δοκίμιο βρίσκεται εκτός του χώρου μέτρησης της διάταξης και ο χειριστής το τοποθετεί μόνο στην μέτρηση 2. Όπως έχει αναφερθεί και πιο πρίν η μέτρηση στιγμιοτύπου από την διάταξη MMF γίνεται πολύ γρήγορα (<1s).



Σχήμα 2: Διάγραμμα Συστήματος Μέτρησης

Με βάση την φιλοσοφία της μέτρησης και την διαδικασία της η διάταξη περιλαμβάνει 12 πολύ ευαίσθητα μαγνητόμετρα τύπου fluxgate που παρέχουν μετρήσεις ακριβείας για κάθε

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

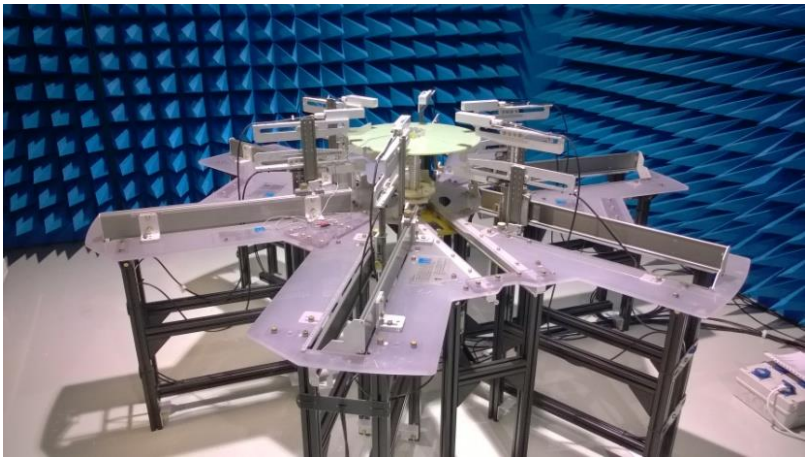
άξονα, B_x, B_y, B_z. Τα μαγνητόμετρα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για μετρήσεις DC μαγνητικού πεδίου καθώς και εναλλασσόμενου πεδίου μέχρι περίπου τα 3 kHz. Τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στο παράρτημα 2.

Το σύστημα συλλογής των μετρήσεων της διάταξης MMF αποτελείται από δύο όμοιες μονάδες συλλογής δεδομένων μετρήσεων USB-6289 της εταιρείας National Instruments υψηλών επιδόσεων και τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται, ομοίως στο παράρτημα 2.
Ένα διάγραμμα που αποτυπώνει την λειτουργία του συστήματος μέτρησης της διάταξης MMF παρατίθεται στο Σχήμα 2. Το σύστημα συλλογής δεδομένων παραμετροποιήθηκε κατάλληλα ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις της μεθοδολογίας μέτρησης και υποστηρίζει συλλογή μετρήσεων από 12 μαγνητόμετρα (Συνολικός αριθμός καναλιών 12x3 – 36) με διακριτική ικανότητα 18 bit που αντιστοιχεί σε μαγνητικό πεδίο ~1 nT.

3.2 Μηχανολογική Διάταξη

Ο σκοπός της μηχανολογικής διάταξης που υποστηρίζει τα μαγνητόμετρα και το δοκίμιο [26] είναι να προσφέρει μία σταθερή και αξιόπιστη κατασκευή εξασφαλίζοντας υψηλής ποιότητας μετρήσεις. Η μηχανολογική διάταξη (Εικόνα 1) αποτελείται από τρείς υπο-μηχανισμούς:

i) Ένα οριζόντιο πάνελ, που βασίζεται σε υποπλαίσια μπαρών/προφίλ σχεδιασμένα να προσφέρουν μία άκαμπτη κατασκευή και αξιόπιστες θέσεις μαγνητόμετρων.
ii) Ο μηχανισμός του τραπεζιού (Εικόνα 2) που φιλοξενεί το δοκίμιο.
iii) Δώδεκα μηχανισμούς υποστήριξης μαγνητομέτρων (Εικόνα 3) οι οποίοι μετακινούνται ακτινικά ως προς το κέντρο του τραπεζιού όπως και καθ' ύψος.

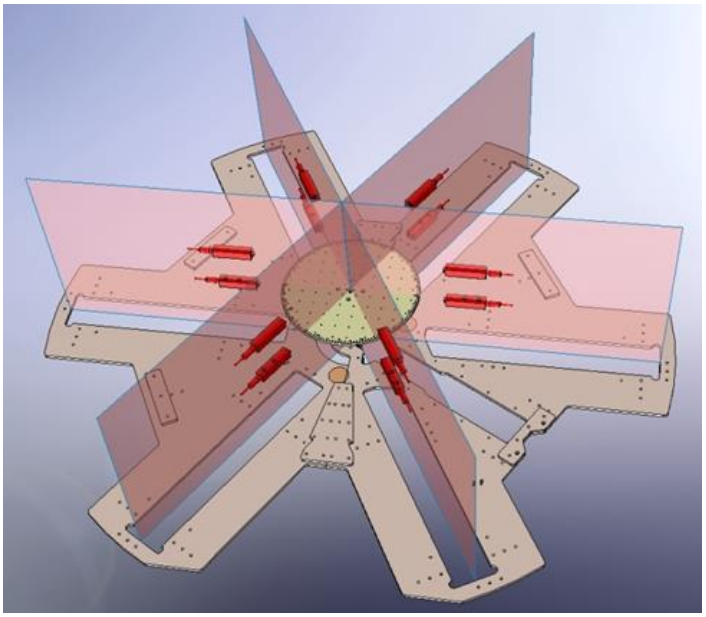


Εικόνα 1: Η μηχανολογική διάταξη proto-MMF

Η διάταξη ορίζει, ακτινικά, έξι νοητά κάθετα επίπεδα τα οποία, ανά δύο, έχουν μεταξύ τους γωνία 60°. Σε κάθε επίπεδο λειτουργίας κινούνται ανεξάρτητα 2 μαγνητόμετρα (ζεύγος μαγνητόμετρων). Εν γένει, έξι μαγνητόμετρα (ένα σε κάθε επίπεδο, Σχήμα 3) κινούνται σε χαμηλότερο ύψος από αυτό του τραπεζιού ενώ τα υπόλοιπα σε υψηλότερο. Τα μαγνητόμετρα έχουν δυνατότητα κάθετης και οριζόντιας (ακτινικής) κίνησης οι οποίες

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

εξυπηρετούν την υλοποίηση μερικών διαφορετικών σχηματισμών τοποθέτησης μαγνητομέτρων.



Σχήμα 3: Επίπεδα λειτουργίας των μαγνητόμετρων περιφερειακά του τραπεζιού.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της μηχανολογικής κατασκευής του MMF είναι:

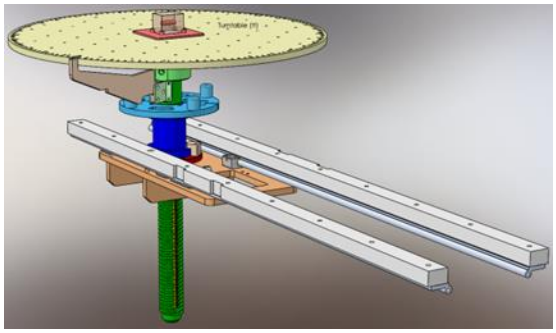
i. Φιλοξενεί δώδεκα (12) μαγνητόμετρα σε καθορισμένα επίπεδα λειτουργίας (σε μεταξύ τους γωνία 60°) ώστε να εξυπηρετούν μερικούς από τους σχηματισμούς μέτρησης.
ii. Το οριζόντιο (ακτινικό) φάσμα λειτουργίας των μαγνητόμετρων είναι από 0 έως 100 cm (απόσταση από το κέντρο του τραπεζιού). Το κάθετο φάσμα λειτουργίας των μαγνητόμετρων είναι από -24 έως 70 cm. Το φάσμα μεταβάλλεται ανάλογα με την υψομετρική θέση του τραπεζιού.
iii. Το τραπέζι του δοκιμίου έχει φάσμα υψομετρικής μετατόπισης 20 cm.
iv. Το τραπέζι του δοκιμίου έχει δυνατότητα περιστροφής (360°) ανεξάρτητη της υψομετρικής μετατόπισης. Η γωνιακή θέση του τραπεζιού ελέγχεται από εκτυπωμένο (επί του τραπεζιού) κανόνα βήματος 2.5°. Το τραπέζι έχει επίσης δυνατότητα οριζόντιας μεταφοράς μίας κατεύθυνσης προς την περίμετρο της κατασκευής για εύκολη τοποθέτηση βαρύτερων δοκιμίων.
v. Το τραπέζι (EUT turntable) περιέχει πλήθος ενθέτων-σπειρωμάτων σε ορθογώνια διάταξη βήματος 5 cm επιτρέποντας την ακριβή μετατόπιση των δοκιμίων όταν αυτά είναι τοποθετημένα σε ανάλογη ιδιοσυσκευή.
vi. Τα έξι ακτινικά επίπεδα μετατόπισης των μαγνητόμετρων έχουν ανοχή σφάλματος γωνίας 0.5°. Η θέση των μαγνητόμετρων σε σχέση με το κέντρο του τραπεζιού καθορίζεται με ακρίβεια 1 mm.
vii. Η διάμετρος του τραπεζιού είναι 50.5 cm ενώ το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος του δοκιμίου είναι 20 κιλά. Υπάρχει επιπλέον διάταξη η οποία επιτρέπει να τοποθετείται βαρύτερο, έως 50 κιλά, δοκίμιο.

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

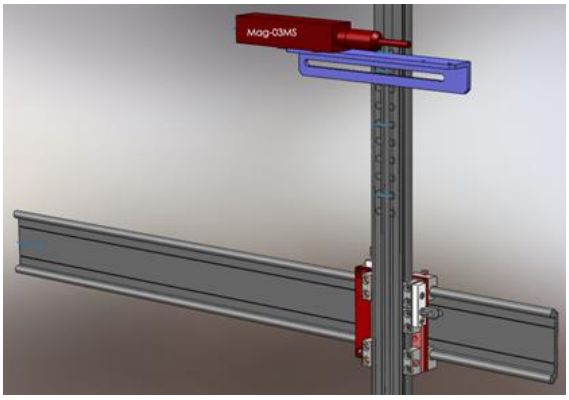
Ανάπτυξη πρωτοτύπου διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων για μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής διαστημικού εξοπλισμού

7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018

viii. Η ακριβής θέση των μαγνητόμετρων σε σχέση με το κέντρο του τραπεζιού υπολογίζεται από οριζόντιους και κάθετους αυτοκόλλητους κανόνες.
ix. Η μηχανολογική κατασκευή φέρει περιφερειακά έξι εσοχές για την εύκολη φυσική πρόσβαση του τραπεζιού από τον χειριστή.
x. Όλα τα υλικά της μηχανολογικής κατασκευής είναι μη-μαγνητικά.
xi. Η μηχανολογική κατασκευή είναι διαμέτρου 2.4 m και (μέγιστου) ύψους 1,65 m.
xii. Το σύστημα συντεταγμένων της κατασκευής είναι δεξιόστροφο Καρτεσιανό με άξονες που ονομάζονται x, y (οριζόντια θέση) και z (ύψος).



Εικόνα 2: Ο μηχανισμός του τραπεζιού

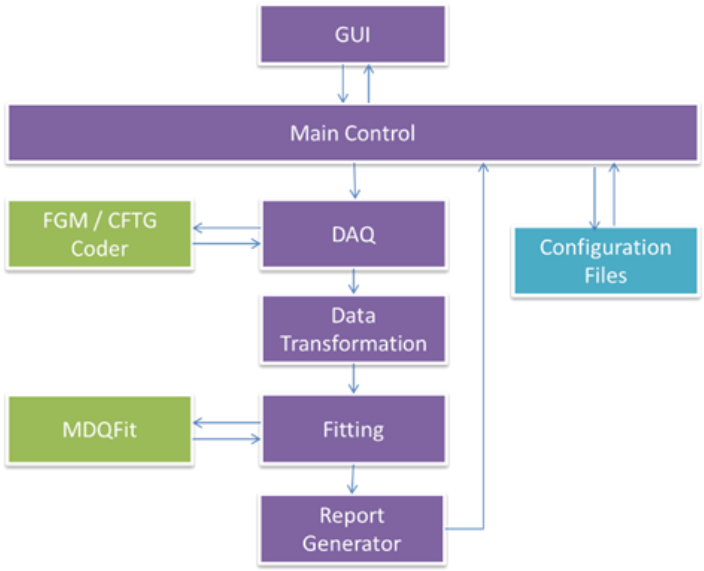


Εικόνα 3: Μηχανισμός υποστήριξης μαγνητόμετρων

3.3 Λογισμικό της διάταξης MMF – RIBOSOME

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει τη νέα διαδικασία μέτρησης στιγμιοτύπου και περιλαμβάνει την συλλογή των δεδομένων από το σύστημα μέτρησης, την επεξεργασία τους καθώς και την διασύνδεση με τον αλγόριθμο μοντελοποίησης πολλαπλών μαγνητικών διπόλων (MDM). Ακόμη, το λογισμικό ελέγχει ολόκληρη την διαδικασία μέτρησης καθώς και την αποτύπωση/απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Το λογισμικό έχει βασιστεί σε παλαιότερη έκδοση λογισμικού που υποστηρίζει τις μετρήσεις με χρήση MCF και χρησιμοποιείται αρκετά χρόνια από τον ΕΟΔ. Το λογισμικό επαναχρησιμοποιεί τον προϋπάρχοντα αλγόριθμο μοντελοποίησης MDM (ο οποίος προσφέρει μια εκτίμηση ενός ελάχιστου αριθμού μαγνητικών διπόλων-πηγών με τους οποίους μπορεί να αναπαρασταθεί η μετρούμενη μαγνητική υπογραφή ενός δοκιμίου) αλλά έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές δεδομένου ότι η φιλοσοφία της μέτρησης είναι αρκετά διαφορετική. Το επόμενο σχήμα (Σχήμα 4) παρουσιάζει τα δομικά στοιχεία του λογισμικού RIBOSOME.
Στη συνέχεια περιγράφονται οι είσοδοι, τα δομικά στοιχεία, οι έξοδοι καθώς και οι δομές λειτουργίας του λογισμικού:
Α) Είσοδοι
- Οι θέσεις των μαγνητομέτρων στο χώρο μέτρησης (παράρτημα 3, Σχήμα 13).
- Η θέση του δοκιμίου

- Αριθμός διπόλων και/ή τετραπόλων που θα συνθέσουν το μοντέλο πολλαπλών διπόλων (MDM)
- Παράμετροι της μεθόδου επίλυσης (αριθμός επαναλήψεων, συνάρτηση προσαρμογής κλπ)
- Η μέθοδος επίλυσης (αλγόριθμοι μοντελοποίησης, γενετικοί, PSO)
- Αριθμός μετρήσεων στιγμιοτύπου (παράρτημα 3, Σχήμα 15)



Σχήμα 4: Δομικά στοιχεία λογισμικού RIBOSOME

Β) Δομικά στοιχεία και λειτουργίες:
- Δομή κυρίου ελέγχου
- Γραφικό περιβάλλον που ελέγχει την λειτουργία της διάταξης
- Δημιουργία αρχείων παραμετροποίησης
- Διασύνδεση μεταξύ του λογισμικού και των αλγορίθμων επίλυσης
- Λειτουργία καθορισμού της θέσης των μαγνητομέτρων (παράρτημα 3, Σχήμα 13)
- Διασύνδεση και ρύθμιση του συστήματος συλλογής μετρήσεων (παράρτημα 3, Σχήμα 14).
- Μετασχηματισμός δεδομένων (για διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων)
- Λειτουργία υλοποίησης της διαδικασίας μέτρησης στιγμιοτύπου (περιλαμβάνει και την αφαίρεση του πεδίου της Γής), (παράρτημα 3, Σχήμα 15)
- Επεξεργασία μετρήσεων, λειτουργίες φιλτραρίσματος δεδομένων μέτρησης
- Λειτουργίες απεικόνισης και αποθήκευσης αποτελεσμάτων

Γ) Έξοδοι
- Δεδομένα μετρήσεων από κάθε μαγνητόμετρο (αναλυτική και γραφική μορφή)
- Αποτελέσματα του αλγορίθμου μοντελοποίησης MDM (αριθμός διπόλων/τετραπόλων και θέση αυτών)
- Αποτελέσματα αξιολόγησης της ποιότητας του αποτελέσματος

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

3.4 Περιορισμοί

Στην διάταξη που αναπτύχθηκε υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στην λειτουργία της. Ο βασικός περιορισμός προκύπτει από τον μεγάλο αριθμό των μαγνητομέτρων που φιλοξενούνται σε αυτή. Δεδομένου ότι σε κάποιες περιπτώσεις δοκιμίων με χαμηλή τιμή μαγνητικού πεδίου τα μαγνητόμετρα θα πρέπει να πλησιάσουν αρκετά το δοκίμιο είναι πιθανό να προκύπτει λίγος χώρος για τον χειριστή να τοποθετήσει το δοκίμιο στη θέση του.

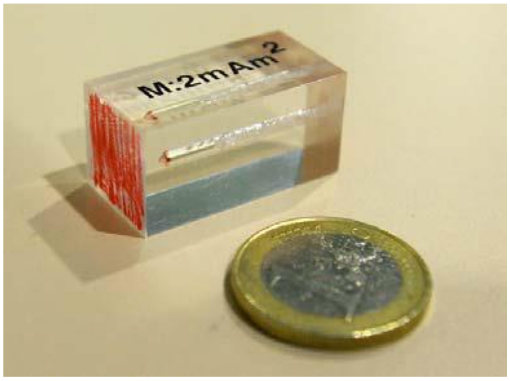
4. Πιστοποίηση της λειτουργίας της διάταξης με πραγματικά δεδομένα μετρήσεων

Για την πιστοποίηση της λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν εκ των προτέρων γνωστές πηγές μαγνητικού πεδίου οι οποίες μετρήθηκαν και μοντελοποιήθηκαν με την χρήση της διάταξης. Οι γνωστές πηγές είναι α) ένα δίπολο ασθενούς τιμής πεδίου, β) ένα δίπολο μεγάλης τιμής πεδίου, γ) 2 δίπολα με παράλληλες μαγνητικές ροπές σε απόσταση 20 cm, δ) 2 δίπολα με αντι-παράλληλες μαγνητικές ροπές σε απόσταση 20 cm, ε) ένα πηνίο, στ) 2 δίπολα με αντι-παράλληλες μαγνητικές ροπές σε απόσταση 7 mm. Όλες οι παραπάνω γνωστές πηγές μετρήθηκαν αρκετές φορές τοποθετημένες σε διαφορετικές τιμές στην διάταξη όπως διαφορετική θέση στο τραπέζι, διαφορετικό ύψος, διαφορετικές θέσεις μαγνητομέτρων προκειμένου να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Ως γενικό αποτέλεσμα, στα μοντέλα που παράχθηκαν για τις γνωστές πηγές έχει γίνει πολύ καλή εκτίμηση της θέσης (x, y, z) ενώ και η εκτίμηση του διανύσματος της μαγνητικής ροπής (m_x, m_y, m_z) εμφανίζει μεγάλη συνέπεια. Τα κριτήρια C_1 και C_2 ικανοποιούνται πλήρως σε όλες τις περιπτώσεις. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο σχηματισμός 2 ενώ τα μαγνητόμετρα βρίσκονταν σε απόσταση 10-20 cm από το κέντρο του τραπεζιού και τα μισά από αυτά σε ύψος z = +10 cm ενώ τα υπόλοιπα 6 σε z = -10 cm. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από δυο γνωστές πηγές για λόγους συντομίας ενώ περισσότερα αποτελέσματα μπορεί κανείς να βρεί στο [27].

α) Αποτελέσματα από ένα δίπολο ασθενούς τιμής πεδίου.
Για την περίπτωση αυτή λόγω της πολύ χαμηλής τιμής του μαγνητικού πεδίου της πηγής τα μαγνητόμετρα τοποθετήθηκαν σε απόσταση 10 cm από το κέντρο του τραπεζιού (Σχήμα 5). Το παραγόμενο μοντέλο και η σύγκρισή του με τις θεωρητικές τιμές παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 1 & Πίνακας 2).

Όπως φαίνεται από τους πίνακες η διαφορά στην θέση του διπόλου μεταξύ της εκτιμώμενης και της θεωρητικής τιμής είναι μικρότερη από 2 mm ενώ η σχετική απόκλιση μεταξύ της μετρούμενης και της εκτιμώμενης τιμής της μαγνητικής ροπής είναι 2.1% οπότε το μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει την μαγνητική υπογραφή του δοκιμίου.

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα



Σχήμα 5: Δίπολο ασθενούς τιμής μαγνητικού πεδίου

Πίνακας 1: Εκτίμηση Μοντέλου – δίπολο με ασθενή τιμή πεδίου

	Θεωρητικό Μοντέλο	Εκτιμώμενο Μοντέλο
x (cm)	7.5	**7.4**
y (cm)	2.5	**2.6**
z (cm)	0.9	**0.9**
m_x (mAm^2)	0	**-0.003**
m_y (mAm^2)	0	**-0.002**
m_z (mAm^2)	-2	**-1.94**
$\|m\|$(mAm^2)	2	**1.94**

Πίνακας 2: Έλεγχος καλής προσαρμογής

Συνολικό RMS υπολοίπων [%]	2.1
Συνολικό RMS υπολοίπων [nT]	1.531

β) Αποτελέσματα από δίπολο ισχυρού μαγνητικού πεδίου

Η μαγνητική ροπή της συγκεκριμένης πηγής είναι ισχυρή σε όλες τις διευθύνσεις (m_x, m_y, m_z). Τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε απόσταση 20 cm από το κέντρο του τραπεζιού (Σχήμα 6). Το παραγόμενο μοντέλο και η σύγκρισή του με τις θεωρητικές τιμές παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 3 & Πίνακας 6).

Όπως φαίνεται από τους πίνακες η διαφορά στην θέση του διπόλου μεταξύ της εκτιμώμενης και της θεωρητικής τιμής είναι μικρότερη από 2 mm ενώ η σχετική απόκλιση μεταξύ της μετρούμενης και της εκτιμώμενης τιμής της μαγνητικής ροπής είναι 2.4% οπότε και σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει την μαγνητική υπογραφή του δοκιμίου.

Σχήμα 6: Δίπολο ασθενούς τιμής μαγνητικού πεδίου

Πίνακας 3 Εκτίμηση Μοντέλου – δίπολο με ασθενή τιμή πεδίου

	Θεωρητικό Μοντέλο	Εκτιμώμενο Μοντέλο
x (cm)	0	**0**
y (cm)	0	**0**
z (cm)	3.3	**3.2**
m_x (mAm^2)	άγνωστη	**501**
m_y (mAm^2)	άγνωστη	**-491.4**
m_z (mAm^2)	άγνωστη	**415**
$\|m\|$(mAm^2)	άγνωστη	**815.3**

Πίνακας 4: Έλεγχος καλής προσαρμογής

Συνολικό RMS υπολοίπων [%]	2.4
Συνολικό RMS υπολοίπων [nT]	109.14

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

Ανάπτυξη πρωτοτύπου διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων για μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής διαστημικού εξοπλισμού

7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018

5. Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα και τις δοκιμές η πρωτότυπη διάταξη μετρήσεων πολλαπλών μαγνητομέτρων λειτουργεί πάρα πολύ καλά όσον αφορά την ακρίβεια του παραγόμενου μοντέλου τόσο όσον αφορά την θέση των διπόλων όσο των συνιστωσών της μαγνητικής τους ροπής όπως φαίνεται και από τις τιμές των τυπικών αποκλίσεων. Επίσης, η συνολική λειτουργία της διάταξης, ειδικότερα των μηχανολογικών μηχανισμών, είναι πολύ καλή. Η συγκεκριμένη διάταξη έχει ήδη παραδοθεί και λειτουργεί στο εργαστήριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC) του ΕΟΔ στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογίας Διαστήματος (ESTEC) στην Ολλανδία.

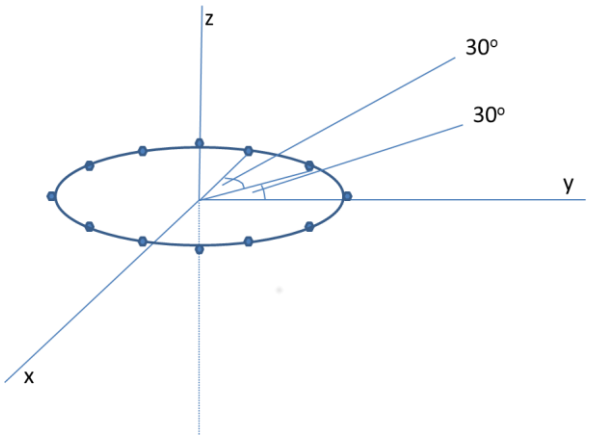
6. Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το προσωπικό του ΕΟΔ στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογίας Διαστήματος (ESTEC) για την πολύτιμη συνεισφορά τους κατά την διάρκεια της ανάπτυξης της διάταξης.

Παράρτημα 1: Σχηματισμοί Μαγνητομέτρων

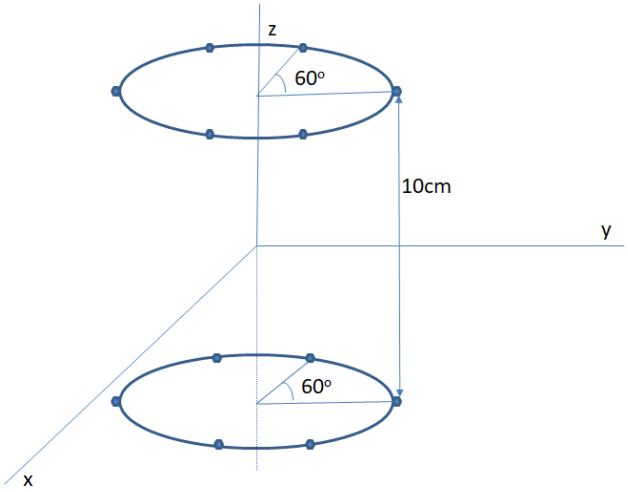
Α) Σχηματισμός 1: Όλα τα μαγνητόμετρα βρίσκονται στο επίπεδο ενός κύκλου ίδιου με το δοκιμίου (z=0) (Σχήμα 7).
Β) Σχηματισμός 2: Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται σε δυο επίπεδα κύκλων ίδιας ακτίνας απόσταση από το δοκίμιο σε διαφορετικά ύψη (π.χ z = 10 cm και z = -10 cm) αλλά και στις ίδιες γωνίες, 60^0 (Σχήμα 8).

Γ) Σχηματισμός 3: Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται στα επίπεδα τριών κύκλων ίδιας ακτίνας από το δοκίμιο, σε διαφορετικά ύψη ($= 10, 0, -10\ cm$) και σε ίδιες γωνίες (0^0, 90^0, 180^0, 270^0) (Σχήμα 9).



Σχήμα 7 Σχηματισμός αρ. 1

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

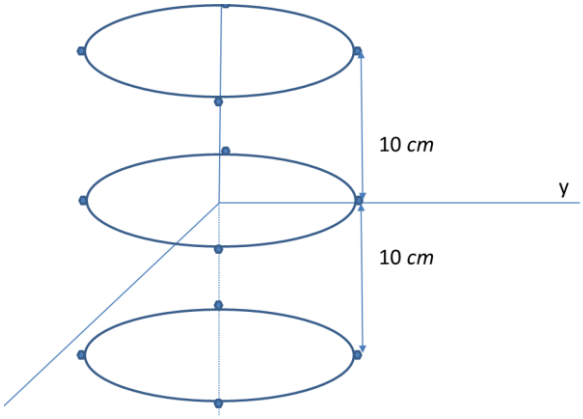


Σχήμα 8 Σχηματισμός αρ. 2

Δ) Σχηματισμός 4: Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται στα επίπεδα δυο κύκλων διαφορετικής ακτίνας σε διαφορετικά ύψη (π.χ *40 και 38 cm)* (Σχήμα 10).

Ε) Σχηματισμός 5: Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται στα επίπεδα δυο κύκλων ίδιας ακτίνας από το δοκίμιο, σε διαφορετικά ύψη ($= 10, -10$ *cm*) αλλά σε διαφορετικές γωνίες (π.χ όταν τα μαγνητόμετρα του «πάνω» επιπέδου είναι π.χ στις (0^0, 60^0, 120^0, ...) αυτά που βρίσκονται στο «κάτω» επίπεδο είναι στις (30^0, 90^0, 150^0...) (Σχήμα 11).

ΣΤ) Σχηματισμός 6: Τα μαγνητόμετρα βρίσκονται σε διαφορετικές γωνίες και σε διαφορετικά ύψη και σε πολλά επίπεδα σε ελικοειδή μορφή, (Σχήμα 12).

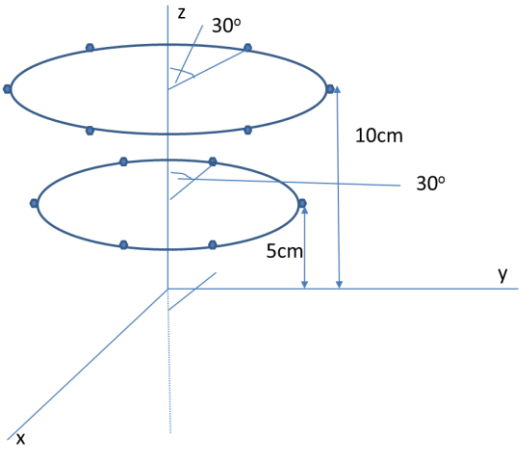


Σχήμα 9 Σχηματισμός αρ. 3

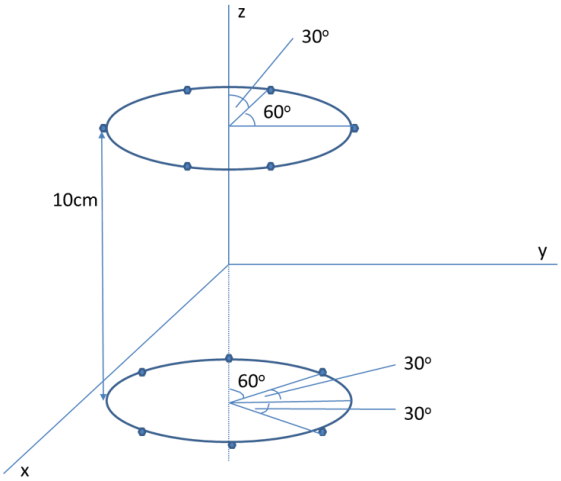
Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

Ανάπτυξη πρωτοτύπου διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων για μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής διαστημικού εξοπλισμού

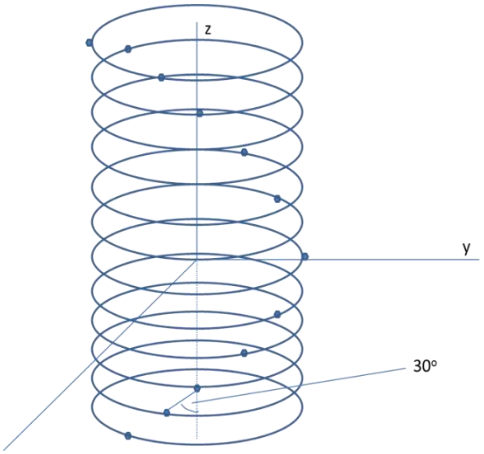
7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018



Σχήμα 10 Σχηματισμός αρ. 4



Σχήμα 11 Σχηματισμός αρ. 5



Σχήμα 12 Σχηματισμός αρ. 6

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

Ανάπτυξη πρωτοτύπου διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων για μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής διαστημικού εξοπλισμού

7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018

Παράρτημα 2: Χαρακτηριστικά της Μετρητικής Διάταξης

Τα χαρακτηριστικά των μαγνητομέτρων της διάταξης MMF παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά Μαγνητομέτρων της διάταξης MMF

Τύπος: Fluxgate	Ευαισθησία: 6 με ≤10 pTrms/√Hz στο 1Hz
Μοντέλο: Bartington Mag-03 MS(L)100	<6 pTrms/√Hz στο 1Hz
Περιοχή Λειτουργίας: 100 μT	

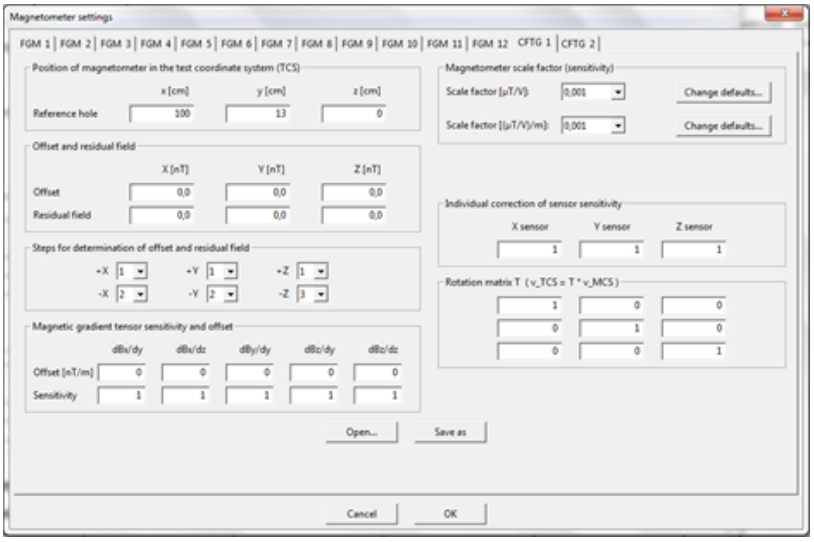
Τα χαρακτηριστικά συστήματος συλλογής μετρήσεων της διάταξης MMF παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά του συστήματος συλλογής μετρήσεων της διάταξης MMF

Αναλογικές Είσοδοι: 32	Περιοχές Τάσης εισόδου: (±0.1V, ±0.2V, ±0.5V ±1V, ±2V ±5V, ±10V
Διακριτική Ικανότητα: 18 bit	Ρυθμός Δειγματοληψίας: 625 kS/s

Παράρτημα 3: Λογισμικό RIBOSOME

Στο παρόν παράρτημα απεικονίζονται τρία κύρια παράθυρα λειτουργίας του λογισμικού της διάταξης στα οποία ο χειριστής μπορεί να παραμετροποιήσει τα μαγνητόμετρα (Σχήμα 13), το σύστημα συλλογής μετρήσεων (Σχήμα 14) καθώς και να εκτελέσει την διαδικασία μέτρησης (Σχήμα 15).

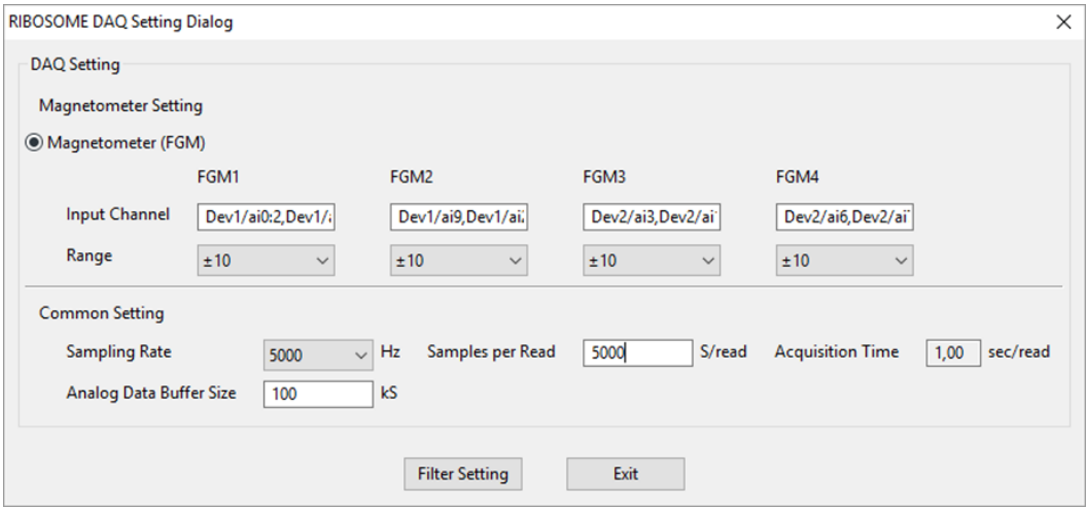


Σχήμα 13**:** Παράθυρο ρύθμισης μαγνητομέτρων

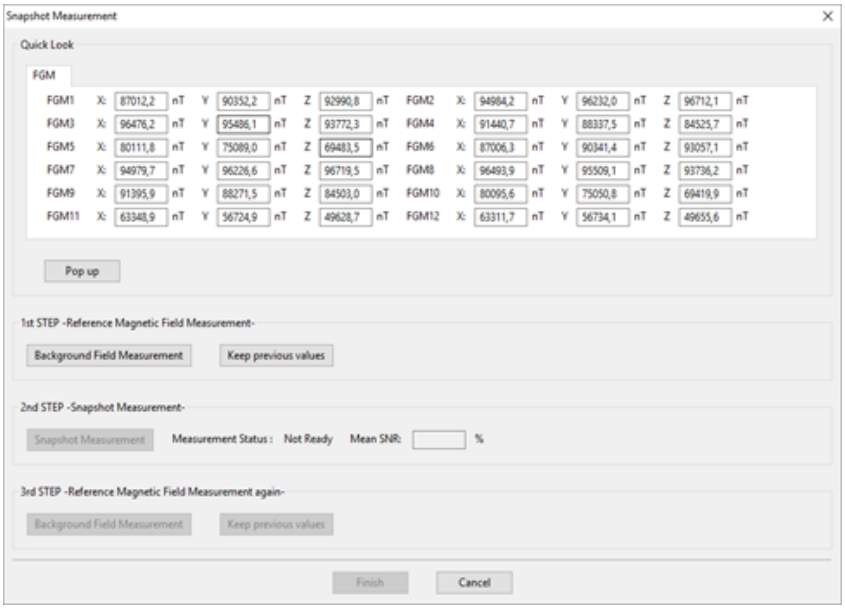
Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

Ανάπτυξη πρωτοτύπου διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων για μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής διαστημικού εξοπλισμού

7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018



Σχήμα 14: Παράθυρο ρύθμισης συστήματος συλλογής μετρήσεων



Σχήμα 15: Παράθυρο μέτρησης στιγμιοτύπου

Βιβλιογραφία – Αναφορές

[1] Friis-Christensen, E., Lühr, H. and Hulot, G., 2006. Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field. *Earth, planets and space*, *58*(4), pp.351-358.

[2] Mueller, D., Marsden, R.G., Cyr, O.S. and Gilbert, H.R., 2013. Solar orbiter. *Solar Physics*, *285*(1-2), pp.25-70.

[3] Balogh, A., Beek, T.J., Forsyth, R.J., Hedgecock, P.C., Marquedant, R.J., Smith, E.J., Southwood, D.J. and Tsurutani, B.T., 1992. The magnetic field investigation on the ULYSSES

Σ. Τσατάλας[1], N.A. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

Ανάπτυξη πρωτοτύπου διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων για μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής διαστημικού εξοπλισμού

7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018

mission-Instrumentation and preliminary scientific results. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, *92*, pp.221-236.
[4] Glassmeier, K.H., Boehnhardt, H., Koschny, D., Kührt, E. and Richter, I., 2007. The Rosetta mission: flying towards the origin of the solar system. *Space Science Reviews*, *128*(1-4), pp.1-21.
[5] Grasset, O., Dougherty, M.K., Coustenis, A., Bunce, E.J., Erd, C., Titov, D., Blanc, M., Coates, A., Drossart, P., Fletcher, L.N. and Hussmann, H., 2013. JUpiter ICy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system. *Planetary and Space Science*, *78*, pp.1-21.
[6] Anselmi, A. and Scoon, G.E., 2001. BepiColombo, ESA's Mercury cornerstone mission. *Planetary and Space Science*, *49*(14), pp.1409-1420.
[7] ECSS-E-HB-20-07A, "*Space engineering – Electromagnetic compatibility Handbook*", 5 September 2012.
[8] Mehlem, K., 1978. Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites. *IEEE Transactions on Magnetics*, *14*(5), pp.1064-1071.
[9] Nara, T., Suzuki, S. and Ando, S., 2006. A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients. *IEEE Transactions on Magnetics*, *42*(10), pp.3291-3293.
[10] Junge, A. and Marliani, F., 2011, August. Prediction of DC magnetic fields for magnetic cleanliness on spacecraft. In *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2011 IEEE International Symposium on* (pp. 834-839). IEEE.
[11] Endo, H., Takagi, T. and Saito, Y., 2005. A new current dipole model satisfying current continuity for inverse magnetic field source problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, *41*(5), pp.1748-1751.
[12] Weikert, S., Mehlem, K. and Wiegand, A., 2012, May. Spacecraft magnetic cleanliness prediction and control. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on* (pp. 1-5). IEEE.
[13] Mehlem, K., Wiegand, A. and Weickert, S., 2012, May. New developments in magnetostatic cleanliness modeling. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on* (pp. 1-6). IEEE.
[14] Dumond, O. and Berge, R., 2012, May. Determination of the magnetic moment with spherical measurements and spherical harmonics modelling. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on* (pp. 1-5). IEEE.
[15] Carrubba, E., Junge, A., Marliani, F. and Monorchio, A., 2012, May. Particle swarm optimization to solve multiple dipole modelling problems in space applications. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on* (pp. 1-6). IEEE.
[16] Kapsalis, N.C., Kakarakis, S.D.J. and Capsalis, C.N., 2012. Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, *34*, pp.111-122.
[17] Kakarakis, S.D.J., Kapsalis, N.C. and Capsalis, C.N., 2015. A semianalytical heuristic approach for prediction of eut's multiple dipole model by reducing the number of heuristics. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *57*(1), pp.87-92.
[18] Spantideas, S., Kapsalis, N.C., Kakarakis, S.D.J. and Capsalis, C.N., 2014. A method of predicting composite magnetic sources employing particle swarm optimization. *Progress In Electromagnetics Research M*, *39*, pp.161-170.

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2, 1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

[19] Boschetti, D., Gervasio, G. and Marziali, I., 2012, May. Montecarlo approach for magnetic cleanliness evaluation on spacecraft. In *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on* (pp. 1-3). IEEE.
[20] Junge, A., 2007. Ulysses Mobile Coil Facility Specification. *Technical Note ESA TEC-EEE/2007.184/AJ*, *1*(1), pp.2007-10.
[21] Jackson, J.D., 2007. *Classical electrodynamics*. John Wiley & Sons.
[22] BIPM, I., IFCC, I., IUPAC, I. and ISO, O., 2008. Evaluation of measurement data—guide for the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100: 2008. *Citado en las*, p.167.
[23] Statement of Work: "*Multi-Magnetometer Methods for Magnetic Dipole Modelling",* ESA ITT AO/1-7463/13/NL/GLC, Iss. 1, Rev. 0, 2013-02-18.
[24] Technical Note: "*Study of Multi-Magnetometer Test Setups*", AO7463_TN1_2015_03_11_01, EMTECH Consortium, Iss. 1, Rev. 0, 2015-03-11.
[25] Technical Note: "*RIBOSOME Software User's Manual (SUM), AO7463_RIBOSOME_SUM_M1_2016_09_30_001*", EMTECH Consortium, Iss. 1, Rev. 0, 2016-09-30.
[26] Technical Note: "*Facility Operational Manual for proto-MMF (Multi-Magnetometer Facility for Magnetic Dipole Modelling)*", AO7463_protoMMF_OM_2016_10_03_011, EMTECH Consortium, Iss. 1, Rev. 0, 2016-08-29.
[27] Technical Report: "*proto-MMF Verification Test Report*", AO7463_TR_Validation_2017_04_06_v1, EMTECH Consortium, Iss. 1, Rev. 0, 2017-04-06.

Σ. Τσατάλας[1], Ν.Α. Λιβανός[1], Δ. Βέργος[1] , Σ. Θ. Σπαντιδέας[2], Χ. Ν. Καψάλης[2], Σ-Δ. Ι. Κακαράκης[2], Ν. Χ. Καψάλης[2], Χ. Δ. Νικολόπουλος[2], [1] EMTECH SPACE P.C (CY) Ltd., Μπότσαρη 4, 2122, Λευκωσία, Κύπρος, [2] Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, Ελλάδα

Ανάπτυξη πρωτοτύπου διάταξης πολλαπλών μαγνητομέτρων για μέτρηση της μαγνητικής υπογραφής διαστημικού εξοπλισμού

7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018