

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Μελέτη ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης και ανάπτυξη λογισμικού για το χαρακτηρισμό της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης διάφορων υλικών

Διπλωματική εργασία

Νικολάου Στ. Ψαρουδάκη

Επιβλέπων καθηγητής

Στρατάκης Ι. Δημήτριος

Αναπληρωτής καθηγητής

Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου

Ηράκλειο, 2025

Ευχαριστίες

Ανακαλώντας την διαδικασία εκπόνησης της παρούσας εργασίας, ευχαριστώ την μητέρα μου, Μάρθα, τον πατέρα μου, Σταύρο, και την αδελφή μου, Ελένη, για την υπομονή, την υποστήριξη και την κατανόησή τους και τον καθηγητή Στρατάκη Ι. Δημήτριο, επειδή εμπιστεύτηκε τις δυνατότητές μου, με καθοδήγησε και με παρότρυνε να επιμείνω στην επίτευξη του στόχου μου. Επίσης, ευχαριστώ τους υπόλοιπους εκπαιδευτές μου στο Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο για την αφοσίωσή τους κατά τη φοίτησή μου στο ίδρυμα.

Κατοχύρωση πνευματικών δικαιωμάτων

Copyright © 2025

Νικόλαος Στ. Ψαρουδάκης

Ελληνικό Μεσογειακό πανεπιστήμιο

All rights reserved

Τα περιεχόμενα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελούν πνευματική ιδιοκτησία του συγγραφέα και διέπονται από τις Εθνικές και Διεθνείς διατάξεις περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, με εξαίρεση τα ρητώς αναγνωρισμένα δικαιώματα τρίτων. Συνεπώς, απαγορεύεται ρητά η αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, μετάφραση, τροποποίηση, με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά, χωρίς τη ρητή ή γραπτή συναίνεση του συγγραφέα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπούς την μελέτη και την αξιολόγηση ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης. Για την κατανόηση του αντικειμένου, εξηγούνται οι έννοιες και γίνεται ανασκόπηση των πληροφοριών της κατανομής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, των υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών στην Ελλάδα, της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, του κινδύνου υγείας από έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, των πρότυπων ορίων έκθεσης στην Ελλάδα, της μέτρησης της έκθεσης με εργαστηριακά όργανα, της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και θωράκισης. Ύστερα, γίνεται παρουσίαση μεθόδων αξιολόγησης της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης διαφόρων υλικών με χρήση αναλυτή φάσματος, με χρήση αναλυτή δικτυωμάτων και με χρήση αναλυτή φάσματος σε συνδυασμό με γεννήτρια διανυσματικού σήματος. Για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό ανοικτού κώδικα σε γλώσσα Python που χρησιμοποιήθηκε σε ειδικά σχεδιασμένα πειράματα, για την επικοινωνία των οργάνων μέτρησης με υπολογιστή και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών μετρήσεων, την συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων και την εξαγωγή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

The present thesis has the purposes of studying and measuring electromagnetic shielding. For comprehension of the subject, the concepts are explained and information is reviewed of the distribution of the electromagnetic spectrum, the telecommunication services in Greece, the electromagnetic interference, the health hazard of exposure to electromagnetic radiation, the standard limits of exposure in Greece, the measurement of exposure with laboratory instruments, the electromagnetic compatibility and shielding. Then, methods of evaluating the electromagnetic shielding of different materials with the use of the spectrum analyzer, with the use of the network analyzer and with the use of the spectrum analyzer in combination with the vector signal generator are presented. To complete the thesis, an open-source software was developed in the Python language, which was used in specially designed experiments for the communication of the measuring instruments with a computer and the automation of the measurement procedures, the collection, storing and processing of the data and the extraction of the corresponding results.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 13

2. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ 17

2.1. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα 17

2.2. Κατανομή ραδιοφάσματος 19

3. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ 23

3.1. Εισαγωγή 23

3.2. Παρεμβολή στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες 24

4. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΥΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 27

4.1. Εισαγωγή 27

4.2. Έκθεση σε ακτινοβολία τηλεπικοινωνιών 28

4.3. Έκθεση σε πεδία χαμηλών συχνοτήτων 30

4.4. Όρια έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία 30

5. ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ 33

5.1. Εισαγωγή 33

5.2. Περιγραφή των επιλεγμένων οργάνων μέτρησης 34

5.3. Μέθοδος μέτρησης επιλεγμένων μεγεθών 37

6. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ 41

6.1. Εισαγωγή 41

6.2. Νομοθεσίες 42

6.3. Μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας 42

7. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗ 45

7.1. Εισαγωγή 45

7.2. Εφαρμογές 46

8. ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ 47

8.1. Εξασθένηση μετάδοσης 47

8.2. Παράμετροι σκέδασης 48

8.3. Εξασθενήσεις ανάκλασης και απορρόφησης 50

8.4. Πειραματική μέθοδος απομόνωσης ασπίδας 51

8.5. Μέτρηση συνεισφοράς ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης 55
9. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 59
9.1. Εισαγωγή 59
9.2. Οδηγίες χρήσεις 61
9.2.1. Γραφικό περιβάλλον 61
9.2.2. Σύνδεση οργάνων 63
9.2.3. Χειρισμός γεννήτριας 64
9.2.4. Χειρισμός αναλυτή φάσματος 64
9.2.5. Λειτουργία συνδυαστικού ελέγχου γεννήτριας-αναλυτή φάσματος 66
9.2.6. Χειρισμός αναλυτή δικτυωμάτων 67
9.2.7. Λειτουργία σύγκρισης μετρήσεων 69
9.2.8. Λειτουργία κλιμάκωσης μέτρησης 71
10. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ 73
10.1. Πείραμα πρώτο 74
10.1.1. Διάταξη πειράματος 74
10.1.2. Εκτέλεση μετρήσεων 76
10.1.3. Επεξεργασία δεδομένων 78
10.1.4. Αποτελέσματα πειράματος 80
10.2. Πείραμα δεύτερο 81
10.2.1. Διάταξη πειράματος 81
10.2.2. Εκτέλεση μετρήσεων 83
10.2.3. Επεξεργασία δεδομένων 84
10.2.4. Αποτελέσματα πειράματος 85
10.3. Πείραμα τρίτο 86
10.3.1. Διάταξη πειράματος 86
10.3.2. Εκτέλεση μετρήσεων 89
10.3.3. Επεξεργασία δεδομένων 89
10.3.4. Αποτελέσματα πειράματος 93
10.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων 94
10.5. Συμπεράσματα πειραμάτων 96
10.5.1. Γενικά 97
10.5.2. Σύγκριση μεθόδων 98
11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 99
12. ΑΝΑΦΟΡΕΣ 101

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 107

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΝΤΟΛΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ 107

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΤΜΗΜΑΤΑ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 109

Σύνδεση εργαστηριακού οργάνου 109

Απλή ανίχνευση αναλυτή φάσματος 110

Απλή παραγωγή και διακοπή παραγωγής γεννήτριας 111

Συνδυαστική μέτρησης γεννήτριας και αναλυτή φάσματος 112

Ανίχνευση παραμέτρου σκέδασης 114

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1: Κατειλημμένες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων από τρεις υπηρεσίες στην Ελλάδα 21

Πίνακας 4.1: Πίνακας Ελληνικών επιπέδων αναφοράς εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κοντά σε ευαίσθητα ιδρύματα 31

Πίνακας 10.1: Πειραματικά εργαλεία 73

Πίνακας 12.1: Εντολές SCPI ρυθμίσεων γεννήτριας διανυσματικού σήματος 107

Πίνακας 12.2: Εντολές SCPI ρυθμίσεων αναλυτή φάσματος 107

Πίνακας 12.3: Εντολές SCPI ρυθμίσεων αναλυτή δικτυωμάτων 108

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1: Σχηματική μορφή αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος 14

Σχήμα 2.1: Τμήματα ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βάσει συχνότητας και μήκους κύματος. 18

Σχήμα 5.1: Απεικόνιση ανάλυσης σήματος χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων με προβολή 35

Σχήμα 8.1: Διανυσματική κατανομή της ισχύος προσπίπτοντος κύματος σε ΗΜ ασπίδα 48

Σχήμα 8.2: Απώλειες και κέρδη ισχύος διάδοσης στο πειραματικό σύστημα μετρήσεων B με χρήση ορισμένου διανυσματικού μεγέθους 52

Σχήμα 8.3: Απώλειες και κέρδη ισχύος διάδοσης στο πειραματικό σύστημα μετρήσεων A με χρήση ορισμένου διανυσματικού μεγέθους 53

Σχήμα 8.4: Δισδιάστατη απεικόνιση περιβάλλοντος ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένου θαλάμου 55

Σχήμα 10.1: Σχηματική διάταξη πρώτου πειράματος 75

Σχήμα 10.2: Γραφική παράσταση αποτελέσματος εξασθένησης μετάδοσης ασπίδας s πρώτου πειράματος 80

Σχήμα 10.3: Αναπαράσταση διάταξης δεύτερου πειράματος 82

Σχήμα 10.4: Γραφική παράσταση αποτελέσματος εξασθένησης μετάδοσης ασπίδας s δεύτερου πειράματος 86

Σχήμα 10.5: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης τρίτου πειράματος 87

Σχήμα 10.6: Γραφική παράσταση ισχύος έκθεσης σε τυπική αστική ραδιοακτινοβολία για τέσσερα λεπτά 93

Σχήμα 10.7: Γραφική παράσταση αποτελέσματος εξασθένησης μετάδοσης ασπίδας s τρίτου πειράματος 94

Σχήμα 10.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων πρώτου και δεύτερου περιράματος 95

Σχήμα 10.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων πρώτου, δεύτερου και τρίτου πειράματος. 95

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 9.1: Ηλεκτρονικό γραφικό περιβάλλον χρήστη λογισμικού και διεπαφή χειρισμού γεννήτριας.. 62

Εικόνα 9.2: Ηλεκτρονικό γραφικό περιβάλλον χειρισμού αναλυτή φάσματος 65

Εικόνα 9.3: Ηλεκτρονικό γραφικό περιβάλλον χειρισμού αναλυτή δικτυωμάτων 68

Εικόνα 9.4: Γραφικό παράθυρο λειτουργίας σύγκρισης μετρήσεων 70

Εικόνα 9.5: Γραφικό παράθυρο λειτουργίας κλιμάκωσης μέτρησης 71

Εικόνα 10.1: Διάταξη πρώτου σταδίου πρώτου πειράματος 75

Εικόνα 10.2: Διάταξη δεύτερου σταδίου δεύτερου πειράματος 76

Εικόνα 10.3: Φωτογραφίες από οθόνες γεννήτριας και αναλυτή στα δύο στάδια του πρώτου πειράματος 77

Εικόνα 10.4: Στιγμιότυπο λογισμικού μετά από δεύτερο στάδιο πρώτου πειράματος 79

Εικόνα 10.5: Στιγμιότυπο λογισμικού μετά από τέλος πρώτου πειράματος 79

Εικόνα 10.6: Διάταξη πρώτου σταδίου δεύτερου πειράματος 82

Εικόνα 10.7: Διάταξη δεύτερου σταδίου δεύτερου πειράματος 83

Εικόνα 10.8: Στιγμιότυπο παραθύρου του λογισμικού κατά την ολοκλήρωση του δεύτερου πειράματος 85

Εικόνα 10.9: Διάταξη λήψης πρώτου σταδίου τρίτου πειράματος 88

Εικόνα 10.10: Διάταξη λήψης δεύτερου σταδίου τρίτου πειράματος 88

Εικόνα 10.11: Στιγμιότυπο παραθύρου λογισμικού μετά από πρώτο στάδιο τρίτου πειράματος 90

Εικόνα 10.12: Οθόνη αναλυτή και διάταξη στα δύο στάδια του τρίτου πειράματος 91

Εικόνα 10.13: Στιγμιότυπο παραθύρου του λογισμικού μετά το τέλος του τρίτου πειράματος 92

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την σημερινή εποχή, είναι κοινή παραδοχή ότι, κατά μέσο όρο, η δευτερογενής ανάγκη του ανθρώπου η οποία έχει δεχτεί την μεγαλύτερη πλήρωση είναι οι τηλεπικοινωνίες. Ωστόσο, οι υπολογιστές είναι η τεχνολογία που έχει υποστεί τη γρηγορότερο πρόοδο. Οι υπολογιστές αυτοματοποιούν και απλοποιούν όλες τις εργασίες, όπως την αποθήκευση όλων των γνώσεων και των γεγονότων και τον έλεγχο όλων των μηχανών, αναβαθμίζουν την ιατρική μέθοδο, προληπτική και κατασταλτική, και μεγεθύνουν την προσδοκώμενη διάρκεια ζωής. Χρησιμοποιούνται στην έρευνα για την ανακάλυψη νέων μηχανών με μέγιστη απόδοση, αυξάνουν την παραγωγή, την προσφορά, τη ζήτηση, οπότε προωθούν δραστικά το εμπόριο και όλες τις βιομηχανίες και τις υπηρεσίες, όπως τις μεταφορές. Ωστόσο, οι υπολογιστές δεν αποτελούν ανάγκη, αλλά το εργαλείο για τα παραπάνω επιτεύγματα. Οι μεταφορές είναι η δεύτερη δευτερογενής ανάγκη που έχει δεχτεί την μεγαλύτερη πλήρωση. Οι μεταφορές εξαρτώνται από τις τηλεπικοινωνίες. Η τεχνητή νοημοσύνη, που μόλις πρόσφατα, μετά από νέες ανακαλύψεις στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τον συνδυασμό τους με τα συστήματα γνώσης, έγινε πρακτική, είναι ένα νέο εργαλείο, μα όχι συγκρίσιμης σημασίας με τον υπολογιστή.

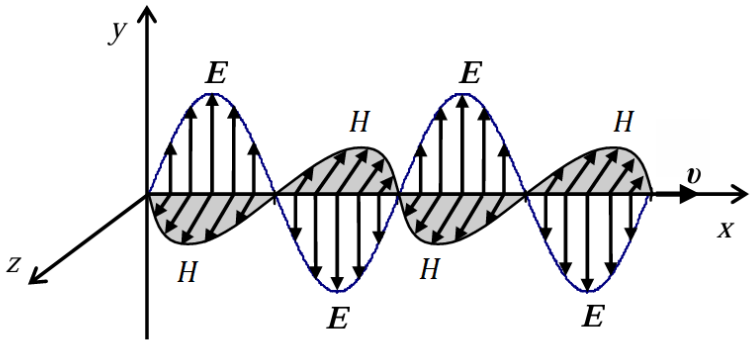
Οι τηλεπικοινωνίες είναι πλέον ψηφιακές, δηλαδή ανταλλάσσονται μεταξύ ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με ψηφιακά σήματα και συντονίζονται από υπολογιστές. Για παράδειγμα, το διαδίκτυο εξαρτάται από αυτές. Η σημασία τους είναι ότι κάνουν απλούστατη τη διεθνή συναναστροφή με εμπορικούς, ακαδημαϊκούς, διπλωματικούς, κοινωνικούς και διάφορους άλλους σκοπούς, ότι μπορούν να προσφέρουν εύκολη πληροφόρηση και ψυχαγωγία, ότι διευκολύνουν άνευ προηγουμένου την επίτευξη οργανωμένων δρομολογίων μεταξύ μακρινών περιοχών και μεταξύ των χωρών του κόσμου με απόλυτο παράδειγμα το εμπόριο και επόμενα τον τουρισμό και τη μετανάστευση, ότι επιτρέπουν την συνεργασία μεταξύ ανθρώπου και μηχανών και μηχανών μεταξύ τους εξ αποστάσεως, ότι βοηθούν την έρευνα παρατήρησης του διαστήματος και ελέγχου του μικρόκοσμου, ότι δίνουν νέες δυνατότητες στην αυτοματοποίηση με τη χρήση αισθητήρων και άλλα.

Οι τηλεπικοινωνίες υπήρξαν με πολλές μορφές από την αρχαιότητα και δέχτηκαν αλματώδη ανάπτυξη μετά την εφεύρεση του τηλέγραφου από τον Σάμιουελ Μορς, στις αρχές του 19ου αιώνα. Επόμενα ιστορικά σημεία αναφοράς τους ήταν η θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας από τον James Maxwell, η οποία βασίστηκε εν μέρει στις ιδέες του Michael Faraday, και η πειραματική απόδειξη της θεωρίας από τον Heinrich Hertz στα τέλη του 19ου αιώνα. Η πρώτη επίσημη ασύρματη τηλεπικοινωνία με την σύγχρονη μορφή τους, πραγματοποιήθηκε πειραματικά το 1902, διασχίζοντας τον Ατλαντικό Ωκεανό, από τον Guglielmo Marconi [1], [2]. Από τότε, αφού δοκιμάστηκαν εκτεταμένα στον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες δεν αντικατέστησαν εντελώς τις ενσύρματες, αλλά απέκτησαν αμέτρητες νέες εφαρμογές. Ωστόσο, η πρώτη αρχή λειτουργίας τους παρέμεινε η ίδια από το 1902: η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι φυσικό φαινόμενο που, όταν παραχθεί τεχνητά, μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες, διαμέσου του αέρα, του κενού και άλλων, και να αντικαταστήσει το καλώδιο. Για να χρησιμοποιηθεί, είναι απαραίτητη η κατανόηση κάποιων χαρακτηριστικών της. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παράγεται από τη φύση και από τον άνθρωπο με πολλούς τρόπους, αλλά η συμβατική μέθοδος για την τηλεπικοινωνία βασίζεται στην ταλάντωση ηλεκτρικών φορτίων

δημιουργώντας εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και πεδίο προς επαγωγή εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου και την καθοδήγηση της διαταραχής στον χώρο μέσω ειδικών ασυνεχών αγώγιμων διατάξεων, τις κεραίες. Θεωρείται ότι η μεταφορά του ενός πεδίου παράγει το άλλο και συνεχίζουν να μεταφέρονται στις διευθύνσεις όπου κατευθύνονται. Οι διαταραχές των πεδίων, διαδιδόμενες στο χώρο, ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά, όπως τα υπόλοιπα κύματα, μεταφέρουν ενέργεια.

Το απλό ηλεκτρικό κύμα είναι μια έννοια που εκφράζει την περιοδική με περίοδο T αρμονική ταλάντωση της έντασης $\vec{\mathrm{E}}$ από το ηλεκτρικό πεδίο στα σημεία κατά μήκος μιας διεύθυνσης, έστω άξονας x, του χώρου. Η ταλάντωση της έντασης θεωρείται ότι γίνεται σε ένα σημείο της διεύθυνσης κάθετα σε αυτήν και διαταράσσει διαδοχικά την ένταση στα γειτονικά του, κατά τη μια της φορά, όπου προηγουμένως θεωρείται $\vec{0}$, διαδίδοντας την ταλάντωση σε αυτά. Κάθετα στην διεύθυνση της ταλάντωσης της $\vec{\mathrm{E}}$ και στη διεύθυνση του κύματος, μεταφέρεται ταυτόχρονα συμφασική ταλάντωση της έντασης $\vec{\mathrm{H}}$ του μαγνητικού πεδίου στα ίδια σημεία και ονομάζεται μαγνητικό κύμα. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα θεωρείται πως προσπίπτει σε ένα σημείο της διεύθυνσης, τη στιγμή που οι ταλαντώσεις διαδίδονται εκεί. Το κύμα προσπερνά το ίδιο σημείο, τη στιγμή που η διαταραχή, που του προκάλεσαν οι ταλαντώσεις, παρέλθει. Πλάτη του ηλεκτρομαγνητικού κύματος λέγονται συνήθως τα μέγιστα $\left|\overrightarrow{\mathrm{E}_0}\right|$ και $\left|\overrightarrow{\mathrm{H}_0}\right|$ των ταλαντώσεων, τα οποία σχετίζονται μαθηματικά. Διαφορετικά, πλάτη λέγονται και οι εντάσεις σε μια τυχαία χρονική στιγμή. Το μήκος κύματος, λ, είναι η απόσταση που η διαταραχή διανύει σε μία περίοδο T της ταλάντωσης. Το σχήμα 1.1, από την βιβλιογραφία [3], απεικονίζει τη συμβολική μορφή του απλού ηλεκτρομαγνητικού κύματος ως εγκάρσιο κύμα των διανυσμάτων των δύο εντάσεων.



Σχήμα 1.1: Σχηματική μορφή αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Παρόλο που παρουσιάζουν κοινά, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δεν είναι μηχανικό κύμα και, αντιθέτως με το μηχανικό κύμα, δεν διαδίδεται ταλαντώνοντας ένα υλικό μέσο. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δεν έχει εξάρτηση από το μέσο και διαδίδεται ακόμα και με την απουσία του, δηλαδή στο κενό. Η ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων συνδέεται με την ύπαρξη κινούμενων υλικών σωματιδίων που

ονομάζονται φωτόνια. Το φαινόμενο της εμφάνισης των αλληλοεξαρτώμενων φαινομένων που προκαλούν οι δύο φύσεις, ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το σημαντικότερο παράδειγμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στη φύση είναι το φως. Πρακτικά, είναι ισοδύναμο να θεωρηθεί ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή από φωτόνια, ανάλογα με την περίπτωση.

Όλη η ακτινοβολία διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα, που έχει σταθερή τιμή στο ίδιο μέσο, η οποία στο κενό είναι γνωστή και ονομάζεται ταχύτητα του φωτός c και διαφέρει ελαφρώς στην ατμόσφαιρα. Η ταχύτητα u διάδοσης ενός κύματος ισούται με την απόσταση Δx που διανύει το κύμα, δια το χρόνο Δt στον οποίο τη διανύει, η οποία είναι ίση με το μήκος κύματος, λ, σε χρόνο T μιας περιόδου. Αλλιώς, η ταχύτητα u είναι η απόσταση λ πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των φορών f, που επαναλαμβάνεται μία περίοδος και οπότε διανύεται η απόσταση λ, σε μία χρονική μονάδα, δια τη μονάδα. Το πλήθος των επαναλήψεων σε μια χρονική μονάδα είναι η συχνότητα f του κύματος. Επίσης, στο κενό, η ταχύτητα u ισούται με c και, έτσι, προκύπτει η θεμελιώδης εξίσωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, (1.1).

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda \cdot f}{1} = \lambda \cdot f = c \qquad (1.1)$$

Σύμφωνα με το θεώρημα της αμοιβαιότητας, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα θα δημιουργήσει ανάλογες διαταραχές, αν προσπέσει σε αγώγιμη διάταξη, όμοια με αυτήν που το εξέπεμψε. Η μεταφορά, σε ένα κύκλωμα, της διαταραχής ενός προσπίπτοντος κύματος, σε κατάλληλη διάταξη, δημιουργεί εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

Σήμα μίας διάστασης θεωρείται το φυσικό μέγεθος που εξαρτάται από ένα άλλο φυσικό μέγεθος. Αλλιώς, η εξαρτημένη μεταβλητή μιας συνάρτησης δύο φυσικών μεγεθών. Ένα παράδειγμα μονοδιάστατου σήματος μίας ανεξάρτητης μεταβλητής είναι η διαφορά δυναμικού, από σταθερή αναφορά, σε ένα σημείο ενός αγωγού όπου μεταφέρεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, ως προς το χρόνο. Αυτό το σήμα θα εκφραζόταν επαρκώς ως η αλληλουχία τιμών της τάσης στο σημείο, αντιστοιχισμένες με τις αύξουσες χρονικές στιγμές τους σε μια γραφική παράσταση. Αν το σήμα αυτό, προέρχεται από ηλεκτρομαγνητικό κύμα, τότε έχει τα χαρακτηριστικά του κύματος και περιγράφει τη διαδικασία παραγωγής του. Οι τηλεπικοινωνίες διαμορφώνουν τα κύματα που παράγουν, τα οποία ονομάζονται φέροντα, πριν τη εκπομπή, με τρόπους, ώστε να τους ενσωματώνουν το σήμα με το μοτίβο της πληροφορίας που ζητείται να αποσταλεί. Η λήψη του σήματος, από έναν δέκτη, γίνεται χάρη στο θεώρημα της αμοιβαιότητας και την αντίστροφη διαδικασία της διαμόρφωσης.

Επειδή οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες είναι τόσο ανεπτυγμένες, είναι η συνηθέστερη εφαρμογή του ανθρώπου, η οποία χρησιμοποιεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μετά τον τεχνητό φωτισμό. Παρ' όλα αυτά, η χρήση του ελεύθερου χώρου για την ανταλλαγή πληροφοριών είναι δύσκολη στην πράξη, αφού το ίδιο μέσο πρέπει να εξυπηρετεί όλες τις διαφορετικές επικοινωνίες. Επίσης, συχνά

παραβλέπεται ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως αυτή των τηλεπικοινωνιών, μεταφέρει ενέργεια μαζί της και η ενέργεια παράγει έργο ή ζημιά στην ύλη με την οποία αλληλεπιδρά.

Στην παρούσα εργασία, θα αναλυθούν το πως οργανώνεται η χρήση της ακτινοβολίας για όλες τις εφαρμογές της, τα προβλήματα που προκύπτουν από την ακούσια παραγωγή της από όλες τις ηλεκτρογενείς τεχνολογίες και από τη φύση, σε συνδυασμό με τις τηλεπικοινωνιακές εκπομπές, σε σύγχρονες κοινωνίες και οι κίνδυνοι που ενέχει για τον άνθρωπο η έκθεση του σε αυτήν. Έπειτα, θα εξηγηθεί η μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και θα παρουσιαστεί μία γενική μεθοδολογία μέτρησης και αξιολόγησής της από συγκεκριμένα όργανα και εργαλεία που παρείχε το Εργαστήριο Μη Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΜΙΑ) του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Τέλος, θα αναφερθούν οι καθιερωμένες λύσεις στα παραπάνω προβλήματα και η σημασία της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης ανάμεσά τους.

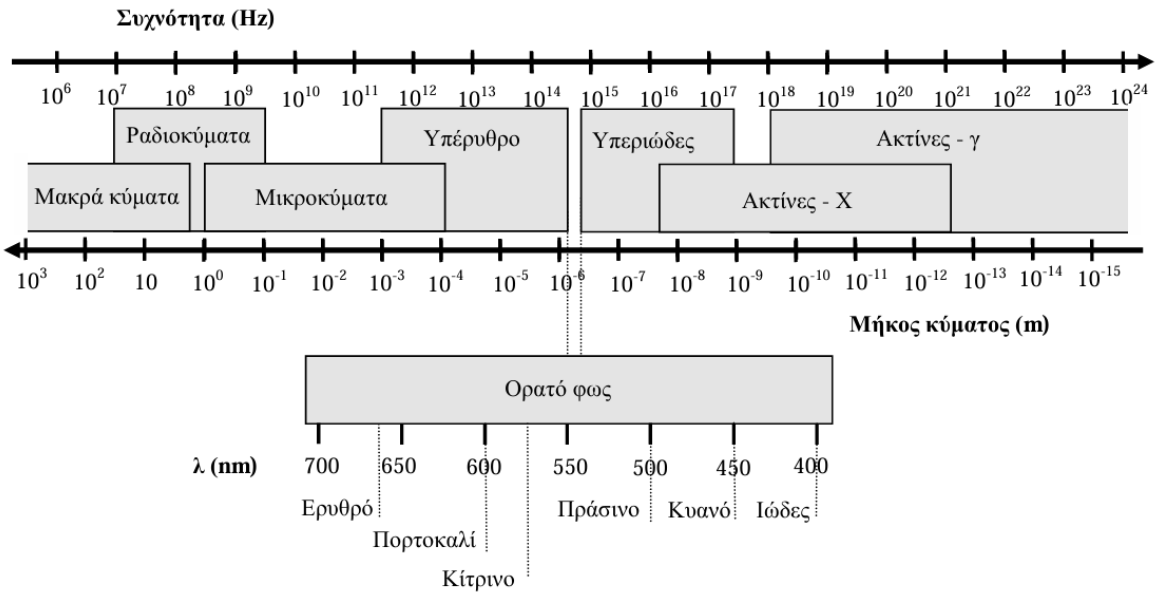
Σκοπός της εργασίας είναι να καταγράψει με επιστημονική εγκυρότητα τρείς μεθόδους χαρακτηρισμού και αξιολόγησης υλικών για ηλεκτρομαγνητική θωράκιση από ακτινοβολία τηλεπικοινωνιών με τρία διαφορετικά όργανα μέτρησης υψηλών προδιαγραφών. Επίσης, να παρουσιάσει το λογισμικό αυτοματισμού των μεθόδων που αναπτύχθηκε και τους λόγους για τους οποίους κρίνεται απαραίτητος ο αυτοματισμός. Τέλος, να παρουσιάσει τα τρία πειράματα που διεξάχθηκαν ώστε να επιδειχθούν οι τρείς μέθοδοι και να συγκριθούν, αλλά και συμπληρωματικά, σε μία εκ των περιπτώσεων, να γίνει μια επισκόπηση της συμβολής της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης στην αντιμετώπιση της έκθεσης τηλεπικοινωνιών σε κατοικημένη περιοχή.

2. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Υπάρχουν διάφορες πηγές ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) ακτινοβολίας στο περιβάλλον. Κάποιες από αυτές είναι φυσικές και άλλες ανθρωπογενείς. Η κυριότερη φυσική πηγή ΗΜ ακτινοβολίας είναι ο ήλιος και σημείο αναφοράς των ειδών ΗΜ ακτινοβολίας είναι το φως. Τα ανθρωπογενή ΗΜ κύματα χωρίζονται σε εκούσια και ακούσια. Παραδείγματα των ακούσιων είναι τα αρμονικά κύματα που παράγονται αναπόφευκτα γύρω από ενεργές ηλεκτρικές μηχανές, ή οπουδήποτε κυκλοφορεί ηλεκτρικό ρεύμα, όπως στις ηλεκτρικές συσκευές ή στους αγωγούς μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, από ανεπιθύμητες φωτεινές πηγές και από πυρηνικές διεργασίες. Τα εκούσια κύματα είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται για τις πολυάριθμες ασύρματες ανθρώπινες εφαρμογές όπως το σύνολο των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών, ο τηλεχειρισμός, ο ραδιοεντοπισμός, η νυχτερινή όραση, η ακτινογράφηση κ.α. . Όλα τα παραπάνω είδη ΗΜ κυμάτων εκπέμπονται και διαδίδονται μαζί στον χώρο.

2.1. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που προκαλούν την περιοδική μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, παρουσιάζουν πολλές διαφορές αλλά χαρακτηρίζονται από τον διαφορετικό ρυθμό και συνεπώς τη διαφορετική περίοδο, προσδίδοντας αντίστοιχες συχνότητες στην παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Πρακτικά, κάθε γνωστό φαινόμενο εκπέμπει ακτινοβολία γνωστού εύρους συχνότητας. Επίσης, σε πολλά από τα ΗΜ φαινόμενα τα οποία είναι εκμεταλλεύσιμα από τον άνθρωπο, το χαρακτηριστικό μήκος κύματος που εξαρτάται από τη χαρακτηριστική συχνότητα, βάσει της αλληλεπίδρασής του κύματος με την ύλη, καθορίζει τις ικανές εφαρμογές του φαινομένου. Έτσι, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από τη συχνότητά της και ομαδοποιείται σε διαστήματα τιμών συχνοτήτων που ονομάζονται τμήματα του φάσματος.



Σχήμα 2.1: Τμήματα ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βάσει συχνότητας και μήκους κύματος.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, η συχνότητα έχει επιπλέον τις εξής ιδιότητες: καθορίζει το αν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ορατή ή όχι καθώς και το κατά πόσο είναι επιβλαβής για τους οργανισμούς. Το σχήμα 2.1, που προέρχεται από την πηγή [4], διακρίνει τα βασικά τμήματα του φάσματος από τις τιμές της συχνότητας σε Hz και τις αντίστοιχες τιμές μήκους κύματος στο κενό σε υποδιαιρέσεις του m, βάσει της σχέσης $c = \lambda f$. Το φώς καταλαμβάνει ένα στενό συγκεκριμένο φάσμα, περίπου από 789 THz έως 400 THz, το οποίο ονομάζεται ορατό και είναι το σημείο αναφοράς. Το ορατό φάσμα χωρίζεται από τα χρώματα τα οποία αποτυπώνει στον οφθαλμό. Όλα τα υπόλοιπα τμήματα του φάσματος αλληλεπικαλύπτονται, όπως και οι εφαρμογές τους, χωρίς σαφή όρια. Η ακτινοβολία με συχνότητα από μηδέν έως ένα σημείο του υπεριώδους φάσματος λέγεται μη ιοντίζουσα. Οι ακτίνες X και γ και κάθε μεγαλύτερης συχνότητας αποτελούν την ιοντίζουσα ακτινοβολία ή αλλιώς ραδιενέργεια. Όπως το όνομά της δηλώνει, βάσει της σωματιδιακής θεωρίας της φύσης της, η ενέργεια της ανά φωτόνιο είναι αρκετή για να αλληλεπιδρά με την ύλη σε ατομικό επίπεδο ώστε να προκαλεί ιδιαίτερα δυσμενείς συνέπειες στους βιολογικούς ιστούς.

Το τμήμα των μακρών κυμάτων ξεκινάει θεωρητικά από τη μηδενική συχνότητα. Παράδειγμα φαινομένου εκπομπής μακρών κυμάτων ή χαμηλών συχνοτήτων είναι η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος σε αγωγούς και παράδειγμα τέτοιας πηγής είναι τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το τμήμα των ραδιοκυμάτων περιέχει για παράδειγμα τις παραδοσιακές ζώνες στις οποίες εκπέμπει το ραδιόφωνο με διαμόρφωση συνεχούς φέροντος και εκείνες της τηλεόρασης. Κύματα αυτού του εύρους παράγονται τυπικά από ηλεκτρικά κυκλώματα ταλαντώσεων με πηνία και πυκνωτές και ηλεκτρονικά. Τα μικροκύματα παράγονται από αντίστοιχα συνθετότερα κυκλώματα και χρησιμοποιούνται για παράδειγμα από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τις συσκευές ραδιοεντοπισμού, ραντάρ, και ηλεκτρικές συσκευές όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων.

Η ακτινοβολία του υπέρυθρου φάσματος ονομάζεται επίσης θερμική ακτινοβολία επειδή εκπέμπεται από όλα τα θερμά σώματα και είναι το πιο συχνό μέσο μεταφοράς θερμότητας στο χώρο. Τα τμήματα της ιονίζουσας ακτινοβολίας παράγονται από διαχωρισμούς των πιο ισχυρών δεσμών στο μικρόκοσμο της ύλης και χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ενέργειας και υψηλή διεισδυτικότητα. Είναι βλαβερές για τους οργανισμούς αλλά έχουν εφαρμογές στην ιατρική, όπως η ακτινογράφηση και η καταστροφή καρκινικών κυττάρων [4].

Το διάστημα μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας που απονεμήθηκε στο τμήμα των μακρών κυμάτων, από περίπου 3kHz, των ραδιοκυμάτων και των μικροκυμάτων έως το σημείο που ξεκινά το υπέρυθρο τμήμα, χρησιμοποιούνται για τις σύγχρονες ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Κάποιες φορές, ολόκληρο το διάστημα αυτό αποκαλείται ραδιοφάσμα (Radio spectrum) και τα περιεχόμενά του ραδιοκύματα (Radio waves) και ραδιοσυχνότητες (Radio frequencies, RF).

2.2. Κατανομή ραδιοφάσματος

Δύο ή περισσότερα κύματα που συνυπάρχουν στο χώρο, σύμφωνα με το νόμο της επαλληλίας προστίθενται μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα μοναδικό σύνθετο κύμα. Το ίδιο ισχύει για τα κύματα ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν τέσσερεις παράμετροι που μπορούν να διαχωρίσουν τα αρχικά κύματα: οι τρείς διαστάσεις του χώρου, οι κατευθύνσεις και οι εμβέλειες των κυμάτων και ο χρόνος. Η αρχή της επαλληλίας υπαγορεύει τα ακόλουθα σχετικά με τη σύνθεση κυμάτων: Η σύνθεση λαμβάνει χώρα μόνο στα κοινά σημεία διάδοσης. Δηλαδή, αν οι πρωτότυπες κατευθύνσεις δύο κυμάτων που υπέστησαν σύνθεση, τα οδηγήσει τελικά σε ξεχωριστά σημεία του χώρου, και εφόσον δεν έχουν αποσβεστεί, τα κύματα διαχωρίζονται στα αρχικά.

Όσο πολλαπλά κύματα διαδίδονται στον ίδιο χώρο, σε κάθε κοινό σημείο διάδοσης, η σύνθεση γίνεται χρονικά, καθώς το τρέχον πλάτος του ενός κύματος προστίθεται στο τρέχον πλάτος του άλλου. Ως αποτέλεσμα, κάθε ξεχωριστό χρονικό μοτίβο που ανήκει σε ένα από τα αρχικά κύματα παραμένει αναλλοίωτο στη σύνθεση. Αντιθέτως, τα κοινά χρονικά μοτίβα συνδυάζονται. Υπάρχουν δύο χαρακτηριστικά, που καθορίζουν το χρονικό αποτύπωμα μιας περιοδικής αρμονικής διαταραχής: η συχνότητα και η σχετική διαφορά φάσης. Η φάση είναι υπερβολικά τυχαία και έχει μικρό εύρος διαφορετικών τιμών. Η συχνότητα στερείται αυτούς τους περιορισμούς.

Η αρχή των συστημάτων ασύρματης τηλεπικοινωνίας επιβάλει τα ίδια κύματα που εκπέμπονται από ένα σημείο να λαμβάνονται άρτια από ένα άλλο. Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται μόνο οι σωστές εκπομπές από ένα σημείο λήψης σε ένα περιβάλλον πολλών ταυτόχρονων πηγών εκπομπής είναι ο διαχωρισμός ως προς τη συχνότητα. Δηλαδή, τα διαδιδόμενα φέροντα διαφορετικών συχνοτήτων, μαζί με τις τυχούσες πληροφορίες τους, μπορούν να απομονωθούν με μια απλή διαδικασία από τους δέκτες, ενώ τα κύματα ίδιας συχνότητας, αφού αθροιστούν, είναι πλέον δύσκολο να διαχωριστούν. Μέσω συμβάσεων που ξεκίνησαν να καθιερώνονται από τον καιρό πρωτοϊδρυσης της ασύρματης τηλεπικοινωνίας, γενικά κάθε ασύρματο δίκτυο ή οποιαδήποτε σύστημα εκπομπής – λήψης που καταλαμβάνει τον ίδιο χώρο με άλλα, πρέπει να λειτουργεί σε μοναδικό εύρος ζώνης. Όπως

περιγράφηκε προηγουμένως, το φάσμα των συχνοτήτων είναι πεπερασμένο και περιορίζεται από την προσβασιμότητα της τεχνολογίας, την ασφάλεια και τη συνύπαρξη ακούσιων και εκούσιων πηγών. Η προσβασιμότητα της τεχνολογίας, όσον αφορά τη συχνότητα, αναλύεται σε θέματα όπως το ζητούμενο μέγεθος των κεραιών, το οποίο επηρεάζει το μήκος κύματος, η ποιότητα και το μέγεθος των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, που χρησιμοποιούνται πλέον αποκλειστικά, και την εξουδετέρωση του θορύβου.

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων είναι κρατικός πόρος και διανέμεται από τις αρμόδιες αρχές για την εξυπηρέτηση του συνόλου των αναγκών του. Στην Ελλάδα, με την προήγηση διαφόρων διατάξεων του Ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU), από τη δημοσίευση της κοινής απόφασης των υπουργών εθνικής άμυνας και ψηφιακής διακυβέρνησης, 18941 ΕΞ 2023, [5], ισχύει ο τρέχων Εθνικός Κανονισμός Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων (ΕΚΚΖΣ). Ο συνημμένος σε αυτόν πίνακας κατανομής προβλέπει τα είδη των υπηρεσιών που επιτρέπεται να αναλάβουν το φάσμα μεταξύ 8,3 kHz και 1000 GHz.

Τα προβλεπόμενα είδη εξηγούνται και συνοδεύονται από το είδος των σταθμών που τους αντιστοιχεί. Παραδείγματα σταθμών: επίγειος σταθμός βάσης, κινητός σταθμός ξηράς, παράκτιος σταθμός, σταθμός πλοίου. Σημειώνονται επίσης ονομαστικά εφαρμογές, δηλαδή είδη συστημάτων επικοινωνίας ή τεχνολογίες που μπορούν να τεθούν σε λειτουργία από τις αντίστοιχες υπηρεσίες στα επιμέρους διαστήματα. Παραδείγματα εφαρμογών: ραδιοφωνία FM, αμυντικά συστήματα, δορυφόροι χαμηλής τροχιάς, WAS/RLAN, SRD, ISM. Επίσης, ορισμένα διαστήματα ανατίθενται σε κρατικές υπηρεσίες με αποκλειστικότητα, όπως Ένοπλες Δυνάμεις και Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας, για τις ανάγκες επικοινωνίας και εφαρμογών τους. Παραδείγματα των ειδών υπηρεσιών στα οποία κατανέμεται το φάσμα είναι: ευρυεκπομπή, σταθερή, αεροναυτική κινητή, ερασιτεχνική, ραδιοαστρονομία, ναυτιλιακή κινητή, κινητή δορυφορική.

Όλα τα προβλεπόμενα διαστήματα του φάσματος που δεν δεσμεύονται καθολικά από τις κρατικές υπηρεσίες, διατίθενται από τις αρμόδιες αρχές, ανάλογα με τις ανάγκες και τη γεωγραφική περιοχή, σε δύο φορείς. Είτε διατίθενται σε κρατικά ασύρματα δίκτυα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται από την αστυνομία, το Εθνικό Κέντρο Άμεσης Βοήθειας, την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, τη δημόσια τηλεόραση και ραδιοφωνία, τα δημόσια εκπαιδευτικά ιδρύματα, τα υπουργεία, τις ξένες πρεσβείες και άλλα, είτε υπόκεινται σε διεκδίκηση από ιδιώτες, σύμφωνα με το νόμο 4070/2012, [6], προς όφελος της αγοράς υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών.

Η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ), με έδρα το Μαρούσι, είναι η Ελληνική κρατική αρχή ή Εθνική Ρυθμιστική Αρχή (ΕΡΑ), υπεύθυνη για τη ρύθμιση και τον έλεγχο της αγοράς υπηρεσιών και δικτύων ηλεκτρονικών επικοινωνιών, ταχυδρομικών υπηρεσιών και συναφών υπηρεσιών και συντονίστρια ψηφιακών υπηρεσιών. Στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, εν συντομία, οι βασικοί της ρόλοι είναι να διαχειρίζεται τα δικαιώματα των εταιριών παροχής υπηρεσιών και να υποστηρίζει τον ανταγωνισμό, να διαθέτει δικαιώματα χρήσης του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων, να αδειοδοτεί κατασκευές κεραιών και να επιβάλει την συμμόρφωση των προϊόντων ραδιοεξοπλισμού του εμπορίου με τη νομοθεσία. [7]. Σημειώνεται ότι η ΕΕΤΤ δεν έχει αρμοδιότητα χορήγησης φάσματος σε ραδιοφωνία ευρυεκπομπής και υπηρεσία ραδιοερασιτέχνη. [6]. Υπεύθυνο για την συχνότητα ραδιοφωνικών σταθμών καθώς και για τα προγράμματα του ραδιοφώνου και της τηλεόρασης είναι το Εθνικό Συμβούλιο Ραδιοτηλεόρασης. [8], [9], [10].

Η ανάληψη δικαιωμάτων χρήσης ραδιοφάσματος γίνεται με αίτηση άδειας ή διαγωνιστικές διαδικασίες και καταβολή τελών ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας. Παραδείγματα ιδιωτών που χρησιμοποιούν το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων είναι οι πάροχοι υπηρεσιών φωνής και δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, η δεύτερη από τις οποίες συμπεριλαμβάνει την ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο, οι πάροχοι δικτύων τηλεόρασης και ραδιοφώνου, εταιρίες που απαιτούν ιδιωτικά δίκτυα επικοινωνίας, όπως δημόσιας μεταφοράς (ραδιοταξί), αεροπορικές, ναυτιλιακές, παροχής υπηρεσιών ασφαλείας. Σύμφωνα με τον τρέχοντα κανονισμό όρων χρήσης ραδιοφάσματος, [11], οι ζώνες 2400 – 2483,5 MHz και 5470 – 5725 MHz είναι ελεύθερες χωρίς άδεια για λειτουργία τοπικών ασυρμάτων δικτύων «WAS/RLAN» εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου, στα οποία περιλαμβάνονται τα δίκτυα που ακολουθούν τα πρότυπα WiFi, Bluetooth και άλλα που εφαρμόζονται σε ανέσεις όπως ασύρματα σταθερά τηλέφωνα, φούρνοι μικροκυμάτων, συστήματα συναγερμών, τηλεχειρισμός θυρών και αυτοματισμός από νοικοκυριά και επιχειρήσεις. Οι προδιαγραφές των συσκευών που επιτρέπονται, καθορίζονται στον κανονισμό. Μεταξύ αυτών, η μέγιστη ισοδύναμη ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) είναι 100 mW στην πρώτη ζώνη και 1 W στη δεύτερη.

Ο πίνακας 2.1 περιέχει, παραδείγματος χάριν, τις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούν οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας, [12], η ψηφιακή τηλεόραση, [13], και οι ραδιοφωνικοί σταθμοί με διαμόρφωση FM, [5], στην Ελλάδα. Σημειώνεται ότι οι παρακάτω ζώνες μοιράζονται στους διαφόρους παρόχους αλλά είναι σχεδόν κοινές στις διάφορες γεωγραφικές περιοχές της χώρας όπου υπάρχει κάλυψη των αντίστοιχων δικτύων. Στην περίπτωση της κινητής τηλεφωνίας, αναγράφονται επίσης τα πρότυπα, ή γενιές, των εγκατεστημένων από τους παρόχους, κινητών κυψελοειδών δικτύων τηλεπικοινωνίας που λειτουργούν σε κάθε ζώνη.

Πίνακας 2.1: Κατειλημμένες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων από τρεις υπηρεσίες στην Ελλάδα

Υπηρεσία	Εύρη ζώνης (MHz)	Ονομασία ζώνης	Γενιές δικτύων
Ραδιοφωνία	87,5 – 108	FM	
Ψηφιακή τηλεόραση	470 – 694	-	
Κινητή τηλεφωνία	703 – 733, 758 – 788	700 MHz	5G
Κινητή τηλεφωνία	791 – 821, 832 – 862	800 MHz	4G
Κινητή τηλεφωνία	880 – 915, 925 – 960	900 MHz	2G, 4G
Κινητή τηλεφωνία	1710 – 1785, 1805 - 1880	1800 MHz	4G
Κινητή τηλεφωνία	1920 – 1980, 2110 – 2170	2 GHz	3G, 5G
Κινητή τηλεφωνία	2500 – 2615, 2620 – 2690	2600 MHz	4G
Κινητή τηλεφωνία	3410 – 3800	3400 – 3800 MHz	4G, 5G
Κινητή τηλεφωνία	24549 – 25109, 25557 - 26117, 26500 - 27500	26 GHz	4G, 5G

3. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ

Όλες οι μηχανές του ανθρώπου, η λειτουργία των οποίων εξαρτάται από την εκμετάλλευση της κίνησης ηλεκτρικού φορτίου σε σχετικά χαμηλή πυκνότητα ή την αναγνώριση, ως σήμα, της μεταβολής των φυσικών μεγεθών που προκαλεί, όπως της διαφοράς δυναμικού, είναι, στην βασική τους σχεδίαση, ευαίσθητες στα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα. Οι μηχανές αυτές περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται, στα εξής παραδείγματα: όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία και, συνεπώς, όλες οι μηχανές όπου αυτά ενσωματώνονται, δηλαδή π.χ. στους σταθερούς και φορητούς υπολογιστές, στις έξυπνες συσκευές, στα συστήματα χειρισμού των πλοίων, των αεροσκαφών, των σύγχρονων αυτοκινήτων, των υποβρυχίων, των οικοδομικών μεταφορικών μέσων, στις ιατρικές συσκευές, στους τεχνητούς δορυφόρους και στους πυραύλους, ο δημόσιος και ιδιωτικός φωτισμός, οι οικιακές συσκευές και όλων των ειδών οι πομποί και οι δέκτες τηλεπικοινωνίας. Ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα είναι όλα τα φαινόμενα που παράγουν και εκπέμπουν διαταραχή ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, και οι πηγές τους χωρίζονται, όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε φυσικές και ανθρωπογενείς, εκούσιες και ακούσιες.

3.1. Εισαγωγή

Τα ηλεκτρικά συστήματα βασίζονται στη χαλιναγώγηση και διαχείριση των ηλεκτρικών φαινομένων. Για να το καταφέρουν, διαταράσσουν τον ηλεκτρισμό, σύμφωνα με το σχεδιασμό τους. Όμως, όλα τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα αλληλοεπηρεάζονται. Έτσι, κάθε ξένη και αντίθετη διαταραχή των δύο φύσεων, είναι ικανή να μεσολαβήσει και να εμποδίσει την διαδικασία. Για να συμβεί αυτό, η διαταραχή πρέπει να εισβάλει στην δομή ελέγχου του συστήματος. Αυτή συνήθως αποτελείται από αγώγιμα στοιχεία. Η μεταφορά ηλεκτρικών και μαγνητικών διαταραχών γίνεται με τρείς τρόπους: δι’ αγωγής, δι’ επαγωγής και δι’ ακτινοβόλησης. Δηλαδή, εξ επαφής αγωγών, με το φαινόμενο της μαγνητικής επαγωγής κοντινών αγωγών και με την διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή με συνδυασμό των τριών. Αποτελέσματα της παρεμβολής εξωτερικών διαταραχών ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στις εσωτερικές διαταραχές μιας συσκευής ή συστήματος είναι η μείωση της επίδοσης, η διακοπή της κανονικής λειτουργίας ή και η μόνιμη βλάβη. Το φαινόμενο ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ή παρενόχληση (Electromagnetic Interference, EMI). Επίσης, συχνά, ως δεύτερη έννοια, παρεμβολή ονομάζεται η ίδια η ξένη διαταραχή.

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή περιλαμβάνει την ανεπιθύμητη αλληλεπίδραση ηλεκτρικών συστημάτων με άλλες ανθρωπογενείς πηγές ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, δηλαδή την αλληλεπίδραση συστημάτων μεταξύ τους, την αλληλεπίδραση συστημάτων με φυσικές πηγές και την αλληλεπίδραση εξαρτημάτων στο εσωτερικό ενός συστήματος. Κοινά παραδείγματα ακούσιων ανθρωπογενών πηγών ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής είναι οι μη γραμμικές ηλεκτρικές μηχανές, όπως οι κινητήρες και οι γεννήτριες στα μεταφορικά μέσα και στις βιομηχανίες, οι οποίες παράγουν απότομες μεταβολές τάσης και πεδίων, αντίστοιχες οικιακές συσκευές, οι λάμπες φθορισμού, οι κεραίες τηλεπικοινωνιών και οι αγωγοί μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Κοινά παραδείγματα

φυσικών πηγών ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής είναι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μεταξύ συννέφων και μεταξύ συννέφων και εδάφους, δηλαδή αστραπές και κεραυνοί, τα οποία παράγουν πολύ απότομες και πολύ μεγάλες μεταβολές τάσης και πεδίων, η ηλιακή και η κοσμική ακτινοβολία.

Οι πιθανές επιπτώσεις της παρεμβολής στις ηλεκτρικές συσκευές διαφέρουν ανάλογα με την ισχύ των εισβαλόντων διαταραχών και από το είδος της χρήσης τους. Για παράδειγμα, οι απότομες μεταβολές που προκαλούν ασύμφωνα στοιχεία συνδεδεμένα σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προκαλέσει επαναλαμβανόμενες ή στιγμιαίες διακοπές ή πτώσεις τάσης, οι οποίες είναι ταυτόχρονα ικανές να χαμηλώσουν τον φωτισμό, αλλά και να απενεργοποιήσουν έναν υπολογιστή με συνέπεια την απώλεια δεδομένων, ενώ το χτύπημα του κεραυνού επάνω ή κοντά σε αγωγό, εκτός από πυρκαγιά, μπορεί να διαδώσει υπέρταση σε όλο το συνδεδεμένο ηλεκτρικό κύκλωμα, καταστρέφοντάς το. Φυσικά, μέθοδοι αποφυγής της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής κάθε είδους υπάρχουν, εφαρμόζονται και θα αναφερθούν αργότερα. Ωστόσο, οι προαναφερθείσες καταστάσεις, αφορούν περισσότερο την παρεμβολή δι' αγωγής. Η παρεμβολή δι' ακτινοβόλησης είναι ένα ακόμη πιο συχνό φαινόμενο, και εξαιρετικά ευαίσθητες είναι σε αυτήν οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες, οι οποίες αναπτύσσονται με πολύ γρήγορο ρυθμό και αποκτούν σταδιακά καίριες χρήσεις για τους ανθρώπους.

3.2. Παρεμβολή στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες

Μία τηλεπικοινωνία βασίζεται στην σωστή ανταλλαγή σημάτων από έναν συγκεκριμένο πομπό σε έναν ή περισσότερους, συγκεκριμένους δέκτες. Τα σήματα μιας ασύρματης τηλεπικοινωνίας είναι, ουσιαστικά, ηλεκτρομαγνητικά κύματα και διαδίδονται σε ένα μέσον, το οποίο ονομάζεται και κανάλι. Επίσης, πολλές τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούν το ίδιο μέσον, όπως την ατμόσφαιρα και το διάστημα. Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σε μια ασύρματη τηλεπικοινωνία είναι, πρώτον, η λήψη και αποδοχή σήματος από έναν δέκτη της, το οποίο δεν προέρχεται από τον πομπό της, αλλά προέρχεται από έναν ξένο πομπό, ο οποίος επιχειρεί μια διαφορετική τηλεπικοινωνία, ή από οποιαδήποτε άλλη πηγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Δεύτερον, είναι η λήψη και αποδοχή από τον δέκτη, της παραμόρφωσης του σωστού σήματος, λόγω της επίδρασης ξένου σήματος ή οποιουδήποτε ηλεκτρομαγνητικού φαινομένου και, τρίτον, είναι η ολοκληρωτική εξουδετέρωση του σωστού σήματος από ξένο σήμα ή φαινόμενο ώστε τελικά να μην πραγματοποιηθεί καμία τηλεπικοινωνία.

Δύο είναι τα στάδια για την πραγματοποίηση αυτής της παρεμβολής: η λήψη και η αποδοχή. Όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διάδοση πολλαπλών κυμάτων σε ένα μέσον διαχωρίζεται από τις διαστάσεις του χώρου, τις κατευθύνσεις και τις εμβέλειες των κυμάτων και το χρόνο. Συμπληρώνεται τώρα ότι διαχωρίζεται και από τα εμπόδια του μέσου. Συγκεκριμένα, η πορεία ενός κύματος προβλέπεται από τα μοντέλα διάδοσης, τα οποία, εκτός από την απόσβεση, συνυπολογίζουν τα αναμενόμενα εμπόδια καθώς και τα φαινόμενα ανάκλασης, διάθλασης και περίθλασης, όπως για παράδειγμα το μοντέλο Hata, που αφορά μεγάλες αποστάσεις και κατηγοριοποιεί το μέσον σε αστική, προαστιακή και υπαίθρια ζώνη. Το στάδιο της λήψης της παρεμβολής πραγματοποιείται μόνο στο σημείο του δέκτη, αν αυτό είναι εντός της εμβέλειας και της τελικής διεύθυνσης του ξένου κύματος. Το στάδιο της αποδοχής εξαρτάται από τους παράγοντες της συχνότητας και της εναπομένουσας ισχύος

του ξένου κύματος σε σχέση με τη συχνότητα και την ισχύ του επιθυμητού κύματος, που λαμβάνεται επίσης. Ο δέκτης χρησιμοποιεί το φαινόμενο του συντονισμού για την απομόνωση του σωστού σήματος με βάση την προκαθορισμένη γνωστή συχνότητα. Σε γενικά πλαίσια, αν τα δύο κύματα έχουν παρεμφερή συχνότητα, εκτός κι αν η ισχύς του ξένου κύματος είναι πολύ μικρότερη, συμβαίνει παρεμβολή.

Αποκλειστικά σε εξειδικευμένα ψηφιακά συστήματα τηλεπικοινωνίας, η αποδοχή της παρεμβολής, εξαρτάται επίσης από το αν το σύνθετο σήμα που παράγεται ανήκει στο σύνολο των επιτρεπτών. Σε τέτοια συστήματα, όπως του τηλεχειρισμού και του διαδικτύου, γίνεται έλεγχος του λαμβανόμενου σήματος ως πληροφορία για να γίνει αποδεκτό. Ωστόσο, ο έλεγχος ενδέχεται να γίνεται μόνο σε ορισμένα τμήματα της πληροφορίας ενώ εξαρτάται από το είδος του συστήματος η πιθανότητα αποδοχής εσφαλμένης πληροφορίας. Επίσης, παραμένει ο κίνδυνος της απώλειας μιας αποστολής. Οι υπόλοιποι δέκτες αναγνωρίζουν τα λαμβανόμενα σήματα χωρίς περιορισμούς επειδή δεν αναμένουν σε αυτά κάποια συγκεκριμένη πληροφορία από τη φύση της χρήσης τους.

Οι παρεμβολές, με τη δεύτερη έννοια του όρου, είναι πολύ συνηθισμένες στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Όταν οι παρεμβολές βρίσκονται υπό έλεγχο, ονομάζονται θόρυβος. Πιο συγκεκριμένα, ο θόρυβος είναι η σύνθεση ξένων σημάτων αποτυπωμένη στο επιθυμητό λαμβανόμενο σήμα. Ο θόρυβος δεν έχει την ίδια συχνότητα με το επιθυμητό σήμα, αλλά έχει συνήθως μεγαλύτερη, και οφείλεται στους φυσικούς περιορισμούς των μέσων απομόνωσης των σημάτων μέσω της συχνότητας, όπως τα φίλτρα και οι συντονιστές, και την ενίσχυση ακτινοβολίας του υποβάθρου. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα παράγουν θόρυβο, όταν μεταδίδουν σήματα στο εσωτερικό τους, ο οποίος λέγεται εσωτερικός θόρυβος. Ως θόρυβος, οι παρεμβολές αντιμετωπίζονται με διάφορους τρόπους, όπως η ενίσχυση σε ορισμένα σημεία των επιθυμητών σημάτων προκειμένου να αυξηθεί ο λόγος τους προς τον αναμενόμενο θόρυβο και να εξουδετερωθεί τελικά ο δεύτερος.

Η αξιοπιστία της τηλεπικοινωνίας μπορεί είναι ασήμαντη σε κάποιες περιπτώσεις, όσο και η σύντομη διακοπή ή παραμόρφωση στην ακρόαση μουσικής από ασύρματα ακουστικά ηχεία ή στην τηλεθέαση προγράμματος, αλλά είναι κρίσιμη σε άλλες. Παραδείγματα τηλεπικοινωνιών που απαιτούν ακρίβεια είναι η λειτουργία ορισμένων αισθητήρων και η επικοινωνία μεταξύ εξαρτημάτων στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, όπως εκείνα στα οποία βασίζονται υπολογιστές που συμβάλλουν σε ή και αναλαμβάνουν την οδήγηση έξυπνων οχημάτων, την πτήση αεροπλάνων, την συντήρηση υποδομών αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι δεξαμενές καυσίμων και οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, ο αυτοματοποιημένος ή μη τηλεχειρισμός μηχανών σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η τηλεπικοινωνία έκτακτης ανάγκης, η τεχνητή υποστήριξη ζωής, η στρατιωτική τηλεπικοινωνία και ο ραδιοεντοπισμός ή αλλιώς ραντάρ, στον οποίο πολλές φορές βασίζεται η διοίκηση ενός πλοίου. Με άλλα λόγια, το σήμα που λαμβάνεται και αναγνωρίζεται από έναν δέκτη, σε πολλές ασύρματες τηλεπικοινωνίες, καθορίζει τη λήψη αποφάσεων και προκαλεί σημαντικές πράξεις. Έτσι, ανάλογη με αυτές σημασία αποκτά το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής.

Με βάση τα παραπάνω, οι επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σε τηλεπικοινωνίες ή εκείνης, η οποία προκαλείται από τηλεπικοινωνίες και πλήττει άλλα συστήματα, διαφέρουν. Κοινά παραδείγματα είναι η δυσλειτουργία συστήματος πλοήγησης αεροσκάφους λόγω της ασύρματης εκπομπής από συσκευή επιβάτη και η εξουδετέρωση των παλμών τεχνητού καρδιακού βηματοδότη σε ασθενή λόγω χρήσης ασύρματης συσκευής από τον ίδιο. Επίσης, υπάρχουν καταγεγραμμένα

περιστατικά ατυχημάτων που έχουν συμβεί στο παρελθόν και αποδίδονται σε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Τα περιστατικά αυτά αρχειοθετούνται και χρησιμεύουν στην έρευνα πρόληψης ατυχημάτων του παρόντος. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα.

Στις αρχές του αιώνα, όταν η σταθερή τηλεφωνία ήταν αναλογική, κοντά στις εγκαταστάσεις του Οργανισμού Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος, στον δήμο Παλλήνης της περιφέρειας Αττικής, οι συνδρομητές παραπονιόνταν ότι άκουγαν τις παράκτιες ναυτικές επικοινωνίες στο τηλέφωνό τους, πριν πραγματοποιήσουν μια κλήση. Παλιότερα, το πάτημα ενός πιεζοηλεκτρικού αναπτήρα ενεργοποιούσε το άνοιγμα της ράβδου και επέτρεπε σε αυτοκίνητα την ελεύθερη πρόσβαση σε ένα συγκεκριμένο εμπορικό χώρο στάθμευσης. [2]. Ένας τηλεχειριζόμενος εκκρεμής εναέριος μεταφορέας σε ένα χυτήριο μετάλλων, παρερμήνευσε τυχαίο σήμα, που προερχόταν από ραδιοπομπό, ως αποδεκτή εντολή να αδειάσει το φορτίο του, στο σημείο όπου βρισκόταν ένας εργάτης. Μεταξύ των ετών 1981 και 1987, πέντε αμερικανικά στρατιωτικά ελικόπτερα τύπου «Blackhawk» συνετρίβησαν όταν πλησίασαν σε κεραίες ραδιοφωνικής μετάδοσης. Το δυστύχημα αποδόθηκε στην ερμηνεία της ακτινοβολίας, από το ηλεκτρονικό υποσύστημα ελέγχου πτήσης, ως εντολές που το οδήγησαν να κάνει απότομες κινήσεις. Τέλος, κατά τη διάρκεια του πολέμου των Φώκλαντ το 1982, το Βρετανικό πλοίο Sheffield, το οποίο ενσωμάτωνε το πιο ανεπτυγμένο αντιπυραυλικό σύστημα της εποχής, χτυπήθηκε από βλήμα τύπου «Exocet», το οποίο δεν είχε ανιχνευτεί. Η αδυναμία ανίχνευσης αποδίδεται στο ότι το σύστημα ραντάρ ήταν προσωρινά απενεργοποιημένο, επειδή χρησιμοποιούταν το δορυφορικό σύστημα επικοινωνίας του πλοίου, στο οποίο το πρώτο προκαλούσε παρεμβολή. [14], [15], [16].

Συμπερασματικά, ο διαχωρισμός ως προς τη συχνότητα, η οργάνωση της τοποθέτησης στο χώρο, η ρύθμιση της εκπεμπόμενης ισχύος και ο περιορισμός των κατευθύνσεων των σημάτων είναι οι κύριοι παράγοντες πραγματοποίησης ή όχι παρεμβολής στα σταθερά τηλεπικοινωνιακά συστήματα που συνυπάρχουν με άλλα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι αρχές εξουσιοδοτούν τους ιδιοκτήτες συχνοτήτων, αδειοδοτούν τις διατάξεις κεραιών που χρησιμοποιούν και απαγορεύουν τις αυθαίρετες τηλεπικοινωνίες. Αυτό είναι το πρώτο βήμα. Υπάρχουν πολλοί άλλοι αστάθμητοι παράγοντες, όπως η ανθεκτικότητα των κινητών συστημάτων, όπως των μεταφορικών μέσων, των καθημερινών και επαγγελματικών συσκευών, η κυκλοφορία, οι ανακλάσεις, οι φυσικές πηγές, οι εκούσιες επιθέσεις, ενώ ταυτόχρονα δεν εννοείται η αλάνθαστη οργάνωση των σταθερών δικτύων. Τελικά, η αποφυγή της παρεμβολής σε ένα σύστημα εξαρτάται από το βαθμό στον οποίο οι λειτουργίες όλων των ηλεκτρικών υποδομών, συστημάτων και συσκευών είναι συμβατές με τη δική του και το βαθμό στον οποίο εκείνο είναι συμβατό με το περιβάλλον λειτουργίας του. Η σημασία, και η επίτευξη αυτής της συμβατότητας θα εξηγηθούν στο κεφάλαιο 6.

4. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΥΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η έννοια της ενέργειας είναι αντιληπτή ως η αιτία όλων των φαινομένων ή γενικότερα όλων των αλλαγών. Η Φυσική ορίζει ότι η ενέργεια υπάρχει μόνο όταν περιέχεται σε ύλη. Αυτό γίνεται εύκολα αποδεκτό επειδή η ενέργεια αναγνωρίζεται από τον άνθρωπο μέσω του φορέα της, ο οποίος είναι υλικός, και στον οποίο αποδίδεται το αποτέλεσμά της. Επίσης, πρέπει ο φορέας να είναι άμεσα αισθητός, ή πιο συγκεκριμένα, ορατός. Έτσι, η παρατήρηση του κινούμενου οχήματος προμηνύει στον άνθρωπο την ύπαρξη της κινητικής ενέργειας, λόγω της μεταφοράς της από το ακέραιο όχημα, μέσω της δύναμης, στο αμάξωμά του και στο εμπόδιο, κατά το ενδεχόμενο της κρούσης, και ο βράχος που βρίσκεται στο λόφο αποκαλύπτει την δυναμική του ενέργεια από την φαντασία της πτώσης του. Ενέργεια όμως περιέχεται και στην αόρατη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, θεωρώντας εκείνη ως κινούμενη αραιά ύλη. Αυτό είναι το γεγονός που την καθιστά, όπως και τις ακτίνες του ηλίου, που είναι μέρος της, ικανή να γίνει επικίνδυνη για τον άνθρωπο.

4.1. Εισαγωγή

Η συγκέντρωση της ενέργειας στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προκαλεί τις διαταραχές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου και από εκείνες, μπορεί να γίνει αντιληπτή η ύπαρξή της. Όσο η ακτινοβολία διατηρεί ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, τόσο υπάρχουν τα κύματά της. Αυτή η παρατήρηση συνδέει τις δύο φύσεις της. Κάποιες φορές, σημασία έχει η στάθμη της συγκεντρωμένης ενέργειας και άλλες τα χαρακτηριστικά των κυμάτων. Μέσω των διαφόρων αλληλεπιδράσεών της με την ύλη, η ακτινοβολία της προσδίδει ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε άλλες μορφές. Η θεωρία του Plank αποδεικνύει ότι ο κβαντισμός της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας εξαρτάται από τις συχνότητες των κυμάτων της ή το αντίστροφο, δηλαδή η ποσότητα ενέργειας του ελάχιστου σωματιδίου της ακτινοβολίας, του φωτονίου, είναι ανάλογη της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Ανάλογα με την συγκέντρωση ενέργειας σε κάθε φωτόνιο, γίνεται διαφορετική κατανομή της διανεμημένης ενέργειας από την ακτινοβολία στα σώματα. Έτσι, η πολύ υψηλής συχνότητας ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να διασπάσει τα μόρια επειδή διανέμει περισσότερη ενέργεια από τους χημικούς δεσμούς, στην ίδια περιοχή. Αντίστοιχα, η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου διαταράσσει διαφόρους βιολογικούς ιστούς. Η σχέση της διαπεραστικότητας της ακτινοβολίας με τη συχνότητα περιγράφεται και με τη σύγκριση του μήκους κύματος με τις διαστάσεις των κενών στις δομές της ύλης.

Εκτός από την κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, τις επιπτώσεις της καθορίζει η καθαρή ποσότητά της και ο ρυθμός συγκέντρωσής της, ή αλλιώς η ισχύς. Κάποιες διαταραχές είναι ισχυρότερες από άλλες, κι ας έχουν ίδια συχνότητα, δηλαδή μεταφέρουν πιο πολλή ενέργεια (φωτόνια) στον ίδιο χρόνο, ενώ ασθενέστερες μεταφέρουν την ίδια ενέργεια σε περισσότερο χρόνο. Ανάλογα με το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας, αυξάνονται οι εντάσεις των πεδίων και η απόσταση που διανύουν πριν αποσβεστούν. Ανάλογα με τις εντάσεις των πεδίων, αυξάνονται οι δυνάμεις που ασκούν στα

φορτισμένα σωματίδια της ύλης και ο συνδυασμός της έντασης και της συχνότητας εναλλαγής τους, εξαρτά το αν διαταράσσουν άλλα περιοδικά ηλεκτρικά φαινόμενα, όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, η συνολική απορροφημένη ενέργεια εξαρτά τη μετατρεπόμενη ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, στην περίπτωση επαγόμενου ρεύματος, και πιο συχνά, σε θερμότητα.

Στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, κληρονομώντας όλες τις ιδιότητές που αναφέρθηκαν, συμπεριλαμβάνεται εκείνη του ραδιοφάσματος και των μακρών κυμάτων. Δεδομένης της πυκνότητας της χρήσης τους σε όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες, εκεί βρίσκεται το ενδιαφέρον έρευνας των επιπτώσεών της στην υγεία.

4.2. Έκθεση σε ακτινοβολία τηλεπικοινωνιών

Τα πιθανά βιολογικά αποτελέσματα που οφείλονται στις ανθρωπογενείς πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχουν απασχολήσει τους χρήστες της από την εποχή της ανακάλυψής της, τα τέλη του 19ου αιώνα και κατά τις πρώτες χρήσεις της σε ασύρματες επικοινωνίες, στις αρχές του 20ου αιώνα, αλλά έχουν προσελκύσει ιδιαίτερη προσοχή από την εποχή της εξάπλωσής των εφαρμογών της, τα τέλη του 20ου. Το μεγαλύτερο μέρος του ενδιαφέροντος έχουν λάβει τα κινητά τηλέφωνα και οι κεραίες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας αλλά επιφυλακτικά αντιμετωπίζονται επίσης τα τοπικά ασύρματα δίκτυα σε εσωτερικό χώρο, οι φούρνοι μικροκυμάτων, η ραδιοφωνία, η τηλεόραση και άλλα. [17]. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization, WHO), [18], έχει εγκρίνει χιλιάδες δημοσιευμένες μελέτες και άρθρα σχετικά με την έκθεση σε μη ιοντίζουσα ακτινοβολία, διεθνούς προέλευσης. Για την ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων, είναι σίγουρο ότι η βραχυπρόθεσμη επίδρασή της εξαρτάται από παράγοντες όπως η ισχύς, ο χρόνος έκθεσης, οι εντάσεις των πεδίων, η απόσταση από την πηγή και η γεωμετρία του εκτιθέμενου σώματος και υπάρχουν μερικές επιβεβαιωμένες επιπτώσεις στον οργανισμό.

Για να πραγματοποιηθεί μια περιγραφή της επίδρασης της ακτινοβολίας από τηλεπικοινωνίες στον άνθρωπο, πρέπει πρώτα να αναλυθούν οι συμπεριφορές έκθεσής του στις πηγές της. Τα ασύρματα δίκτυα υπηρεσιών μαζικής εξυπηρέτησης χρησιμοποιούν σταθμούς βάσης, οι οποίοι περιέχουν πομπούς ή και δέκτες και διατάξεις κεραιών, τοποθετημένους σε κατοικημένες εκτάσεις. Οι κεραίες αυτές εκπέμπουν ραδιοκύματα μόνο όταν η υπηρεσία χρησιμοποιείται. Η ραδιοφωνία και η τηλεόραση λειτουργούν συνεχόμενα αλλά εκπέμπουν μόνο ένα κύμα, από τις κεραίες προς διάφορες κατευθύνσεις, διαρκώς. Οι σταθμοί βάσης της κινητής τηλεφωνίας όμως, απαιτούν την εκπομπή και τη λήψη πολλαπλών κυμάτων και την οργάνωσή τους, καθώς εξυπηρετούν τις αμφίδρομες επικοινωνίες των συνδρομητών.

Όταν μία γεωγραφική έκταση πρέπει να καλυφθεί από ένα δίκτυο, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους, με λίγες κεραίες με μεγάλη εμβέλεια ή με πολλές κεραίες με μικρή εμβέλεια. Η εμβέλεια της ακτινοβολίας εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής. Όσο ισχυρότερο είναι το εκπεμπόμενο κύμα, τόσο μακρύτερα διαδίδεται. Έτσι, αν μια κεραία πρέπει να εξυπηρετήσει πομποδέκτη, όπως το κινητό τηλέφωνο, που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, θα πρέπει να εκπέμψει ακτινοβολία αναλόγως

μεγάλης ισχύος, η οποία θα διαδοθεί πρώτα ισχυρή στην κοντινή περιοχή της κεραίας, ώστε να φτάσει στον πομποδέκτη εξασθενημένη. Αντιστοίχως, όταν ο πομποδέκτης επιχειρήσει να επικοινωνήσει με την ίδια κεραία, θα πρέπει να εκπέμψει αναλόγως ισχυρή ακτινοβολία, στην οποία ο χρήστης της θα εκτεθεί από πολύ κοντά. Τα κινητά τηλέφωνα είναι ικανά για ισχυρές εκπομπές προκειμένου να επιτύχουν μια τηλεπικοινωνία. Σκοπός των ασυρμάτων δικτύων είναι η πύκνωση με αύξηση του πλήθους των σταθμών βάσης, ώστε να λειτουργούν με χαμηλή ισχύ. Η ίδια αρχή ισχύει για όλα τα τοπικά ή δημόσια δίκτυα που αποτελούνται από πομπούς και δέκτες.

Το ανθρώπινο σώμα έχει την ιδιότητα να απορροφά μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων. Δηλαδή δεν την ανακλά, αλλά, σε κάποιο βαθμό, ούτε της επιτρέπει τη διέλευση. Αυτό συμβαίνει επειδή, λόγω της διπολικής δομής τους, τα μόρια του νερού στο δέρμα και, λιγότερο, στο εσωτερικό, δέχονται δυνάμεις από το ηλεκτρικό πεδίο ώστε να ταλαντώνονται και να περιστρέφονται με τη συχνότητα μεταβολής του και να συγκρούονται. Έτσι, ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική στο μικρόκοσμο, η οποία μεταφράζεται σε θερμότητα στην εκτεθειμένη περιοχή του σώματος, μακροσκοπικά. Ο οργανισμός τότε χρησιμοποιεί θερμορυθμιστικούς μηχανισμούς, όπως η κυκλοφορία του αίματος, ώστε να διασκορπίσει τη θερμότητα και να διατηρήσει την θερμοκρασία του σώματος σταθερή στο διάστημα 36 με 37 °C. [19]. Όμως, όσο ισχυρότερο το κύμα, τόσο πλατύτερες οι διαταραχές και τόσο γρηγορότερα μεταφέρεται θερμότητα στην περιοχή. Αν ο ρυθμός μεταφοράς είναι μεγαλύτερος από τον ικανό ρυθμό απαγωγής της θερμότητας από τους θερμορυθμιστικούς μηχανισμούς και από τη διάχυσή της προς τις επιφάνειες του δέρματος και προς το περιβάλλον, τότε, με ανάλογο της διαφοράς τους ρυθμό, η θερμότητα συσσωρεύεται στην περιοχή. Με ανάλογη ταχύτητα η θερμότητα αυξάνει τη θερμοκρασία των ιστών της περιοχής, συμπεριλαμβανομένων όλων των οργάνων και με ανάλογη ευκολία η αύξηση εξαπλώνεται σε γειτονικά σημεία του σώματος. Όσο περισσότερο χρόνο διαρκεί η έκθεση, τόσο περισσότερο αυξάνεται η θερμοκρασία και τόσο μεγαλύτερες οι βλάβες και οι ζημιές στο σώμα.

Το φαινόμενο ονομάζεται θερμική επίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης. Το ίδιο φαινόμενο, με τη διαφορά ότι δεν αφορά ζωντανό οργανισμό και δεν συναντά τις αντίστοιχες αντιστάσεις, η τεχνολογία το εκμεταλλεύεται για την θέρμανση τροφίμων με ακτινοβολία μικροκυμάτων. Η διαφορά της κοινής χρήσης του με τον κίνδυνο να παραχθεί ακούσια είναι στο μέγεθος της ισχύος των κυμάτων. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [19], η τιμή της ισχύος ανά μονάδα εμβαδού εκτεθειμένης επιφάνειας, με την οποία η ακτινοβολία είναι ικανή να εξουδετερώσει την θερμορυθμιστική ικανότητα του ανθρώπινου σώματος και να αρχίσει να αυξάνει τη θερμοκρασία του, είναι άνω του $1\,\mathrm{mW/m^2}$. Βέβαια, εξαρτάται και από την ευαισθησία του μέρους του σώματος. Πάντως, αυτές οι τιμές είναι πολύ δύσκολο να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα, εκτός αν είναι της τάξης των $1000\,\mathrm{W/m^2}$.

Κατά όλον τον καιρό της μακροχρόνιας έρευνας, την οποία παρακολουθούν οι διεθνείς φορείς ενδιαφέροντος της ανθρώπινης προστασίας, εξετάζεται επίσης το ενδεχόμενο των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων της διαρκούς έκθεσης σε ακτινοβολία χαμηλής ισχύος. Οι συσχετίσεις που έχουν δοκιμαστεί να γίνουν είναι με τον καρκίνο του εγκεφάλου, με κυτταρικές βλάβες, και με παθήσεις όπως η απώλεια μνήμης, η αδυναμία συγκέντρωσης, η αϋπνία και άλλες. Μεγάλο ρόλο στην έρευνα αυτής της κατηγορίας έχουν οι επιδημιολογικές μελέτες. Όμως, το σύνολο της έρευνας είναι ακόμη πλήρες με αβεβαιότητα, τυχαία αποτελέσματα που δεν μπορούν να επαναληφθούν και αντιφάσεις. Δηλαδή, δεν έχει επιβεβαιωθεί ούτε διαψευστεί καμία από τις δυσμενείς συνέπειες της έκθεσης σε ραδιοκύματα χαμηλής ισχύος. [17], [20].

4.3. Έκθεση σε πεδία χαμηλών συχνοτήτων

Η έρευνα των βιολογικών επιπτώσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, έχει κατηγοριοποιήσει ξεχωριστά τα μακρά κύματα, λόγω του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν με τον οργανισμό. Οι συχνότητες αυτών των κυμάτων είναι κάτω των 150 kHz και, κατά κύριο λόγο, δεν αφορούν τα συστήματα τηλεπικοινωνιών. Εκπέμπονται όμως, για παράδειγμα, από τους αγωγούς εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε συχνότητα 50 Hz στην Ελλάδα, και επομένως από την πλειοψηφία των ηλεκτρικών συσκευών, από ηλεκτρικές μηχανές και φυσικά φαινόμενα.

Συγκεκριμένα, επειδή το ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων δεν απορροφάται και διαδίδεται πιο εύκολα μέσα στο σώμα, το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που σχηματίζεται, μπορεί να επάγει ηλεκτρικά ρεύματα σε αγώγιμες διαδρομές στο σώμα, όπως το νευρικό σύστημα. Αυτά τα ρεύματα μπορούν να διαταράξουν τους φυσικούς ηλεκτρικούς παλμούς των νεύρων ή να τους «προσποιηθούν». Το φαινόμενο μοιάζει με την παρεμβολή και ονομάζεται μη θερμική επίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ανήκει στις άμεσες επιπτώσεις της. Φυσικά, οι τιμές των εντάσεων των επαγόμενων ρευμάτων και των συνεπειών τους εξαρτώνται από τις εντάσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. [21], [22].

Όπως και στην προηγούμενη κατηγορία της έρευνας, έτσι και σε αυτήν, αναζητήθηκαν επίσης μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της έκθεσης στον άνθρωπο. Σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάστηκαν υπόνοιες σύνδεσης της έκθεσης με την λευχαιμία, τους εγκεφαλικούς όγκους, την πλάγια αμυοτροφική σκλήρυνση (ALS) και άλλες σοβαρές νόσους. Ωστόσο, δεν αποδείχτηκε καμία μακροπρόθεσμη συνέπεια της ανθρώπινης έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαμηλών συχνοτήτων και χαμηλών εντάσεων. [21], [20], [23].

4.4. Όρια έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Με βάση το διεθνές ενδιαφέρον για τις ενδεχόμενες βλαβερές επιπτώσεις της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας, τα αποτελέσματα και την ανακρίβεια της έρευνας, ιδρύθηκε η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από τη Μη-Ιοντίζουσα Ακτινοβολία (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), [24], ως μη κυβερνητικός οργανισμός ο οποίος ανακοινώνει οδηγίες που προτείνουν όρια για την έκθεση, τα οποία αναθεωρούνται και ενημερώνονται περιοδικά. Το 1998, η ICNIRP δημοσίευσε τις «Οδηγίες για τον περιορισμό της έκθεσης σε χρονικά μεταβαλλόμενα ΗΜ πεδία έως 300 GHz». Οι οδηγίες εγκρίθηκαν από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και υιοθετήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (Comité Européen de Normalization Électrotechnique, CENELEC), και, ύστερα, από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, με την έκδοση της σύστασης με αριθμό 1999/519/ΕC. [25].

Η Ελληνική κυβέρνηση, βασισμένη στη προηγούμενη σύσταση, δημοσίευσε την απόφαση «Μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία κεραιών εγκατεστημένων στην ξηρά», [26], το 2000, η οποία, συμπληρωμένη με το νόμο 3431/2006, [27], και τις παραγράφους 1 και 3 του άρθρου 35 του

νόμου 4635/2019, [28], ισχύει ακόμα για τα ραδιοκύματα 150 kHz – 300 GHz, και την απόφαση «Μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων», [29], το 2002, η οποία ισχύει ακόμα για τα μακρά κύματα 0 – 150 kHz.

Τα προτεινόμενα από την ICNIRP και θεσμοθετημένα από την παραπάνω Ευρωπαϊκή σύσταση όρια τίθενται στον ρυθμό ειδικής απορρόφησης (Specific Absorption Rate, SAR), δηλαδή την απορροφημένη ισχύ ανά μάζα, σε $\mathrm{W/kg}$, στην πυκνότητα ρεύματος, σε $\mathrm{mA/m^2}$, και στην πυκνότητα ισχύος, σε $\mathrm{W/m^2}$, και ονομάζονται βασικοί περιορισμοί. Ο SAR υπολογίζεται για γενική ή τοπική έκθεση στο σώμα. Λόγω της δυσκολίας προσδιορισμού των παραπάνω μεγεθών, για την πρακτική προτυποποίηση μετρήσεων, ορίστηκαν τα επίπεδα αναφοράς. Αυτά περιορίζουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, E, σε $\mathrm{V/m}$, την ένταση του μαγνητικού πεδίου, H, σε $\mathrm{A/m}$, την μαγνητική επαγωγή B σε $\mu\mathrm{T}$, και την πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επίπεδου κύματος S σε $\mathrm{W/m^2}$. Οι τιμές που ορίζονται είναι σταθερές μέσου όρου «rms» από χρονικό διάστημα έκθεσης έξι λεπτών. Η συμμόρφωση με τα επίπεδα αναφοράς ισοδυναμεί με συμμόρφωση με τους βασικούς περιορισμούς. Όμως, η υπέρβαση των επιπέδων αναφοράς δεν επιβεβαιώνει την υπέρβαση των βασικών περιορισμών. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται προσδιορισμός των μεγεθών έκθεσης που θέτουν οι βασικοί περιορισμοί.

Με τις αποφάσεις της, η Ελληνική νομοθεσία χαμηλώνει τα όρια της παραπάνω Ευρωπαϊκής σύστασης κατά 30 % γενικά και κατά 40 % σε αποστάσεις έως 300 μέτρα από την περίμετρο κτηριακών εγκαταστάσεων βρεφονηπιακών σταθμών, σχολείων, γηροκομείων και νοσοκομείων [30]. Επίσης ανατίθεται η αρμοδιότητα στην Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), [31], [31], του ελέγχου τήρησης των ορίων, με μετρήσεις, σε όλες τις διατάξεις κεραιών εγκατεστημένες από ιδιώτες, κατόπιν αιτήματος της Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων, προκειμένου εκείνη να εκδώσει την άδεια λειτουργίας τους. Παραδείγματος χάριν, παρατίθεται ο πίνακας 4.1 των αυστηρότερων επιπέδων αναφοράς ασφαλούς έκθεσης του κοινού, συνδυαστικά σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαμηλής και υψηλής συχνότητας, τα οποία ισχύουν για κοντινές αποστάσεις σε ευαίσθητα ιδρύματα.

Πίνακας 4.1: Πίνακας Ελληνικών επιπέδων αναφοράς εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κοντά σε ευαίσθητα ιδρύματα

Συχνότητα f	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου E (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου H (A/m)	Μαγνητική επαγωγή πεδίου B (μT)	Πυκνότητα ισχύος S ($\mathrm{W/m^2}$)
0 – 1 Hz	-	19200	24000	-
1 – 8 Hz	6000	$19200/\mathrm{f}^2$	$24000/\mathrm{f}^2$	-
8 – 25 Hz	6000	2400 / f	3000 / f	-
0,025 – 0,8 kHz	150 / f	2,4 / f	3 / f	-
0,8 – 3 KHz	150 / f	3	3,75	-
3 – 188 kHz	52,2	3	3,75	-
0,188 – 1,66 MHz	52,2	0,565 / f	0,71 / f	-
1,66 – 10 MHz	$67{,}3/\sqrt{\mathrm{f}}$	0,565 / f	0,71 / f	-
10 – 400 MHz	21,7	0,0565	0,071	1,2
400 – 2000 MHz	$1{,}065 \cdot \sqrt{\mathrm{f}}$	$0{,}00287 \cdot \sqrt{\mathrm{f}}$	$0{,}00356 \cdot \sqrt{\mathrm{f}}$	f / 333
3 – 300 GHz	47,2	0,124	0,155	6

5. ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Ο όρος *ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία* σε αυτήν την εργασία περιλαμβάνει δύο έννοιες. Πρώτον, ανεπίσημα, ένα σύνολο ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών που παρατηρούνται σε αόριστο χώρο και χρόνο. Κατά δεύτερον, μια έννοια που περιγράφει αυτό το φυσικό φαινόμενο. Τα φυσικά φαινόμενα δεν θεωρείται ότι έχουν ποσότητα ή γεωμετρία, αλλά καθένα μπορεί να εκφραστεί ως αλληλουχία από μεταβολές στην ποσότητα ή την κατεύθυνση φυσικών μεγεθών και τις επιπτώσεις τους στην ύλη. Η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους, όντας θεμέλιο της επιστημονικής μεθόδου, είναι πολύ προσεκτική διαδικασία. Όμως, η μέτρηση των αποτελεσμάτων ενός φυσικού φαινομένου με τη χρήση φυσικών μεγεθών είναι ακόμη πιο πολύπλοκη, αφού απαιτεί την απομόνωσή τους από εκείνα μίας σύμπραξης ανεπιθύμητων παραγόντων.

5.1. Εισαγωγή

Το φαινόμενο της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον χώρο ακολουθείται από την μεταφορά του ηλεκτρικού και του μαγνητικού του πεδίου και την μεταφορά ενέργειας. Τα μεγέθη που μετριούνται κυρίως για την αξιολόγηση των πρώτων είναι η ένταση E του ηλεκτρικού και η ένταση H του μαγνητικού πεδίου. Για την αξιολόγηση της ενέργειας, έχει σημασία ο ρυθμός συσσώρευσής της και ιδιαίτερα πάνω σε μια επιφάνεια. Το μέγεθος του ρυθμού μεταβολής της ενέργειας είναι η ισχύς P, ενώ εκείνο της ισχύος που δέχεται μια επιφάνεια λέγεται πυκνότητα ισχύος S. Το πρώτο εκφράζει πόση ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μεταφέρεται σε δεδομένο σημείο ή αόριστο χώρο, σε μια μονάδα χρόνου και το δεύτερο εκφράζει πόση ενέργεια μεταφέρεται σε δεδομένη επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα εμβαδού της. Για τους σκοπούς τις παρούσας εργασίας, ικανά μεγέθη αξιολόγησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι οι εντάσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και η πυκνότητα ισχύος.

Οι ποικίλες πρακτικές διαδικασίες μέτρησης ακτινοβολίας προϋποθέτουν εξέταση πολλών παραμέτρων. Εκ των προτέρων, πρέπει να ληφθούν κάποιες αποφάσεις. Αρχικά, πρέπει να καθοριστεί τίνος από όλα τα μεγέθη της η μέτρηση αντιπροσωπεύει καλύτερα το πρόβλημα, και σε ποιο σημείο του χώρου πρέπει να μετρηθεί. Έπειτα, ποιο όργανο μέτρησης καλύπτει τις ανάγκες της μέτρησης μαζί με ποια εξαρτήματα. Μετά, απαιτούνται η πλήρης γνώση των περιορισμών του συστήματος μέτρησης και της λειτουργίας του οργάνου μέτρησης, ώστε να προσαρμοστούν οι ρυθμίσεις του οργάνου, και η πιστή τήρηση μεθοδολογιών μέτρησης για την αποφυγή ανθρώπινων λαθών. Ακόμη, τα δεδομένα θέτονται υπό επεξεργασία για την παραγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων. Τέλος, πρέπει να γίνεται αποδεκτό ότι τα αποτελέσματα είναι εκτιμήσεις των πραγματικών ζητούμενων τιμών και εξαρτώνται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε και τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκειά της. Το σφάλμα των αποτελεσμάτων τέτοιων μετρήσεων ονομάζεται αβεβαιότητα και μπορεί να υπολογιστεί και να ελαχιστοποιηθεί με συγκεκριμένες μεθόδους. [33].

Ένα παράδειγμα μέτρησης είναι ο προσδιορισμός της ανθρώπινης έκθεσης σε ακτινοβολία των υπηρεσιών ασυρμάτων επικοινωνιών στις κατοικημένες περιοχές. Οι μετρήσεις γίνεται συνήθως σε χώρους προσβάσιμους στο κοινό που θεωρούνται κρίσιμοι ανάλογα με την τοποθεσία των σταθμών βάσης. Εκεί μετριούνται τα καθιερωμένα μεγέθη για την σύγκριση με τα θεσμοθετημένα επίπεδα αναφοράς και χρησιμοποιούνται ανάλογες κεραίες με τα συστήματα εκπομπής σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η μελέτη της ανακλώμενης ακτινοβολίας στα τοιχώματα αεροσκάφους, που σχετίζεται με την έρευνα αύξησης της ανθεκτικότητας των συσκευών πλοήγησης και γίνεται στο εσωτερικό του με φορητά όργανα.

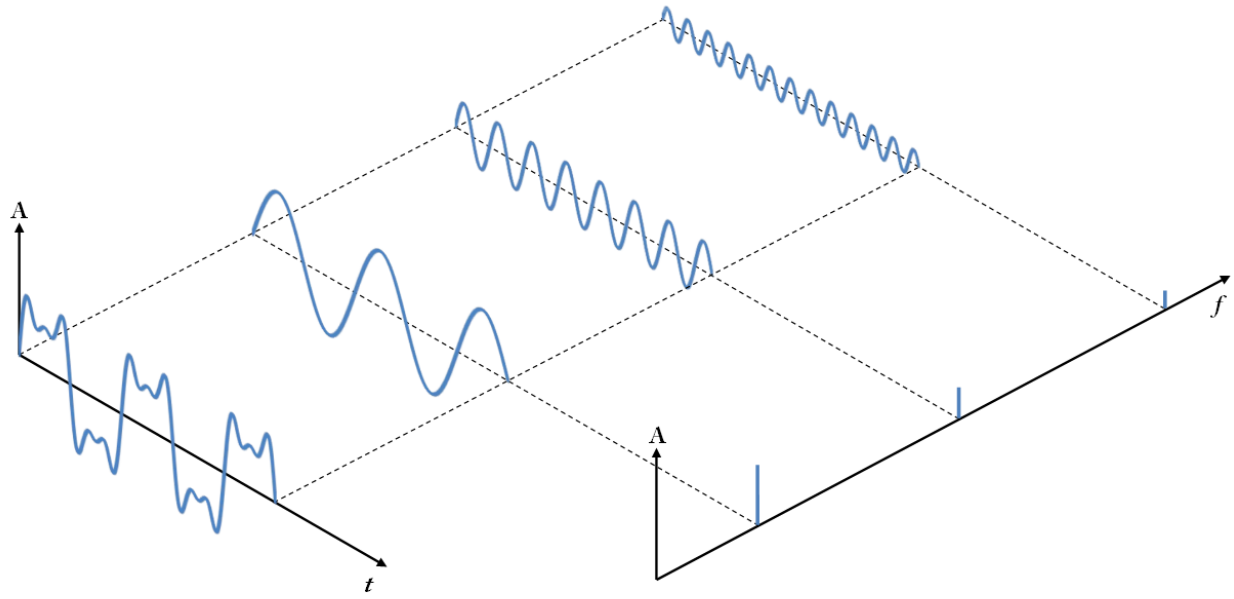
Υπάρχουν δύο κύρια είδη μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας: οι μετρήσεις ευρείας ζώνης και οι μετρήσεις στενής ζώνης. Οι μετρήσεις ευρείας ζώνης ελέγχουν ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης, το οποίο είναι το ονομαστικό εύρος του μετρητή και προσδιορίζουν τη συνολική σύνθετη ακτινοβολία που περιλαμβάνει. Η ακτινοβολία αυτή συνήθως συμπεριλαμβάνει κύματα με διαφορετικές συχνότητες και ισχύ που προέρχονται από διαφορετικούς πομπούς που βρίσκονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις από το σημείο τέτοιας μέτρησης. Ωστόσο, σκοπός της μέτρησης δεν είναι παρά να προσδιορίσει τη συνολική συμβολή τους στο μετρούμενο μέγεθος. Οι μετρήσεις ευρείας ζώνης είναι ο πιο απλός τρόπος εκτίμησης της συνολικής έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και βοηθούν, για παράδειγμα, στην αποτίμηση της συνολικής ισχύος που δέχεται ένα σώμα από ακτινοβολία. Εφόσον όμως δεν περιλαμβάνουν την πληροφορία της λεπτομερούς διάκρισης της συχνότητας, οι ευρυζωνικές μετρήσεις αδυνατούν για παράδειγμα να εξακριβώσουν την συμμόρφωση με τα επίπεδα αναφοράς που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 ή να απομονώσουν τις αιτίες φαινομένων ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, όπως εκείνα που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3.

Από την άλλη πλευρά, οι μετρήσεις στενής ζώνης είναι αυτές που αποσκοπούν, όχι μόνο στην εκτίμηση, αλλά και στην ανάλυση της λαμβανόμενης ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις αυτές προσδίδουν στα αποτελέσματά τους την διάσταση της συχνότητας και, στην περίπτωση πολλαπλών κατευθυντικών μετρήσεων, επιπλέον τις τρείς διαστάσεις της διεύθυνσης συν τη φορά. Οι μετρήσεις στενής ζώνης απαιτούν ευαίσθητο και πιο ανεπτυγμένο εξοπλισμό και συνήθως περισσότερο χρόνο. Κατά βάση, ο μετρητής πρέπει να είναι ικανός να διαχωρίσει τη σύνθετη ακτινοβολία σε συχνοτικές συνιστώσες, την ύπαρξη των οποίων υποδεικνύει η ανάλυση Fourier ενός μεγέθους ακτινοβολίας ως σήμα του χρόνου, αποδεικνύοντας ότι είναι σύνθετο. Στην παρούσα εργασία, κατάλληλη κρίθηκε η επιλογή μελέτης και διεξαγωγής ενός γενικευμένου είδους μετρήσεων στενής ζώνης.

5.2. Περιγραφή των επιλεγμένων οργάνων μέτρησης

Στις μετρήσεις στενής ζώνης, κάθε συγκεκριμένη συχνότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μελετάται ξεχωριστά. Τα κύματα της ίδιας συχνότητας μπορούν να αθροιστούν, αναφορικά με τα πλάτη τους, ενώ τα κύματα διαφορετικών συχνοτήτων θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους. Ένα πακέτο ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνθετο κύμα. Το σύνθετο κύμα είναι ένα άθροισμα απλών αρμονικών κυμάτων. Η ανάλυση αυτή προκύπτει από την θεωρία του μαθηματικού Fourier που αφορά σήματα.

Χρησιμοποιώντας τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης Fourier, κάθε περιοδική καρτεσιανή καμπύλη περιγράφεται μαθηματικά στον άξονα της μονάδας της αντίστροφης περιόδου της. Η περιγραφή έχει τη μορφή ενός αθροίσματος όρων που περιέχουν μόνο τις θεμελιώδεις τριγωνομετρικές συναρτήσεις του ημιτόνου και του συνημιτόνου. Έτσι, ένα τυχαίο περιοδικό σήμα που είναι συνάρτηση του χρόνου, είναι δυνατό να διαχωριστεί στα απλούστατα σήματα που το απαρτίζουν, κατανέμοντας το πλάτος του στις διαφορετικές συχνότητες ή και φάσεις που αντιστοιχεί. Αυτό ονομάζεται μεταφορά από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων. Στο σχήμα 5.1 γίνεται αναγωγή σε τρεις διαστάσεις για την απεικόνιση της γραφικής παράστασης $A(t)$ του πλάτους A ενός περιοδικού σήματος στο πεδίο του χρόνου t, σε σύγκριση με την γραφική παράστασή του, $A(f)$, στο πεδίο της συχνότητας f.



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση ανάλυσης σήματος χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων με προβολή

Οι περιοδικές με συχνότητα f στο χρόνο t μεταβολές ενός μεγέθους που προκαλεί η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε δεδομένο σημείο, συνιστούν ένα σήμα $A(t)$. Τέτοιο σήμα είναι αυτό που αισθάνεται ο αναλυτής φάσματος. Συγκεκριμένα, είναι η τάση $V(t)$ που εμφανίζεται στο κύκλωμά του και, μέσω αυτής, η ισχύς $P(t)$. Ο αναλυτής φάσματος, ή Spectrum Analyzer ή SA, είναι το πρώτο από τα τρία βασικά εργαστηριακά όργανα που επιλέχθηκαν για την παρούσα μελέτη. Είναι ένα από τα πιο σημαντικά όργανα μέτρησης για δοκιμή και σχεδίαση συστημάτων τηλεπικοινωνιών. Η λειτουργία του, στην αρχαϊκή της μορφή, είναι παρόμοια με του βολτόμετρου ή του παλμογράφου με τη βασική διαφορά ότι ο αναλυτής αναλύει και παρουσιάζει τα αποτελέσματά του στο πεδίο των συχνοτήτων. Δηλαδή, η έξοδος δεδομένων του οργάνου σε μία μέτρηση της $P(t)$, περιέχει την $P(f)$. Με αυτόν τον

τρόπο, ο αναλυτής διαχωρίζει και αναγνωρίζει τις διαφορετικές πηγές και αιτίες της ακτινοβολίας σε ένα σύνθετο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον.

Κάποιες εφαρμογές του αναλυτή φάσματος είναι η δοκιμή ραδιοσυχνοτικών συσκευών για συμμόρφωση με πρότυπα εναντίον της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, η αφαίρεση θορύβου και παραμόρφωσης και η παρακολούθηση φάσματος. Όπως προαναφέρθηκε, οι αρμόδιες αρχές παραχωρούν διαφορετικές συχνότητες σε υπηρεσίες όπως τηλεόραση, σταθερή και κινητή τηλεφωνία, που περιλαμβάνουν την πρόσβαση στο διαδίκτυο, αστυνομική επικοινωνία, επικοινωνία έκτακτης ανάγκης και πολλές άλλες. Είναι κρίσιμο κάθε υπηρεσία μονίμως να λειτουργεί μέσα στο εύρος ζώνης που της έχει ανατεθεί και να μην βγαίνει εκτός. Επομένως, κάθε συσκευή που χρησιμοποιείται στα συστήματα επικοινωνίας πρέπει ξεχωριστά να ελέγχεται ώστε η λειτουργία της να είναι πάντα εντός συχνοτικών ορίων. Αυτό είναι μέρος της διαδικασίας για επίτευξη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, η οποία θα αναφερθεί αργότερα. Έπειτα, οι συνολικές υποδομές με όλα τα εξαρτήματα που περιλαμβάνουν πρέπει να περνάνε τον ίδιο έλεγχο. Επίσης, η σχεδίαση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για αυτές τις συσκευές απαιτεί έλεγχο για την αποφυγή παραγωγής ανεπιθύμητου θορύβου. Ακόμη, όλοι οι σταθμοί εκπομπής καθώς και άλλα κρίσιμα σημεία πρέπει να παρακολουθούνται τακτικά για συγκρούσεις ή πηγές παρεμβολών με σκοπό την πρόληψη προβλημάτων. [34]. Για όλα τα παραπάνω, οι μηχανικοί χρησιμοποιούν τις κατάλληλες μετρήσεις με αναλυτές φάσματος.

Οι σύγχρονοι αναλυτές φάσματος ψηφιοποιούν τα λαμβανόμενα σήματα στο εσωτερικό τους και τα παρουσιάζουν σε ψηφιακό περιβάλλον. Κάποιοι από αυτούς έχουν μικρό μέγεθος και μηχανική αντοχή που τους επιτρέπει να είναι χειροκίνητοι, το οποίο προσδίδει πολλές προοπτικές στις εφαρμογές τους. Οι αναλυτές αποθηκεύουν επίσης το δεδομένο της διαφοράς φάσης των απλών συνιστωσών της ακτινοβολίας που δέχονται. Η τιμή της φάσης είναι απαραίτητη για την ανακατασκευή των σημάτων τηλεπικοινωνιών στο πεδίο του χρόνου χωρίς αλλοίωση της πιθανής πληροφορίας που ενδέχεται να περιέχουν. Όμως, στις μετρήσεις έκθεσης ακτινοβολίας που απασχολούν την παρούσα μελέτη, η φάση δεν είναι σημαντική.

Το δεύτερο επιλεγμένο όργανο για τους σκοπούς της εργασίας είναι ο αναλυτής δικτυωμάτων, ή αλλιώς Network Analyzer ή NA. Ο αναλυτής δικτυωμάτων είναι όργανο που μελετάει τα χαρακτηριστικά ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων. Τα συστήματα μπορεί να είναι καλώδια, κεραίες, ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως ενισχυτές, δίοδοι, φίλτρα κλπ., και η μελέτη γίνεται ως προς την ενίσχυση ισχύος ή τάσης, την αντίσταση ή το εύρος ζώνης. Κύριο χαρακτηριστικό του αναλυτή δικτυωμάτων είναι η μέτρηση στο πεδίο των συχνοτήτων. Η υψηλή ευαισθησία του ταιριάζει επίσης με τα υπόλοιπα επιλεγμένα όργανα.

Ο αναλυτής περιέχει δύο υποδοχές, είσοδο και έξοδο. Ένα σύστημα ή συσκευή που επηρεάζει με οποιοδήποτε τρόπο ηλεκτρικά σήματα τοποθετείται ανάμεσα στις υποδοχές. Συγκεκριμένα, η έξοδος του οργάνου συνδέεται με την είσοδο του μελετώμενου συστήματος και η έξοδος του συστήματος συνδέεται με την είσοδο του οργάνου. Έπειτα, το όργανο υποβάλει το σύστημα σε συγκεκριμένες δοκιμές, ανάλογα με το χαρακτηριστικό του συστήματος που ζητείται να βρεθεί. Συγκεκριμένα, το όργανο μεταδίδει γνωστά δοκιμαστικά ηλεκτρικά σήματα με διάφορους τρόπους και παρακολουθεί την μεταχείρισή τους από το σύστημα. Συνήθως, κάθε ηλεκτρική συσκευή που μεταβάλλει σήματα στο εσωτερικό της, όπως τα φίλτρα συχνοτήτων, ασκεί διαφορετική επίπτωση στα σήματα διαφορετικών

συχνοτήτων αλλά σταθερή επίπτωση στα σήματα ίδιας συχνότητας. Οπότε, ο αναλυτής δοκιμάζει ένα καθορισμένο ζητούμενο εύρος και έτσι εξάγονται συμπεράσματα για τη συσκευή. Κοινή μέτρηση του αναλυτή δικτυωμάτων είναι οι παράμετροι σκέδασης συστήματος.

Ο αναλυτής δικτυωμάτων έχει εφαρμογές στη σχεδίαση και συντήρηση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, στην δοκιμή συσκευών και εξαρτημάτων για φθορά ή καταλληλότητα στις τηλεπικοινωνίες και άλλα.

Το τρίτο πειραματικό όργανο που επιλέχθηκε δεν μετράει αλλά παράγει ηλεκτρικά σήματα και κατ' επέκταση ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ονομάζεται γεννήτρια διανυσματικού σήματος ή Vector Signal Generator. Η γεννήτρια παράγει περιοδικό παλμό εντός του ονομαστικού εύρους ζώνης και ενός μεγάλου εύρους ισχύος κατά ρύθμιση. Τα σήματα από εκεί διαδίδονται σε οποιοδήποτε κύκλωμα ή δίκτυο ή σε κεραία όπου μετατρέπονται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να θεωρηθούν φέροντα επειδή η γεννήτρια μπορεί να τα διαμορφώσει με σήμα αναλογικής ή ψηφιακής πληροφορίας που δέχεται κατά επιλογή. Έτσι, η γεννήτρια επιτρέπει την ασύρματη εκπομπή σε οποιαδήποτε συχνότητα και ισχύ, κάνοντας τις ικανές της χρήσεις πολλές. Ωστόσο, το όργανο είναι σχεδιασμένο περισσότερο για επιστημονική μελέτη, καθώς χαρακτηρίζεται από υπερβολικά υψηλές προδιαγραφές και βασική λειτουργία για επαγγελματική χρήση.

Σημειώνεται ότι τα όργανα χρησιμοποιούν τις σχετικές μονάδες decibel (dB) για την έκφραση λόγου και decibel milliwatt (dBm) για την έκφραση ισχύος. Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας χρησιμοποίησε μοντέλα των παραπάνω οργάνων τα οποία παρείχε το Εργαστήριο Μη Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Περιγραφή για τη χρήση τους γίνεται στα κεφάλαια 9 και 10.

5.3. Μέθοδος μέτρησης επιλεγμένων μεγεθών

Παρακάτω θα περιγραφεί η μέθοδος που έχει επιλεχθεί για την μέτρηση της ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε καθορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων B. Το όργανο μέτρησης θα είναι ο αναλυτής φάσματος, η κεραία λήψης θα είναι ισοτροπική, το μέσον σύνδεσης κεραίας-αναλυτή είναι ένα καλώδιο αντίστασης ίδιας με τις υποδοχές που συνδέει και ο αναλυτής θα ρυθμιστεί σε ανίχνευση ισχύος. Ο εγγύς χώρος της λήψης θεωρείται ελεύθερος από εμπόδια. Ο λόγος που επιλέγεται το μέγεθος της ισχύος είναι επειδή σχετίζεται μαθηματικά με τις εντάσεις των πεδίων, καθώς και όλα τα θεωρητικά μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας. Η επιλεγμένη μέθοδος είναι μια απλοποιημένη διαδικασία για γενικές μετρήσεις. Έπειτα, θα υπολογιστούν τα βασικά μεγέθη.

Αρχικά, συναρμολογείται η διάταξη και το όργανο ξεκινά την ανίχνευση και καταγράφει την τιμή της ισχύος που αντιλαμβάνεται στο σημείο της υποδοχής του για κάθε ένα $\mathrm{f_i}$ από τα N συχνοτικά δείγματα εντός του B. Τα δείγματα ισχύος παρουσιάζονται στην έξοδο ως πλάτη στη γραφική παράσταση ισχύος-συχνότητας σε $\mathrm{dBm-Hz}$, η οποία ανανεώνεται σε κάθε περίοδο του ρολογιού του οργάνου. Οι τιμές της σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι $\{\mathrm{P_{out,i}},\ 1 \leq \mathrm{i} \in \mathbb{N} \leq \mathrm{N}\}$ σε dBm και είναι αυτομάτως

διορθωμένες για την εξουδετέρωση του εσωτερικού θορύβου. Έστω B_n το επιτρεπτό εύρος ζώνης θορύβου του χρησιμοποιούμενου φίλτρου ενδιάμεσης συχνότητας IF του αναλυτή φάσματος. Τότε, σύμφωνα με εφαρμογή της μεθόδου Channel Power, [35], για την πραγματική συνολική ανιχνευόμενη από τον αναλυτή ισχύ $P_{scan,B}$, στο εύρος B, σε dBm, ισχύει η σχέση (5.1).

$$P_{scan,B} = 10\log\left[\frac{B}{B_n}\cdot\frac{1}{N}\cdot\sum_{i=1}^{N}10^{\frac{P_{out,i}}{10}}\right] \quad (5.1)$$

Από την παραπάνω εξίσωση, μπορεί να εξαχθεί η μετρούμενη ισχύς $P_{scan,i}$ στην υποδοχή του αναλυτή φάσματος, σε dBm, σε τυχαία συχνότητα f_i του συνόλου δειγμάτων.

$$P_{scan,i} = 10\log\frac{B}{B_n N} + P_{out,i} \quad (5.2)$$

Θεωρήθηκε ότι η συχνότητα του σήματος λήψης παίρνει διακριτές τιμές f_i του συνόλου ανίχνευσης με πλήθος N. Όμως, το σύνολο δεν έχει προσδιοριστεί και μπορεί να επιλεχθεί αυθαίρετα. Οπότε, ορίζονται τα μεγέθη της ισχύος εξόδου P_{out} και της ανιχνευόμενης ισχύος P_{scan} ως συναρτήσεις οποιασδήποτε συχνότητας f. Επίσης, αν ο πρώτος όρος του δεύτερου μέλους της εξίσωσης (5.2), ο οποίος εξαρτάται από τις παραμέτρους της ανίχνευσης, ονομαστεί διορθωτικός παράγοντας C_{scan}της ανίχνευσης, τότε η μεταξύ τους σχέση προκύπτει παρακάτω.

$$P_{scan}(f) = P_{out}(f) + C_{scan} \quad (5.3)$$

Επιπλέον, το εύρος του θορύβου B_n ορίζεται ως το γινόμενο του εύρους μισής απόκρισης, ή αλλιώς των 3dB, RBW, του φίλτρου IF και του συντελεστή διόρθωσης αναλογίας k που εξαρτάται από το επιλεγμένο φίλτρο IF και παρέχεται από τον κατασκευαστή του αναλυτή. [35]. Οπότε, ο σταθερός διορθωτικός παράγοντας C_{scan} γράφεται ως εξής.

$$C_{scan} = 10\log\frac{B}{k\cdot RBW\cdot N} \quad (5.4)$$

Η λαμβανόμενη σε ένα σημείο της κεραίας λογαριθμική ισχύς P είναι εκείνη που αντιλαμβάνεται ο αναλυτής αθροισμένη με τον παράγοντα ενίσχυσης κάθε εξαρτήματος της διάταξης λήψης. Στην μελετώμενη περίπτωση, αυτά είναι μόνο το καλώδιο λήψης και η κεραία λήψης. Η επίδραση του καλωδίου στο σήμα είναι απώλεια και της κεραίας είναι κέρδος. Ο παράγοντας του κάθε εξαρτήματος εξαρτάται από τη συχνότητα f και μπορεί να μετρηθεί ως προς αυτήν με ανίχνευση δοκιμαστικών παλμών στο εξάρτημα από αναλυτή δικτυωμάτων. Έστω $\mathrm{L_c}$ ο παράγοντας μείωσης ή απώλεια του καλωδίου και $\mathrm{G_a}$ ο παράγοντας αύξησης ή κέρδος της κεραίας. Η σχέση περιγράφεται από την εξίσωση (5.5). Αν οι ισχύεις ήταν γραμμένες σε απόλυτες τιμές, οι αντίστοιχοι παράγοντες θα ήταν πολλαπλασιαστικοί συντελεστές.

$$\mathrm{P(f) = P_{scan}(f) + L_c(f) + G_a(f)} \tag{5.5}$$

Ενώνοντας τις εξισώσεις (5.3) και (5.5), η λαμβανόμενη σημειακή ισχύς προκύπτει εύκολα από την ισχύ της εξόδου του αναλυτή φάσματος, όπως φαίνεται στην επόμενη σχέση.

$$\mathrm{P(f) = P_{out}(f) + C_{scan} + L_c(f) + G_a(f)} \tag{5.6}$$

Τέλος, η παραπάνω ισχύς μετατρέπεται από λογαριθμική σε απόλυτη, σύμφωνα με τον επόμενο τύπο, και μετριέται σε mW.

$$\mathrm{P_{abs}} = 10^{\frac{\mathrm{P}}{10}} \tag{5.7}$$

Τώρα, είναι δυνατόν να υπολογιστούν τα επιλεγμένα μεγέθη της εργασίας για την αξιολόγηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η λαμβανόμενη πυκνότητα ισχύος είναι η λαμβανόμενη ισχύς ανά μονάδα εμβαδού επιφάνειας πρόσπτωσης. Στην επιφάνεια πρόσπτωσης της λήψης καταλογίζεται μόνο η ενεργή επιφάνεια της κεραίας. Το εμβαδόν της, $\mathrm{A_{eff}(f)}$, μετριέται σε $\mathrm{m^2}$ και σχετίζεται με την συχνότητα f ή το αντίστοιχο μήκος κύματος λ ως εξής:

$$A_{eff}(f) = \frac{\lambda^2 \cdot G_a(f)}{4 \cdot \pi} = \frac{c^2 \cdot G_a(f)}{4 \cdot \pi \cdot f^2} = \frac{9 \cdot 10^{16} \cdot G_a(f)}{4 \cdot \pi \cdot f^2} \quad (5.8)$$

Οπότε, η πυκνότητα ισχύος λήψης S ισούται με το πηλίκο της ισχύος που δέχεται η ενεργή επιφάνεια προς το εμβαδόν της, σύμφωνα με την (5.9), και μετριέται σε W/m^2.

$$S(f) = \frac{P_{abs}(f)}{A_{eff}(f)} \quad (5.9)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούν να βρεθούν οι εντάσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στην «περιοχή μακρινού πεδίου» ή αλλιώς «περιοχή Fraunhofer» της λήψης. Αυτό σημαίνει πως σίγουρη μέτρηση των μεγεθών μπορεί να γίνει μόνο σε σημεία που ανήκουν έξω από μία σφαιρική περιοχή γύρω από την κεραία λήψης, δηλαδή σε απόσταση r μεγαλύτερη από την ακτίνα της σφαίρας. Η περιοχή εξαρτάται από το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας και από την μεγαλύτερη σε μήκος διάσταση D της κεραίας και μετριέται σε m. Η απόσταση δίνεται στην ανίσωση (5.10). [36]. Η κεραία της μέτρησης πρέπει λοιπόν να τοποθετείται σε απόσταση r από το στόχο της μέτρησης.

$$r > \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot f \cdot D^2}{c} = \frac{2 \cdot f \cdot D^2}{3 \cdot 10^8} \quad (5.10)$$

Η σχέση μεταξύ πυκνότητας ισχύος S και εντάσεων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε περιοχή μακρινού πεδίου λήψης ισούται το μέγιστο μέτρο του διανύσματος Poynting. [37]. Επίσης, αν υποτεθεί ότι παράγονται από επίπεδο κύμα, συνδέονται με την ειδική αντίσταση η του μέσου, για την οποία στο κενό ισχύει $\eta = 120\pi$, σύμφωνα με την εξίσωση (5.11). [36]. Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου μετριέται σε V/m και η ένταση H του μαγνητικού πεδίου μετριέται σε A/m.

$$S = E \cdot H = \frac{E^2}{\eta} = \eta \cdot H^2 \quad (5.11)$$

6. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ

Όπως παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, επειδή επιτρέπει την επικοινωνία και τον έλεγχο μέσω του κενού και επειδή συνδέεται άρρηκτα με τον ηλεκτρισμό, το πιο εύχρηστο φαινόμενο άντλησης ενέργειας υψηλού επιπέδου, είναι ένας πόρος εξαιρετικά εκμεταλλεύσιμος από την τεχνολογία του ανθρώπου. Εξηγήθηκε, όμως, ότι συμβάλλει στο πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, όταν η ανεπιθύμητη σύζευξη μεταξύ ηλεκτρικών συσκευών ή συστημάτων γίνεται εξ αποστάσεως και όταν επιδιώκεται η ταυτόχρονη χρήση του ίδιου μέσου από πολλές ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Επίσης αναφέρθηκε ότι οι προϋποθέσεις για την εμφάνιση της παρεμβολής είναι γνωστές αλλά οι μεταβλητοί παράγοντες που την εξαρτούν, μέσα σε ένα περιβάλλον με ανθρωπογενή και φυσικά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, είναι πολλοί.

6.1. Εισαγωγή

Για την αποφυγή του προβλήματος της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, κάθε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική συσκευή, σύστημα ή υποδομή ή σύστημα ασύρματης τηλεπικοινωνίας πρέπει να είναι ικανό να λειτουργήσει χωρίς η λειτουργία του να επηρεάζει με οποιονδήποτε τρόπο όλα τα υπόλοιπα με τα οποία ενδέχεται να έρθει σε επαφή, να τα πλησιάσει ή να εισέλθει στην εμβέλεια λειτουργία τους. Επίσης, πρέπει το σύστημα αυτό να έχει ανοσία στην λειτουργία των γειτονικών του συστημάτων, αντίστοιχα. Η ικανότητα αυτή του συστήματος ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Η συμβατότητα όλων των ευαίσθητων συσκευών σε ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα προβλημάτισε την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτών για πολλά χρόνια. Από την αρχή της παρατήρησης φαινομένων ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης και την απομόνωση των αιτιών της, οι χρήστες και οι ιδιοκτήτες των τεχνολογιών ξεκίνησαν να δημιουργούν επιτροπές, προκειμένου να συμφωνηθούν τρόποι ώστε οι διαφορετικές τεχνολογίες να μην αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Ταυτόχρονα, η πύκνωση των εμπορικών μεταφορών εισήγαγε μεγαλύτερη ποικιλία τεχνολογιών στο πεδίο ενδιαφέροντος και σταδιακά η προσπάθεια μετατράπηκε σε διεθνή. [38].

Η λύση στο πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ήταν η έρευνα και η ανάπτυξη προτύπων και συμβάσεων με οικουμενική αναγνώριση, τα οποία ρυθμίζουν την σχεδίαση και κατασκευή όλων των ηλεκτρομαγνητικών συσκευών ή συστημάτων, με σκοπό την αρμονική συνεργασία τους στην τεχνολογία. Δηλαδή, η θέσπιση κοινών προτύπων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Εκτός από την οργάνωση των ηλεκτρικών και τηλεπικοινωνιακών υποδομών και εγκαταστάσεων από τις κρατικές αρχές, προτυποποιείται η σχεδίαση όλων των ευαίσθητων προϊόντων, που χρησιμοποιούνται σε αυτές ή προορίζονται για άλλη χρήση, και κυκλοφορούν στο εμπόριο.

6.2. Νομοθεσίες

Διεθνείς συντονιστικοί οργανισμοί, για την συμβατότητα και άλλα θέματα, είναι η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission, IEC), και ο Διεθνής Οργανισμός Προτύπων (International Standards Organization, ISO). Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ο φορέας θέσπισης προτύπων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι η CENELEC και για τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό είναι το Ευρωπαϊκό Ίδρυμα Προτύπων Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute) [38].

Η Ευρωπαϊκή νομοθεσία ακολουθεί την οδηγία 2014/30/ΕΕ, [39], η οποία, μαζί με άλλα έγγραφα, διευκρινίζει τις προδιαγραφές που πρέπει να έχουν όλα τα ηλεκτρικά προϊόντα που εισάγονται ή κατασκευάζονται στον Ευρωπαϊκό Οικονομικό Χώρο, λόγω ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, ώστε να δικαιούνται να αναγράφουν τη σήμανση «CE» (Conformité Européenne), η οποία πιστοποιεί τη συμμόρφωση με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα υγείας, ασφαλείας και προστασίας του περιβάλλοντος. Η σήμανση τοποθετείται από τον κατασκευαστή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εγκυρότητά του, επάνω στο ίδιο το προϊόν και τη συσκευασία και συνοδεύεται από δήλωση συμμόρφωσης, ανάμεσα στα τεχνικά έγγραφα. Όσον αφορά τις τηλεπικοινωνίες, η οδηγία 2014/53/ΕΕ, [40], ρυθμίζει τη διάθεση ραδιοεξοπλισμού, δηλαδή κάθε ασύρματης συσκευής ή μέρους της, στην αγορά και η Ελλάδα εναρμονίζεται με αυτήν, βάσει του διατάγματος ΠΔ/98/2017. [41]. Ο έλεγχος της αγοράς ραδιοεξοπλισμού και η έκδοση αποφάσεων απόσυρσης ασύμβατων συσκευών ανατίθεται στην ΕΕΤΤ.

6.3. Μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Η διαδικασία πιστοποίησης της συμμόρφωσης με τα πρότυπα, εισάγεται στο στάδιο της κατασκευής και αποτελείται από διεξοδικές δοκιμές συμβατότητας, κατά τις οποίες μία συσκευή ή ένα σύστημα συσκευών εξετάζεται ως προς την ενεργητική του αποχή και παθητική του ανοχή στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα περιλαμβάνει και τις δύο ικανότητες. Συσκευή θεωρείται κάθε κατασκευή ή εξοπλισμός με ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά μέρη. Οι δοκιμές γίνονται σε ελεγχόμενους χώρους με γνωστές συνθήκες, όπου μετριέται το μέγεθος και το είδος κάθε πιθανής διαταραχής, δεδομένης της προβλεπόμενης χρήσης της συσκευής. Επίσης, για να γίνουν ακριβείς μετρήσεις των διαταραχών, οι χώροι στους οποίους γίνονται οι δοκιμές πρέπει να μην επιτρέπουν τις ανακλάσεις. Τέτοιος χώρος είναι μια ανοικτή έκταση χωρίς οικοδομές, ενώ ο ιδανικός χώρος για τέτοιες μετρήσεις είναι ο ανηχοϊκός θάλαμος, ο οποίος περιβάλλεται από κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική θωράκιση.

Η ενεργητική αποχή από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή αφορά την επαλήθευση ότι μια συσκευή, που δεν είναι πομπός, δεν εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα έξω από την επιφάνειά της ή, αν εκπέμπει, η ισχύς τους είναι αμελητέα. Αν η συσκευή είναι πομπός, οι εκπομπές της πρέπει να περιορίζονται στο προκαθορισμένο εύρος συχνοτήτων και να έχουν, όσο το δυνατόν, χαμηλότερη ισχύ. Επίσης, ελέγχεται ότι η συσκευή δεν δύναται να προκαλέσει παρεμβολή δι’ αγωγής ή δι’ επαγωγής. Η παθητική ανοχή, ή αλλιώς ανθεκτικότητα στην παρεμβολή, βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική ατρωσία.

Η ατρωσία δεν προβλέπει ότι το περιβάλλον, στο οποίο θα λειτουργήσει η συσκευή, θα είναι απαραίτητα συμβατό, αλλά την καθιστά ικανή να εξουδετερώσει την επίδραση πιθανών ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών.

Με σκοπό να επιτύχουν τους δύο στόχους της συμβατότητας, οι κατασκευαστές εφαρμόζουν μεθόδους και βελτιώνουν τα προϊόντα τους. Σε γενικά πλαίσια, για την ενεργητική αποχή από παρεμβολή, χρειάζεται αρχικά να δοθεί προσοχή στον εσωτερικό μηχανισμό μιας συσκευής. Έπειτα εξετάζεται ότι δεν υπάρχουν ενεργά στοιχεία εκτεθειμένα ή σε ευπρόσιτη θέση και τέλος, αν ο μηχανισμός παράγει ακόμη ανεπιθύμητα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, απαιτείται η θωράκιση του εξωτερικού του καταλλήλως. Για την ατρωσία, αφού αποκλειστεί η περίπτωση σύζευξης δι' αγωγής και δι' επαγωγής με άλλο σύστημα, σημαντικότερο ρόλο έχει η θωράκιση της συσκευής, ώστε να εμποδίσει τις εισερχόμενες παρεμβολές δι' ακτινοβόλησης. Αν επιχειρείται η ατρωσία ενός συστήματος ασύρματης τηλεπικοινωνίας, υπάρχουν μέθοδοι για την οργάνωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης που ακυρώνουν την επίδραση των παρεμβολών, όπως οι ευρυζωνικές εκπομπές. Διαφορετικά, αποφεύγοντας την ενίσχυση των εκπομπών, η επιλεκτική θωράκιση μπορεί να χρησιμεύσει στην μείωση του θορύβου.

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα αναδείχτηκε αρχικά για να διασφαλίσει την κανονική συνύπαρξη των διαφόρων τεχνολογιών που βασίζονται σε ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα. Όμως, η εφαρμογή της αποδεικνύεται χρήσιμη και για την μείωση της έκθεσης του ανθρώπου σε τεχνητά φαινόμενα αυτού του είδους. Η αναγνώριση προτύπων από την βιομηχανία και η ώθησή της σε μέτρα, όπως ο περιορισμός της ισχύος και έλεγχος των εκπεμπόμενων πεδίων των προϊόντων της αγοράς, που αποτελούν λειτουργικά εξαρτήματα των κοινόχρηστων τεχνολογιών, διευκολύνει την τήρηση των θεσμοθετημένων ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβόληση, χωρίς να εμποδίζεται η πρόοδος της βιομηχανίας.

7. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗ

Η ηλεκτρομαγνητική θωράκιση είναι κύρια μέθοδος επίτευξης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε μία μηχανή, συγκρότημα μηχανών ή εξάρτημα μηχανής, τα οποία είναι ευαίσθητα στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Επίσης, έχει εφαρμογές στην απομόνωση χώρου από ηλεκτρομαγνητικά πεδία για λόγους όπως η άρση της έκθεσης σε άνθρωπο, η φραγή τηλεπικοινωνιών και η κατασκευή ανηχοϊκού θαλάμου μετρήσεων ακτινοβολίας.

7.1. Εισαγωγή

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται θεωρητικά σε όλα τα μέσα της φύσης. Όταν η κατεύθυνσή του το οδηγεί από ένα μέσο προς σε ένα άλλο, στο σύνορο της αλλαγής, συμβαίνει ένας συνδυασμός από τα επόμενα αποτελέσματα: ανάκλαση, μετάδοση και διάθλαση. Η ανάκλαση σημαίνει ότι παράγεται κύμα διαφορετικής κατεύθυνσης που δεν διαπερνά το σύνορο και ξεκινά να διαδίδεται στο ίδιο μέσο. Η νέα κατεύθυνση εξαρτάται από την αρχική και την επιφάνεια του συνόρου. Οι πολλαπλές ανακλάσεις ονομάζονται διάθλαση. Η μετάδοση είναι η μεταφορά του κύματος στο δεύτερο μέσο με την ίδια κατεύθυνση και η διάθλαση, η μεταφορά του κύματος στο δεύτερο μέσο με διαφορετική κατεύθυνση. Συχνά, η μετάδοση περιλαμβάνει και την διάθλαση. Όμως, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης με την ύλη και μεταφοράς ενέργειας, στα οποία έγινε αναφορά πρωτύτερα, κάνουν το κύμα να εξασθενεί με διαφορετικό ρυθμό σε διαφορετικά μέσα. Όταν ένα κύμα μεταδίδεται σε ένα μέσον και χάνει μέρος της ενέργειάς του, το φαινόμενο ονομάζεται απορρόφηση. Στην απορρόφηση συμβάλει επίσης η περίπτωση των εσωτερικών ανακλάσεων στα σύνορα ενός μέσου, στο οποίο ένα κύμα έχει μεταδοθεί, με αποτέλεσμα να παραμείνει στο μέσον και να εξασθενήσει περισσότερο.

Στην πράξη, τα υλικά με διαφορετικά δομικά χαρακτηριστικά, έχουν διαφορετική απόκριση ως μέσα διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τρείς χαρακτηριστικές συμπεριφορές καθορίζουν τη σημασία των υλικών για την ηλεκτρομαγνητική θωράκιση: Πρώτον, σε ποιο βαθμό εμποδίζουν τη διέλευση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δεύτερον, σε ποια εύρη ζώνης συμβαίνει και, τρίτον, το αν τα ανακλούν ή τα απορροφούν.

Η αγωγιμότητα έχει μεγάλη σημασία στην θωράκιση, επειδή σχετίζεται με την ύπαρξη ελεύθερων ηλεκτρονίων, με τα οποία αλληλεπιδρά η ακτινοβολία. Οι συχνότητες της ακτινοβολίας η οποία επηρεάζεται, εξαρτώνται από τη σχέση του μήκους των κενών διαστημάτων και των ατελειών του υλικού με τα μήκη κύματος. Τα χαρακτηριστικά των υλικών που καθορίζουν το βαθμό της ανάκλασης που προκαλούν, περιλαμβάνουν την τραχύτητα της επιφάνειάς τους, την αγωγιμότητα και τη μαγνητική συμπεριφορά. Συνήθη είδη υλικών θωράκισης είναι τα μέταλλα, οι άνθρακες, τα κεραμικά, το τσιμέντο και τα αγώγιμα πολυμερή. Φυσικά, σε πρακτικές εφαρμογές, η επίδοση μιας θωράκισης αυξάνεται με το πάχος της και η δόμηση μιας επιφάνειας θωράκισης μπορεί να τροποποιηθεί

περαιτέρω στο μακροσκοπικό επίπεδο, όπως με τον σχηματισμό αλυσιδωτών μοτίβων ή παρατάξεις κώνων, οι οποίες περιπτώσεις δεν αφορούν πλέον μόνο υλικό, αλλά κατασκευή. Επιπλέον, συνηθίζεται να συνδυάζονται στρώματα διαφορετικών υλικών. [42], [43].

7.2. Εφαρμογές

Κύριος στόχος της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης είναι να εμποδίζει τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων δια μέσου της, από κύματα που προσπίπτουν σε αυτήν, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Εφαρμόζεται περικλείοντας και απομονώνοντας έναν χώρο, έτσι ώστε είτε να συγκρατεί την εξάπλωση ανεπιθύμητης εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από το εσωτερικό του, είτε να φράζει τη λήψη εξωτερικών ανεπιθύμητων κυμάτων από το εσωτερικό του. Δηλαδή, λειτουργεί ως φίλτρο συχνοτήτων, επιτρέποντας ορισμένες μεταδόσεις και απορρίπτοντας άλλες, με κριτήριο τη συχνότητα. Οι τρόποι με τους οποίους η θωράκιση εμποδίζει τη μετάδοση είναι με ανάκλαση και με απορρόφηση.

Στην τεχνολογία, η θωράκιση εφαρμόζεται κυρίως για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ως η συχνότερη και ευκολότερη μέθοδός της. Χρησιμοποιείται σε όλα τα ηλεκτρονικά κυκλώματα για την απομόνωση των τμημάτων τους και την αποφυγή βλαβερών εσωτερικών παρεμβολών στη λειτουργία ή θορύβου σε σήματα. Τοποθετείται σε περιβλήματα ηλεκτρικών συσκευών, ή συσκευών με ηλεκτρονικά μέρη και ηλεκτρονικό εξοπλισμό κάθε είδους, για την ενεργητική αποχή τους από παρεμβολή και την ηλεκτρομαγνητική ατρωσία. Ένα απλό παράδειγμα της χρήσης της είναι το περίβλημα του φούρνου μικροκυμάτων. Εκεί συνήθως εμφανίζεται ως πυκνός κλωβός Faraday με παραλληλεπίπεδο σχήμα σε πέντε πλευρές και συμπληρώνεται ως πολλαπλή επένδυση διάφανούς πολυμερούς και αλυσιδωτού πλέγματος στην πλευρά της θύρας. Επίσης είναι ικανή να εφαρμοστεί ως συχνοτικό φίλτρο σε πομπούς ασύρματης τηλεπικοινωνίας για την εξουδετέρωση αρμονικών συνιστωσών ακτινοβολίας και σε δέκτες για την καταπολέμηση θορύβου. Κάποιες επιπλέον ειδικευμένες χρήσεις της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης περιλαμβάνουν την αποφυγή ανίχνευσης αεροσκαφών, μέσω της φραγής του ραδιοεντοπισμού, με την ενσωμάτωση αντι-ανακλαστικής απορροφητικής θωράκισης στα τοιχώματά τους, την εφαρμογή σε δομικά υλικά για την αποφυγή ανθρώπινης έκθεσης και την κατασκευή απομονωμένων θαλάμων ηλεκτρομαγνητικής ησυχίας για την πραγματοποίηση ακριβών μετρήσεων, δηλαδή την κατασκευή ανηχοϊκών θαλάμων.

Η ηλεκτρομαγνητική θωράκιση συνήθως αξιολογείται με το μέγεθος της αποτελεσματικότητας θωράκισης (Shielding Effectiveness, SE) που αφορά την μείωση στις εντάσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου που προκαλεί μία ασπίδα. Όμως, στην παρούσα εργασία, θα εξηγηθεί, μετρηθεί και αξιολογηθεί από το ισοδύναμο μέγεθος της εξασθένισης μετάδοσης (Transmission Attenuation, TA), που αφορά τη μείωση της ισχύος. Η γενική μεθοδολογία αξιολόγησης ηλεκτρομαγνητικής ασπίδας που χρησιμοποιείται στις πρακτικές μεθόδους της εργασίας, περιγράφεται θεωρητικά στο κεφάλαιο 8, το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την αυτοματοποίηση των μεθόδων περιγράφεται στο κεφάλαιο 9 και η διεξαγωγή των πειραμάτων περιγράφεται στο κεφάλαιο 10.

8. ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η περιγραφή της θεωρητικής μεθοδολογίας της εργασίας για τον χαρακτηρισμό ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης γενικά και σε περιβάλλον εκπομπής-λήψης και τη μελέτη της γεωμετρίας της και της ικανότητάς της να μεταβάλλει τα επιλεγμένα μεγέθη μέτρησης της ακτινοβολίας, με σκοπό την εξαγωγή συμπεράσματος για το υλικό κατασκευής της. Η θωράκιση αξιολογείται ως προς την ικανότητα μετάδοσης και, συμπληρωματικά, τις ικανότητες ανάκλασης και απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στο κεφάλαιο 10, η θεωρία εφαρμόζεται εν μέρει σε τρείς πρακτικές μεθόδους και δοκιμάζεται πειραματικά.

8.1. Εξασθένηση μετάδοσης

Στην παρούσα εργασία, η αποτελεσματικότητα μίας ηλεκτρομαγνητικής ασπίδας αξιολογήθηκε από το μέγεθος της ηλεκτρομαγνητικής εξασθένησης μετάδοσης της ή «transmission attenuation», $\mathrm{TA_s(f)}$. Πρόκειται για ένα απλό μέγεθος που περιέχει την ουσία της έννοιας της ΗΜ θωράκισης. Εκφράζει τον διαιρέτη της ισχύος της ακτινοβολίας που διαπερνάει την ασπίδα, τον οποίο επιβάλει η ασπίδα ή αλλιώς πόσες φορές μειώνεται η ισχύς ακτινοβολίας κατά την μετάδοσή της στην ασπίδα.

Η εξασθένηση μετάδοσης είναι χαρακτηριστικό της ίδιας της ασπίδας s και διαφέρει από ασπίδα σε ασπίδα. Επίσης, εξαρτάται από τη συχνότητα f της ακτινοβολίας. Μία ασπίδα εξασθενεί κύματα μιας συγκεκριμένης συχνότητας περισσότερο από κύματα μιας διαφορετικής συχνότητας. Έτσι, η εξασθένηση μελετάται στο πεδίο των συχνοτήτων.

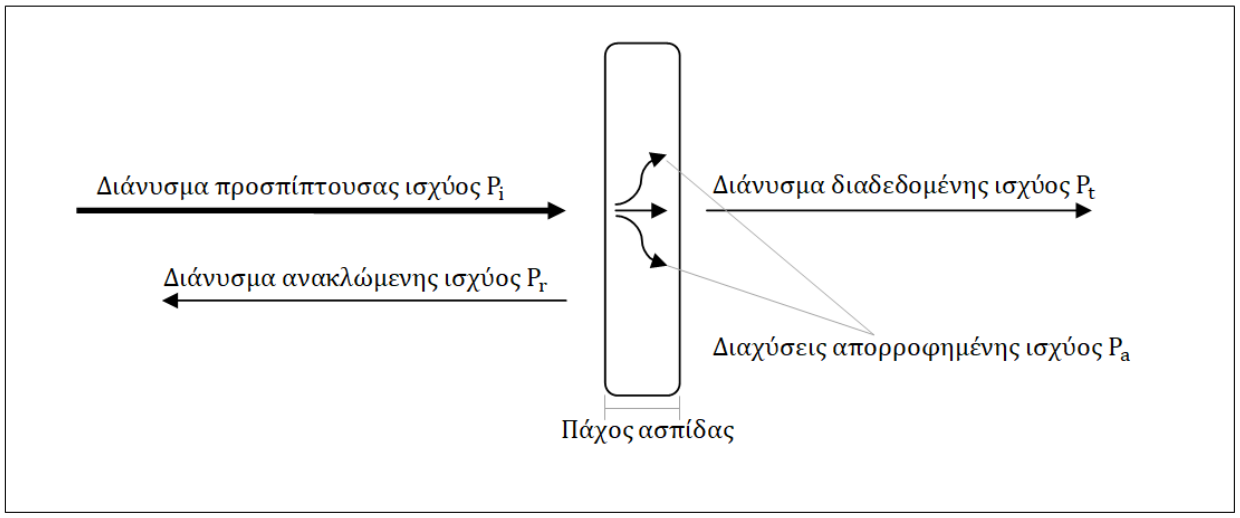
Η $\mathrm{TA_s}$ υπολογίζεται από τη σύγκριση της ισχύος $\mathrm{P_i}$ που μεταφέρει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που προσπίπτει στην επιφάνεια της ασπίδας με την ισχύ $\mathrm{P_t}$ του ασθενέστερου κύματος που τη διαπερνά, όπως φαίνεται στην εξίσωση (8.2). Η υπόλοιπη από την ισχύ $\mathrm{P_i}$ ανήκει στο κύμα που ανακλάται ως $\mathrm{P_r}$ ή στο κύμα που απορροφάται ως $\mathrm{P_a}$. Ένα μέρος των $\mathrm{P_r}$ και $\mathrm{P_t}$ προέρχονται από πολλαπλές ανακλάσεις του κύματος στα εσωτερικά τοιχώματα της ασπίδας. Η ΗΜ ακτινοβολία διαχωρίζεται από την συχνότητά της και έτσι οι διάφορες ανακλάσεις με ίδια συχνότητα θεωρούνται μονάδα. Η θεωρία της εργασίας τις κατανέμει μόνο στις αναφερθείσες τρεις κατηγορίες.

Για την απεικόνιση της κατανομής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε τμήματα μετά την πρόσπτωσή της σε θωράκιση, θα οριστεί ένα διανυσματικό μέγεθος. Έστω ένα αρμονικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας f που διαδίδεται στο χώρο. Το σημείο εφαρμογής του διανύσματος θα είναι ένα επιλεγμένο σημείο του χώρου πάνω στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Ομοίως με το διάνυσμα Poynting, το νέο διάνυσμα θα έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας του κύματος. Το μέτρο του θα εκφράζει το στιγμιαίο ρυθμό μεταβολής της μεταφερόμενης ενέργειας από το κύμα στο σημείο του χώρου. Θα σχετίζεται δηλαδή με το μέγιστο του διανύσματος Poynting και δεν θα μεταβάλλεται περιοδικά αλλά θα είναι θεωρητικά σταθερό στο χρόνο. Το διάνυσμα θα αναφέρεται στο

κεφάλαιο αυτό ανεπίσημα ως διάνυσμα ισχύος. Ταυτόχρονα, ο πραγματικός μονόμετρος ορισμός της ισχύος θα χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει το μέτρο του.

Εφαρμόζοντας το διάνυσμα σε σημείο της εξωτερικής επιφάνειας ασπίδας, στο οποίο προσπίπτει το κύμα, θα σχηματιστούν συνιστώσες του κατά μήκος των φορών των ανακλάσεων του κύματος, οι οποίες απεικονίζονται απλοποιημένες, σε δύο διαστάσεις, στο σχήμα 8.1.

Σχήμα 8.1: Διανυσματική κατανομή της ισχύος προσπίπτοντος κύματος σε ΗΜ ασπίδα



$$P_i = P_t + P_r + P_a \tag{8.1}$$

Οι ισχύεις είναι εκφρασμένες σε απόλυτες μονάδες.

$$TA_s(f) = 10\log\frac{P_i(f)}{P_t(f)} = -10\log\frac{P_t(f)}{P_i(f)} \tag{8.2}$$

$TA_s(f)$ σε dB. $P_t(f)$ και $P_i(f)$ σε απόλυτες μονάδες.

8.2. Παράμετροι σκέδασης

Οι παράμετροι σκέδασης χαρακτηρίζουν με διάφορους τρόπους τη συμπεριφορά ενός συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων. Ως σύστημα εδώ θεωρείται κάθε μέσο με είσοδο και έξοδο, το οποίο εισάγει ένα μέγεθος και το εξάγει μεταβλημένο. Ο όρος «συμπεριφορά» σημαίνει τον τρόπο που το σύστημα μεταβάλλει ένα μέγεθος. Η συμπεριφορά ενός συστήματος εκπομπής-λήψης ηλεκτρομαγνητικών

σημάτων συχνά εξαρτάται από τη συχνότητά τους. Με σκοπό να την προσδιορίσουν, οι παράμετροι σκέδασης, σε αυτή την περίπτωση, συγκρίνουν την ισχύ ή την τάση των σημάτων στην εκπομπή με την ισχύ ή την τάση των σημάτων στην λήψη, ως συνάρτηση της ανεξάρτητης συχνότητας.

Έστω το σύστημα της συσκευής ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης του σχήματος 8.1. Θεωρείται η αριστερή επιφάνεια της ασπίδας ως είσοδος και συμβολίζεται με 1 και η δεξιά επιφάνεια της ασπίδας ως έξοδος και συμβολίζεται με 2. Τότε, μία έκφραση των πρώτων δύο βασικών παραμέτρων σκέδασης του συστήματος, ως προς τα μέτρα, σε απόλυτες μονάδες, των συνιστωσών του διανύσματος της ισχύος προσπίπτοντος κύματος με συχνότητα f, παρουσιάζεται παρακάτω. Η μονάδα μέτρησης των παραμέτρων είναι τα decibel. [44].

$$S_{11}(f) = 10 \log \frac{P_r(f)}{P_i(f)} \tag{8.3}$$

$$S_{21}(f) = 10 \log \frac{P_t(f)}{P_i(f)} \tag{8.4}$$

Θεωρούνται, επιπλέον, ένα αντίθετο κύμα που προσπίπτει στην έξοδο 2 με ισχύ $P_{i2}(f)$ και τα παραγόμενα ανακλώμενο στην έξοδο 2 και διαδεδομένο από την είσοδο 1 κύματα με ισχύεις $P_{r2}(f)$ και $P_{t2}(f)$. Οι υπόλοιπες βασικές παράμετροι σκέδασης του συστήματος είναι οι εξής:

$$S_{12}(f) = 10 \log \frac{P_{r2}(f)}{P_{i2}(f)} \tag{8.5}$$

$$S_{22}(f) = 10 \log \frac{P_{t2}(f)}{P_{i2}(f)} \tag{8.6}$$

Η παράμετρος S_{11}, ή αλλιώς συντελεστής ανάκλασης, εκφράζει το σχετικό μερίδιο της ισχύος του προσπίπτοντος κύματος που ανήκει στη συνιστώσα που ανακλάται στην ασπίδα.

Η παράμετρος S_{21}, ή αλλιώς συντελεστής διάδοσης, εκφράζει το σχετικό μερίδιο της ισχύος του προσπίπτοντος κύματος που ανήκει στη συνιστώσα που διαπέρασε την ασπίδα. Αλλιώς, το κέρδος της μετάδοσης στην ασπίδα.

Οι παράμετροι S_{22} και S_{12} εκφράζουν τα αντίστοιχα μεγέθη που αφορούν το προσπίπτον κύμα στην έξοδο του συστήματος.

Παρατηρείται επίσης, από τις σχέσεις (8.2) και (8.4), ότι η εξασθένηση μετάδοσης μιας ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης ταυτίζεται με την αντίθετη παράμετρο S_{21}της ίδιας θωράκισης.

$$TA_s(f) = -S_{21s}(f) \tag{8.7}$$

Οι παράμετροι σκέδασης ονομάζονται επίσης «παράμετροι S», από την διεθνή ονομασία «scattering parameters». Επίσης, οι τέσσερεις παράμετροι που μελετήθηκαν παραπάνω έχουν, στο υπό μελέτη θεωρητικό σύστημα, πάντα αρνητικές τιμές, επειδή κάθε παραγόμενο κύμα από την πρόσπτωση είναι ασθενέστερο του αρχικού και έτσι κάθε μία από τις συνιστώσες του ορισμένου διανύσματος ισχύος είναι μικρότερη από την αρχική συνισταμένη τους.

8.3. Εξασθενήσεις ανάκλασης και απορρόφησης

Σε κάποιες περιπτώσεις, είναι σημαντικό το πώς μία ασπίδα αποτρέπει τη διέλευση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αν δηλαδή την ανακλά ή την απορροφά. Επομένως, μετρούνται δύο ακόμη παράμετροι της ασπίδας, η εξασθένηση ανάκλασης $RA_s(f)$ και η εξασθένηση απορρόφησης $AA_s(f)$, για να καθοριστεί η μεταβολή που προκαλεί η ανάκλαση και η απορρόφηση στο μέγεθος της σημειακής ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τα δύο μεγέθη δεν εκφράζουν τα τμήματα της ισχύος που ανακλάται ή απορροφάται. Οι εξισώσεις που ακολουθούν έχουν βάση το σύστημα της συσκευής ΗΜ θωράκισης του σχήματος 8.1 και οι ισχύεις μετριούνται σε απόλυτες μονάδες.

$$RA_s(f) = 10\log\frac{P_i(f)}{P_i(f) - P_r(f)} \tag{8.8}$$

$$AA_s(f) = 10\log\frac{P_i(f) - P_r(f)}{P_t(f)} \tag{8.9}$$

Αναλυτικά, η $\mathrm{RA_s(f)}$ ισούται με το λόγο της ισχύος του προσπίπτοντος κύματος δια την ισχύ της συνιστώσας του που δεν ανακλάστηκε. Εκφράζει τον διαιρέτη ή το πόσες φορές μειώνεται η ισχύς ενός κύματος κατά την είσοδο του στην ασπίδα, λόγω ανάκλασης.

Η $\mathrm{AA_s(f)}$ ισούται με το λόγο της ισχύος της συνιστώσας που δεν ανακλάστηκε δια την συνιστώσα που εξήλθε από την έξοδο της ασπίδας. Εκφράζει τον διαιρέτη ή το πόσες φορές μειώνεται η ισχύς ενός κύματος κατά την παραμονή του στην ασπίδα, λόγω απορρόφησης.

Οι εξασθενήσεις ανάκλασης και απορρόφησης είναι συνιστώσες της εξασθένησης μετάδοσης, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (8.2), (8.8) και (8.9) στην εξίσωση (8.10).

$$\mathrm{RA_s(f)} + \mathrm{AA_s(f)} = \mathrm{TA_s(f)} \tag{8.10}$$

Επίσης, υπολογίζονται από τις παραμέτρους $\mathrm{S_{11}}$και $\mathrm{S_{21}}$, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (8.3), (8.4), (8.8) και (8.9) στις εξισώσεις (8.11) και (8.12). [45].

$$\mathrm{RA_s(f)} = -10\log\left(1 - 10^{\frac{\mathrm{S_{11}(f)}}{10}}\right) \tag{8.11}$$

$$\mathrm{AA_s(f)} = -10\log\left(\frac{10^{\frac{\mathrm{S_{21}(f)}}{10}}}{1 - 10^{\frac{\mathrm{S_{11}(f)}}{10}}}\right) \tag{8.12}$$

8.4. Πειραματική μέθοδος απομόνωσης ασπίδας

Ο καθορισμός των χαρακτηριστικών μιας ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης, τα οποία περιγράφηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, τυποποιήθηκε πειραματικά στην παρούσα εργασία. Έτσι, χρειάστηκε να ληφθούν υπ' όψη κάποιοι παράγοντες μέτρησης. Πρώτον, το γεγονός ότι το πειραματικό σύστημα μετρήσεων δεν είναι εντός των ορίων της αξιολογούμενης ασπίδας, αλλά εντός των ορίων μιας διάταξης εκπομπής-λήψης ακτινοβολίας που εμπεριέχει την ασπίδα. Το σύστημα αξιολόγησης περιορίζεται ύστερα στα όρια της ασπίδας, εξουδετερώνοντας αριθμητικά τα χαρακτηριστικά του που δεν οφείλονται στην ασπίδα. Ύστερα, χρειάζεται η προσαρμογή της γεωμετρίας του συστήματος 8.1 στις τρεις διαστάσεις του πειραματικού χώρου και άλλα.

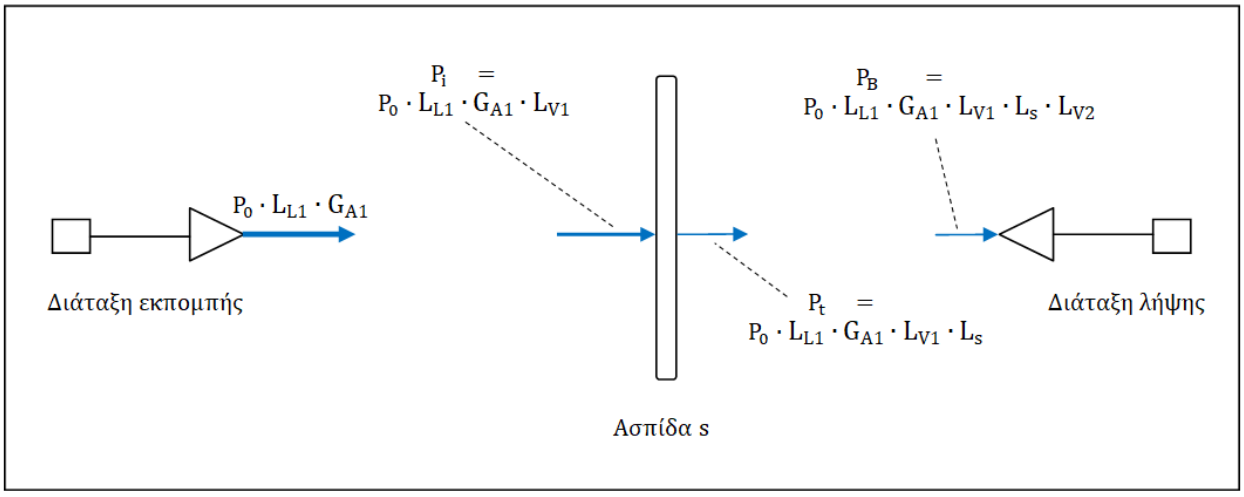
Το πειραματικό σύστημα μέτρησης αξιολόγησης θωράκισης διαφέρει από πείραμα σε πείραμα. Ωστόσο, ουσιαστικά αποτελείται κοινώς από μία πηγή ΗΜ ακτινοβολίας, μία ζεύξη εκπομπής, μία κεραία εκπομπής, μία ασπίδα που θεωρείται ως συσκευή με είσοδο και έξοδο και μεσολαβεί στη διάδοση, μία κεραία λήψης, μία ζεύξη λήψης και έναν δέκτη.

Έστω ότι ο πομπός παράγει ΗΜ κύμα με απόλυτη ισχύ P_0. Διαδιδόμενο στο παραπάνω σύστημα εκπομπής - λήψης, θα υποστεί μια σειρά από ακούσιες μειώσεις στην ισχύ λόγω φυσικών περιορισμών, μία εκούσια μείωση κατά την μετάδοση στην ασπίδα και αυξήσεις λόγω μετάδοσης σε συσκευές ενίσχυσης. Συμβατικά, οι μεταβολές στην ισχύ ακτινοβολίας κατά τη διάδοση περιγράφονται ως κλιμακώσεις, επειδή η απόλυτες τιμές τους δεν έχουν χρησιμότητα. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς της ζητούμενης διάταξης, θα θεωρηθεί ένα ισοζύγιο ισχύος ζεύξεως (link budget) σύμφωνα με το οποίο, κάθε τμήμα της πορείας διάδοσης θα εφαρμόζει ένα συντελεστή κλιμάκωσης στην ισχύ.

Μετά τον πομπό, η πορεία ακολουθεί τη ζεύξη εκπομπής, το ενσύρματο μέρος της εκπομπής, που αποτελείται από καλώδια και συνδετήρες και ενώνει τον πομπό με την κεραία εκπομπής. Όλες οι απώλειες του τμήματος αυτού, συμπεριλαμβανομένων τυχόντων απωλειών αποπροσαρμογής αντιστάσεων και στα δύο άκρα του, θα ομαδοποιηθούν ως συντελεστής L_{L1}. Το κέρδος ισχύος από την κεραία εκπομπής που έπεται θα συμβολιστεί ως G_{A1}. Ο ατμοσφαιρικός χώρος που μεσολαβεί από την κεραία εκπομπής έως το σημείο πρόσπτωσης στην ασπίδα προκαλεί υποθετική απώλεια L_{V1}. Η εκούσια απώλεια που προκαλεί η ασπίδα είναι L_s. Από το σημείο εξόδου από τη ασπίδα έως την κεραία λήψης, η υποθετική απώλεια αναφέρεται ως L_{V2}. Το κέρδος της κεραίας λήψης είναι G_{A2} και οι απώλειες της ζεύξης λήψης είναι L_{L1}.

Το απλοποιημένο και δισδιάστατο σχήμα 8.2 αναπαριστά τα απόλυτα μέτρα του διανύσματος ισχύος, που ορίστηκε στην αρχή του κεφαλαίου, το οποίο εφαρμόζεται σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα σε τέσσερα σημεία, όπως αυτό διαδίδεται στο σύστημα.

Σχήμα 8.2: Απώλειες και κέρδη ισχύος διάδοσης στο πειραματικό σύστημα μετρήσεων Β με χρήση ορισμένου διανυσματικού μεγέθους

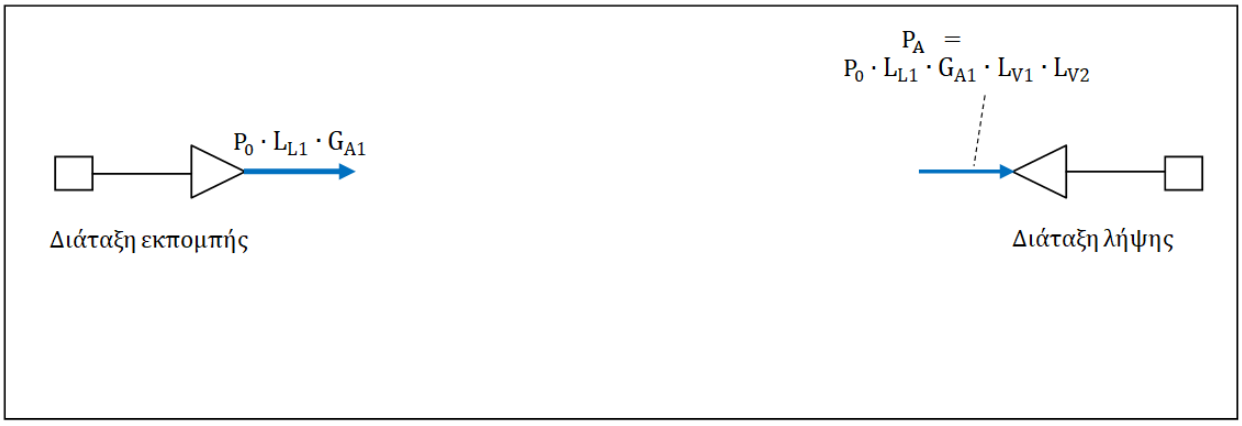


Η ζητούμενη εξασθένηση μετάδοσης TA_s της παραπάνω ασπίδας s του συστήματος, εκ του ορισμού (8.2), υπολογίζεται ως εξής.

$$TA_s = 10\log\frac{P_i}{P_t} = 10\log\frac{P_0 \cdot L_{L1} \cdot G_{A1} \cdot L_{V1}}{P_0 \cdot L_{L1} \cdot G_{A1} \cdot L_{V1} \cdot L_s} = -10\log L_s \quad (8.13)$$

Όλες οι ακούσιες απώλειες καθώς και τα κέρδη των ενισχυτών είναι σταθερά στα κύματα ίδιας συχνότητας και ανεξάρτητα από την μεσολάβηση ή όχι της ασπίδας. Είναι εξαρτημένα από τα χαρακτηριστικά των επιμέρους εξαρτημάτων του υπόλοιπου συστήματος. Συχνά, τα εξαρτήματα είναι σχεδιασμένα για να διευκολύνουν τη διάδοση κυμάτων σε συγκεκριμένα τμήματα του φάσματος ενώ οι φυσικοί περιορισμοί τα αναισθητοποιούν στα υπόλοιπα. Δεδομένης λοιπόν της απουσίας της ασπίδας από το προηγούμενο σύστημα, η απόλυτη ισχύς με αρχική τιμή P_0 διαδιδόμενου κύματος απεικονίζεται σε δύο σημεία της φοράς του στο σχήμα 8.3, ως μέτρο του ορισμένου διανύσματος. Έστω ότι το πειραματικό σύστημα από τον πομπό έως την κεραία λήψης με την προσθήκη της ασπίδας είναι το B και το ίδιο σύστημα χωρίς την προσθήκη είναι το A.

Σχήμα 8.3: Απώλειες και κέρδη ισχύος διάδοσης στο πειραματικό σύστημα μετρήσεων A με χρήση ορισμένου διανυσματικού μεγέθους



Ο διαχωρισμός των δύο συστημάτων θα επιτρέψει την εξουδετέρωση των ανεπιθύμητων στοιχείων. Συγκεκριμένα, θα μετρηθεί πρώτα η ισχύς P_A λαμβανόμενης ακτινοβολίας, αφού διαδοθεί από το σύστημα A, σχετική σε dBm, και έπειτα η ισχύς P_B όμοιας ακτινοβολίας διαδεδομένης από το σύστημα B, σχετική σε dBm. Το μέγεθος που θα προκύψει από την σύγκριση των δύο ισχύων, σύμφωνα με την εξίσωση (8.14), ισούται με την εξασθένηση μετάδοσης TA_s της ασπίδας s του συστήματος B, σύμφωνα με την εξίσωση (8.13).

$$\mathrm{TA_s(dB)} = \mathrm{P_A(dBm)} - \mathrm{P_B(dBm)} = 10\log\frac{\mathrm{P_0}\cdot\mathrm{L_{L1}}\cdot\mathrm{G_{A1}}\cdot\mathrm{L_{V1}}\cdot\mathrm{L_{V2}}}{\mathrm{P_0}\cdot\mathrm{L_{L1}}\cdot\mathrm{G_{A1}}\cdot\mathrm{L_{V1}}\cdot\mathrm{L_s}\cdot\mathrm{L_{V2}}} = -10\log\mathrm{L_s} \quad (8.14)$$

Έστω ότι τα δύο συστήματα A και B επεκτείνονται ώστε να περιλαμβάνουν όλα τα μέσα από τους πομπούς έως τους δέκτες. Τα δύο νέα συστήματα ονομάζονται A' και B'. Έτσι, η ισχύς του κύματος που φτάνει στον δέκτη του κάθε συστήματος, $\mathrm{P_{A'}}$ ή $\mathrm{P_{B'}}$ αντίστοιχα, είναι η ισχύς της κεραίας λήψης, $\mathrm{P_A}$ ή $\mathrm{P_B}$ αντίστοιχα, πολλαπλασιασμένη με τους συντελεστές $\mathrm{G_{A2}}$ και $\mathrm{L_{L2}}$ της διάταξης λήψης.

Η εύρεση της εξασθένισης μετάδοσης της ασπίδας επιτυγχάνεται επίσης με μέτρηση των παραμέτρων σκέδασης $\mathrm{S_{21}}$ των συστημάτων A' και B'. Ο ορισμός (8.4) παράγει δύο λόγους, $\mathrm{S_{21A'}}$ και $\mathrm{S_{21B'}}$. Σύμφωνα με την εξίσωση (8.15), το συμπλήρωμα του δεύτερου από τον πρώτο ανάγεται στην εξίσωση (8.14) και ισούται με την $\mathrm{TA_s}$.

$$\mathrm{S_{21A'}} - \mathrm{S_{21B'}} = 10\log\frac{\mathrm{P_{A'}}}{\mathrm{P_0}} - 10\log\frac{\mathrm{P_{B'}}}{\mathrm{P_0}} = \mathrm{P_A(dBm)} - \mathrm{P_B(dBm)} - 10\log\frac{\mathrm{G_{A1}}\cdot\mathrm{L_{L1}}}{\mathrm{G_{A1}}\cdot\mathrm{L_{L1}}} = \mathrm{TA_s} \quad (8.15)$$

Άλλοι παράγοντες που ελέγχονται για την επιλογή της πειραματικής μεθόδου είναι η γεωμετρία των τριών διαστάσεων του πειραματικού συστήματος εκπομπής-λήψης, τα όργανα μέτρησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η επιλογή του εύρους ζώνης, τα φαινόμενα ανάκλασης, διάχυσης και απορρόφησης, η αυτοματοποίηση, η ακρίβεια, η γενικότητα και η προσαρμοστικότητα της μεθόδου. Για παράδειγμα, αντί για σημεία, υπάρχουν επιφάνειες, οπότε πρέπει να βεβαιώνεται πως η θωράκιση προς αξιολόγηση μεσολαβεί σε όλες τις πιθανές οδούς μεταξύ εκπομπής και λήψης. Επίσης, η μέθοδος πρέπει να είναι πρακτική και αντιπροσωπευτική των εφαρμογών της θωράκισης. Κάποια από τα παραπάνω θα αναλυθούν στη συνέχεια, όπου γίνεται η επόμενη πιο πρακτική προσέγγιση του προβλήματος.

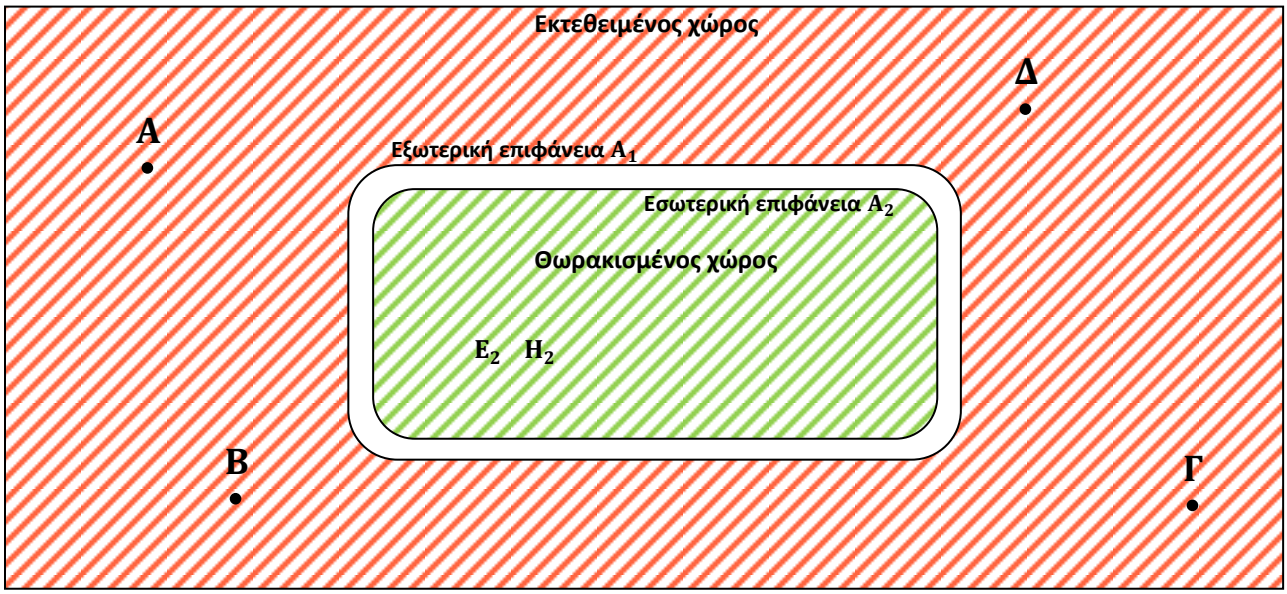
8.5. Μέτρηση συνεισφοράς ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης

Στην παράγραφο 5.3 περιγράφηκε μια απλή μέθοδος πρακτικής μέτρησης τριών φυσικών μεγεθών για τον χαρακτηρισμό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας: της πυκνότητας ισχύος, της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύθηκε θεωρητικά το πώς μια θωράκιση μπορεί να εξεταστεί ως προς το βαθμό που αποσβεννύει την ισχύ διαδιδόμενων κυμάτων και προσδιορίστηκε η εξασθένιση μετάδοσης ΤΑ που είναι σταθερό χαρακτηριστικό της. Εδώ θα επαληθευτεί η συμφωνία των δύο μεθόδων και θα συμπληρωθεί το πώς υπολογίζεται η μεταβολή που προκαλεί η παρουσία μιας κλειστής θωράκισης στα τρία βασικά μεγέθη ενός περιβάλλοντος που περικλείει.

Έστω ένας θωρακισμένος θάλαμος ο οποίος έχει ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο σχήμα με στρογγυλεμένα άκρα. Το σχήμα 8.4 είναι μια δισδιάστατη απεικόνισή της τομής του. Οι διαστάσεις του είναι απροσδιόριστες όπως και το αν πρόκειται, παραδείγματος χάριν, για κάλυμμα μικροσκοπικού ηλεκτρονικού κυκλώματος, περίβλημα φορητής συσκευής ή δωμάτιο. Το τοίχωμά του είναι κλειστό και φτιαγμένο από υλικό m και έχει πάχος w. Ο θάλαμος βρίσκεται σε περιβάλλον διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από διάφορες κατευθύνσεις. Αυτές υποτίθενται άμεσες, ανακλώμενες ή διάχυτες, η ακτινοβολία θεωρείται διαφόρων τάξεων ισχύος, προστιθέμενη από διαφορετικές πηγές, διαφορετικών αποστάσεων. Λόγω της πολυπλοκότητας της κατεύθυνσης και σύνθεσης της ακτινοβολίας, αν υποθέσουμε τυχαία σημεία Α, Β, Γ και Δ του εξωτερικού χώρου, οι εντάσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου Ε και Η θα είναι διαφορετικές σε κάθε ένα από αυτά.

Η εξωτερική επιφάνεια με εμβαδόν A_1 του θαλάμου, λειτουργεί ενεργά στην συσσώρευση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από όλες τις ακτίνες που εμποδίζει. Έστω ότι η ισχύς που δέχεται συνολικά είναι P_1, η εξασθένιση μετάδοσης του θαλάμου είναι TA_c και η ισχύς που διαπερνά στην εσωτερική επιφάνεια με εμβαδόν A_2 είναι P_2, εκφρασμένες σε λογαριθμική κλίμακα.

Σχήμα 8.4: Δισδιάστατη απεικόνιση περιβάλλοντος ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένου θαλάμου



Για τη πειραματική μέτρηση της εξασθένισης μετάδοσης του θαλάμου, η μέθοδος υπολογισμού της από την παράγραφο 8.4 θα ελεγχθεί από την μέθοδο μέτρησης ακτινοβολίας της παραγράφου 5.3. Αρχικά, θεωρείται ότι ο θάλαμος είναι αρκετά μεγάλος για να χωρέσει μια κεραία λήψης των επιθυμητών μηκών κύματος. Υπενθυμίζεται ότι το ελάχιστο δυνατό μέγεθος της κατάλληλης κεραίας αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με τη συχνότητα και μπορεί να φτάσει για παράδειγμα την τάξη των χιλιοστών του μέτρου. Πρώτον, εντός του θαλάμου τοποθετείται η ισοτροπική κεραία λήψης η οποία συνδέεται μέσω ζεύξης που διαπερνά το θάλαμο, χωρίς να αφήνει άνοιγμα, με αναλυτή φάσματος που βρίσκεται στο εξωτερικό του. Αφού πραγματοποιηθεί η ανίχνευση που περιγράφηκε στο 5.3, το όργανο θα εξάγει την ισχύ εξόδου $\mathrm{P_{out,2}(f)}$ για το διάστημα τιμών συχνότητας f που έχει επιλεχθεί. Δεύτερον, ο θάλαμος αφαιρείται από το χώρο και η κεραία λήψης τοποθετείται στην ίδια θέση με πριν. Μετά από επανάληψη της ανίχνευσης, το όργανο θα εξάγει την ισχύ εξόδου $\mathrm{P_{out,1}(f)}$.

Έστω $\mathrm{P_{in,2}}$ η ισχύς λήψης που δέχτηκε η ενεργή επιφάνεια της κεραίας κατά την ανίχνευση εντός του θαλάμου και $\mathrm{P_{in,1}}$ η αντίστοιχη ισχύς λήψης χωρίς το θάλαμο. Κάθε μία ισούται με το άθροισμα της ισχύος εξόδου, του διορθωτικού παράγοντα και των δύο παραγόντων ενίσχυσης της αντίστοιχης ανίχνευσης, σύμφωνα με την εξίσωση (5.6). Κατά τις δύο ανιχνεύσεις που πραγματοποιήθηκαν ίσχυαν τα εξής: η διάταξη λήψης ήταν η ίδια, οι παράγοντες ενίσχυσης των εξαρτημάτων εξαρτώνται μόνο από τη συχνότητα και οι δύο ανιχνεύσεις είχαν ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων του διαστήματος συχνοτήτων και του πλήθους δειγμάτων. Επομένως οι τρείς παράγοντες είναι σταθεροί και δεν χρειάζεται να μετρηθούν. Έτσι, η διαφορά των δύο ισχύων λήψης για οποιαδήποτε κοινή συχνότητα ισούται με τη διαφορά των αντίστοιχων ισχύων εξόδου, όπως αναγράφεται στην επόμενη εξίσωση.

$$\mathrm{P_{in,1} - P_{in,2} = P_{out,1} + C_{scan} + L_c + G_a - P_{out,2} - C_{scan} - L_c - G_a = P_{out,1} - P_{out,2}} \quad \textbf{(8.16)}$$

Σκοπός της δεύτερης μέτρησης, κατά την οποία η κεραία λήψης αντικατέστησε τον θάλαμο, ήταν η λαμβανόμενη ισχύς να είναι αντιπροσωπευτική εκείνης που δέχεται η εξωτερική επιφάνεια του θαλάμου, ενώ η πρώτη μέτρηση αφορούσε την εσωτερική επιφάνεια. Η πανκατευθυντικότητα της κεραίας εξασφαλίζει την λήψη ακτινών από όλες τις κατευθύνσεις. Η κλειστότητα του θαλάμου και η απουσία εσωτερικών πηγών εκπομπής εξασφαλίζουν την ομοιότητα του συστήματος μέτρησης με και χωρίς την προσθήκη του θαλάμου με τα συστήματα των σχημάτων 8.2 και 8.3. Η μόνη ατέλεια είναι η διαφορά εμβαδών ανάμεσα στην ενεργή επιφάνεια της κεραίας και τις αντίστοιχες επιφάνειες του θαλάμου, το οποίο επηρεάζει την ποσότητα ενέργειας που θα δεχθούν στον ίδιο χρόνο. Το σφάλμα που προκύπτει γίνεται όλο και πιο μικρό καθώς το μέγεθος της κεραίας προσεγγίζει το θάλαμο. Στα πειράματα, πρέπει να επιδιώκεται το σφάλμα να είναι αμελητέο, είτε ομοιάζοντας τα μεγέθη, είτε κατευθύνοντας καταλλήλως την ακτινοβολία. Ωστόσο, το σφάλμα θα ληφθεί υπ' όψιν στην γενική περιγραφή. Σύμφωνα λοιπόν με την εξίσωση (8.14), η διαφορά των ισχύων λήψης προσεγγίζει την εξασθένιση μετάδοσης $\mathrm{TA_c}$ του θαλάμου. Επίσης, η $\mathrm{TA_c}$ ισούται εξ ορισμού με τη διαφορά των ισχύων $\mathrm{P_1}$ και $\mathrm{P_2}$ που δέχονται οι επιφάνειες του θαλάμου. Η σχέση των μεγεθών είναι η (8.17).

$$P_{in,1} - P_{in,2} \simeq TA_c = P_1 - P_2 \quad (8.17)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (8.16) και (8.17), προκύπτει τελικά η (8.18), με το ίδιο σφάλμα.

$$P_{out,1} - P_{out,2} \simeq TA_c \quad (8.18)$$

Η ισχύς P_2 δεν περιλαμβάνει εκείνη που απορροφάται στο τοίχωμα του θαλάμου, αλλά μόνο εκείνη που μεταφέρεται από την ακτινοβολία που το διαπερνάει. Αυτή, μπορεί να μην έχει αρχική κατεύθυνση προς την επιφάνεια της κεραίας, αλλά μέσω των στιγμιαίων πολλαπλών εσωτερικών ανακλάσεων μέχρι την απορρόφηση, θα συναντηθούν. Αυτό προϋποθέτει επίσης ότι ο εσωτερικός χώρος είναι κενός εκτός της κεραίας. Έτσι, κατά τη πρώτη μέτρηση, δηλαδή του εσωτερικού χώρου, η λαμβανόμενη ισχύς της κεραίας είναι η ζητούμενη. Οπότε, με αντικατάσταση στην (8.17), ισχύει η (8.19), η οποία αποδίδει το σφάλμα μόνο στην λαμβανόμενη $P_{in,1}$.

$$P_{in,2} = P_2 \Rightarrow P_{in,1} \simeq P_1 \quad (8.19)$$

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια παρένθεση για έναν εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της εξασθένισης μετάδοσης. Μέχρι εδώ χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ο αναλυτής φάσματος, επειδή αυτός επιλέχθηκε για την γενική μέτρηση έκθεσης σε ακτινοβολία. Όμως ο χαρακτηρισμός της θωράκισης είναι μια διαφορετική διαδικασία. Συγκεκριμένα, η TA_c του θαλάμου του προβλήματος μετριέται και με αναλυτή δικτυωμάτων. Αυτή η μέτρηση είναι πολύ πιο ειδικευμένη επειδή αφορά μόνο δοκιμαστικά κύματα και μία κεραία εκπομπής και όχι οποιεσδήποτε πηγές ακτινοβολίας.

Το σύστημα μέτρησης είναι ένα σύστημα πομπού δέκτη, όμοιο με το σύστημα B' της παραγράφου 8.4 όταν περιέχει τον θάλαμο και με το σύστημα A' όταν δεν περιέχει τον θάλαμο. Επίσης, ο αναλυτής δικτυωμάτων είναι ταυτόχρονα και ο πομπός και ο δέκτης και «γνωρίζει» αυτόματα την αρχική ισχύ P_0 και την τελική ισχύ $P_{A'}$ ή $P_{B'}$ στα δύο άκρα των δυο συστημάτων αντίστοιχα. Η ισχύς $P_{A'}$ αντιπροσωπεύει την λαμβανόμενη ισχύ από τα τοιχώματα του θαλάμου, μεταβλημένη από την διάταξη λήψης. Όμως, με χρήση μοναδικής και κατευθυντικής κεραίας εκπομπής και κατεύθυνσή της προς την κεραία λήψης, το μέγεθος της επιφάνειας δεν έχει σημασία και η ισχύς λήψης της κεραίας είναι πρακτικά ίδια με την ισχύ που θα λάμβανε το τοίχωμα. Οπότε το σφάλμα ακυρώνεται.

Το όργανο μετράει διάφορες παραμέτρους συστημάτων με βάση τη σύγκριση ενός μεγέθους στην είσοδο και την έξοδό τους, όπως είναι η ισχύς. Η ζητούμενη παράμετρος είναι η S_{21} και χρειάζονται δύο μετρήσεις, μια σε κάθε σύστημα. Έστω τα αποτελέσματα των μετρήσεων, $S_{21A,out'}$ και $S_{21B,out'}$ σε

dB. Αυτές είναι οι πραγματικές παράμετροι των συστημάτων γιατί δεν περιλαμβάνουν ενισχύσεις, αλλά μόνο τον λόγο ενισχυμένων μεγεθών. Σύμφωνα με την εξίσωση (8.15), η διαφορά τους ισούται με την εξασθένιση του θαλάμου $\mathrm{TA_c}$, όπως σημειώνεται στην εξίσωση (8.20), η οποία ολοκληρώνει την παρένθεση που αφορά την μέτρηση της εξασθένισης με αναλυτή δικτυωμάτων.

$$\mathrm{S_{21A,out'} - S_{21B,out'} = TA_c} \qquad \textbf{(8.20)}$$

Η εξασθένιση του θαλάμου που μετρήθηκε σε αυτό το υποκεφάλαιο ως $\mathrm{TA_c}$ θεωρείται ότι εξαρτάται μόνο από το υλικό m και το πάχος w των τοιχωμάτων του. Έτσι, αν μέρος αυτού του τοιχώματος απομονωθεί και τυλιχθεί σχηματίζοντας μια μικρότερη θωράκιση, εκείνη θα έχει εξασθένιση $\mathrm{TA_c}$. Το ίδιο και αν προστεθεί επιπλέον τοίχωμα στον αρχικό θάλαμο, σχηματίζοντας έναν μεγαλύτερο. Επίσης, η ικανότητα εξασθένισης ενός συσσωματώματος παράλληλων ισοπαχών τοιχωμάτων του ίδιου υλικού χωρίς κενά διαστήματα είναι γραμμικά ανάλογη του πλήθους τους, ενώ η εξασθένιση μίας λεπτότερης στρώσης του τοιχώματος εξαρτάται γραμμικά από το κλάσμα του πάχους της. Επομένως, η εξασθένιση μετάδοσης $\mathrm{TA_s}$ κλειστής θωράκισης s υλικού m και πάχους $\mathrm{w_s}$ βρίσκεται με τη γραμμική παρεμβολή $\mathrm{TA_s = TA_c \cdot (w_s/w)}$.

Έστω λοιπόν ότι η εξασθένιση μετάδοσης $\mathrm{TA_s}$ μίας στρώσης υλικού m είναι γνωστή και ένας χώρος πρόκειται να θωρακιστεί με αυτήν. Τότε, χρειάζεται μόνο μία μέτρηση ισχύος έκθεσης με την καθιερωμένη μέθοδο της παραγράφου 5.3, στο ζητούμενο χώρο και στο ζητούμενο εύρος ζώνης, με ισοτροπική κεραία ίδιας τάξης μεγέθους με το χώρο, ώστε να καθοριστούν οι τιμές των τριών βασικών μεγεθών που θα έχει ο χώρος, όταν θωρακιστεί. Έστω $\mathrm{P_{out,1}(f)}$ το αποτέλεσμα αυτής της μέτρησης. Τότε, η $\mathrm{P_{in,1}}$ μπορεί να βρεθεί από την σχέση (5.6). Οι παράγοντες ενίσχυσης των εξαρτημάτων λήψης για το ζητούμενο εύρος θα πρέπει να είναι γνωστοί ή να μετρηθούν με αναλυτή δικτυωμάτων. Ο διορθωτικός παράγοντας εξαρτάται από τις γνωστές παραμέτρους της ανίχνευσης, σύμφωνα με την (5.4).

Η ισχύς που θα δεχόταν η εξωτερική επιφάνεια της μελλοντικής θωράκισης είναι πρακτικά $\mathrm{P_1 = P_{in,1}}$. Τότε η ισχύς της εσωτερικής επιφάνειας είναι $\mathrm{P_2 = P_1 - TA_s}$ η οποία μετατρέπεται σε απόλυτες μονάδες, βάσει της σχέσης (5.7), ως $\mathrm{P_{abs,2} = 10^{P_2/10}}$. Από τη σχέση (5.9), η πυκνότητα ισχύος της είναι $\mathrm{S_2 = P_{abs,2}/A_2}$. Αν «η» είναι η ειδική αντίσταση του εσωτερικού χώρου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια βρίσκεται από τη σχέση (5.11) ως $\mathrm{E_2 = \sqrt{S_2\,\eta}}$ και η ένταση του μαγνητικού πεδίου ως $\mathrm{H_2 = \sqrt{S_2/\eta}}$. Εφ' όσον δεν υπάρχουν επιπλέον πηγές εκπομπής εντός του θαλάμου, θεωρείται ότι σε όλα τα σημεία του θωρακισμένου χώρου επικρατούν τα $\mathrm{E_2}$ και $\mathrm{H_2}$. Σε τυχόντα αντικείμενα εντός του χώρου με διαφορετική ειδική αντίσταση αλλάζουν ελαφρώς αυτές τις τιμές.

9. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

9.1. Εισαγωγή

Ένας από τους δύο βασικούς στόχους της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη λογισμικού για τον χαρακτηρισμό της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης διαφόρων υλικών. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε είναι ένα εργαλείο ψηφιακού ελέγχου του εργαστηριακού χώρου μέτρησης ακτινοβολιών που κρίθηκε απαραίτητο για την σωστή υλοποίηση των μεθόδων αξιολόγησης που προτείνει η εργασία. Όμως, δεν είναι ένα συμπλήρωμα ειδικευμένο στις απαιτήσεις των μεθόδων αυτών, παρά ένα χρήσιμο εργαστηριακό εξάρτημα που διευκολύνει δραστικά και ενισχύει την ακρίβεια ενός μεγάλου εύρους πειραμάτων που περιλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις στενής ζώνης ισχύος ή παραμέτρων σκέδασης. Η λειτουργία του εξηγείται σε αυτό το κεφάλαιο.

Το Εργαστήριο Μη Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, για την ικανοποίηση των αναγκών της παρούσας εργασίας, εκτός από τους εργαστηριακούς του χώρους και λοιπό εξοπλισμό, διέθεσε τα τρία βασικά όργανα μέτρησης ΗΜ ακτινοβολίας που ο υπολογιστικός χειρισμός τους θα συζητηθεί σε αυτό το κεφάλαιο. Πρόκειται για υψηλού επιπέδου όργανα με επαγγελματική χρήση σε ελέγχους δημόσιας ασφαλείας, δοκιμές ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, αστική διάταξη εγκαταστάσεων τηλεπικοινωνιών, αξιολόγηση τηλεπικοινωνιών και ασφάλειας και γενικά σε οποιαδήποτε διεργασία ερευνητικού σταδίου ανάπτυξης ΗΜ εφαρμογών από βιομηχανικό και κρατικό φορέα. Ονομαστικά:

- Ο αναλυτής φάσματος
- Ο αναλυτής δικτυωμάτων
- Η γεννήτρια διανυσματικού κύματος

Η λειτουργία των οργάνων αυτών περιγράφηκε συνοπτικά στην παράγραφο 5.2. Για το ρόλο των πρώτων δύο, το εργαστήριο διέθεσε την συσκευή Keysight FieldFox N9915A που έχει την δυνατότητα να λειτουργήσει ως αναλυτής φάσματος ή ως δικτυωμάτων, κατά επιλογή του χρήστη.

Το είδος των μετρήσεων στενής ζώνης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων είναι λεπτό. Οι μετρήσεις απαιτούν διάκριση των ακτινοβολιών μεγάλων ραδιοσυχνοτήτων της τάξης των GHz, από διαφορά των συχνοτήτων τους εννιά δεκαδικών ψηφίων μικρότερη, της τάξης των Hz. Η διάκριση είναι απαραίτητη για την ανάλυση των μεγεθών της ακτινοβολίας, η οποία επίσης συχνά αφορά πολύ μικρές ποσότητες, όπως για παράδειγμα τα pW της ισχύος. Επομένως, χρησιμοποιούνται όργανα που έχουν βέλτιστη ευαισθησία. Ωστόσο, μόνο ο αναλόγως ευαίσθητος χειρισμός των εν λόγω οργάνων μπορεί να αξιοποιήσει αυτή τους την ιδιότητα. Κάτι που είναι απαιτητικό για τις ενσωματωμένες διεπαφές χειρισμού τους, με πλήκτρα και μοχλούς, όσον αφορά, ας πούμε, την περιήγηση στα δεδομένα εξόδου για την εξέταση μιας δεκαδικής τιμής. Επίσης, ο χειρονακτικός χειρισμός τους δεν διευκολύνει την γρήγορη επανάληψη μιας σειράς ρυθμίσεων.

Συγκεκριμένα, οι ανάγκες που η συμβατική χρήση των τριών οργάνων δεν ικανοποιεί είναι οι:

- Γρήγορη εκτέλεση μιας επαναληπτικής αλληλουχίας ελαφρώς εναλλασσόμενων ρυθμίσεων
- Εύκολη μόνιμη αποθήκευση αποτελεσμάτων σε συμβατή μορφή
- Απόδοση αριθμητικής ακρίβειας στην έξοδο

Για τους παραπάνω και άλλους λόγους, προτείνεται, ο χειρισμός των οργάνων, να γίνεται εξ' ολοκλήρου με υπολογιστικό πρόγραμμα. Έτσι, κάθε ρύθμισή τους είναι εντολή, γραμμένη με σειρά προτεραιότητας μέσα σε αλγόριθμο, έχει την αριθμητική ακρίβεια του υπολογιστή, είναι εύκολα επαναλήψιμη μέσα σε ομάδες και τα εισερχόμενα ογκώδη αποτελέσματα αποθηκεύονται μόνιμα σε μορφή ψηφιακών αρχείων. Επομένως, όλες οι μετρήσεις έχουν τη δυνατότητα να αναλυθούν περαιτέρω με τα περισσείως διαθέσιμα ψηφιακά εργαλεία οποιουδήποτε ηλεκτρονικού υπολογιστή, προς παραγωγή συμπερασμάτων. Επίσης, επιτυγχάνεται η:

- Άρση της πιθανότητας του ανθρώπινου σφάλματος σε επαναληπτικές διαδικασίες

Το λογισμικό της εργασίας επιμελήθηκε επίσης την αντιμετώπιση των πιθανών διαταραχών από ανθρώπινη παρουσία. Η σύνδεση των οργάνων στο πειραματικό περιβάλλον με τον υπολογιστή που τα χειρίζεται είναι απομακρυσμένη. Ο έλεγχος όλων των ρυθμίσεων, η έναρξη και η διακοπή των μετρήσεων και η ανταλλαγή των αποτελεσμάτων γίνεται εξ' αποστάσεως. Επομένως, η έναρξη μίας μέτρησης δεν απαιτεί καμία εγγύτητα ή κίνηση στον πειραματικό της χώρο τη στιγμή που πραγματοποιείται. Συνεπώς, μία ακόμη ανάγκη που η χρήση του ικανοποιεί είναι η:

- Ελαχιστοποίηση της παρεμβολής από ανθρώπινη παρουσία

Το λογισμικό της εργασίας έχει γραφικό περιβάλλον χρήστη. Όλες οι επιλογές χρήσης του λογισμικού βρίσκονται σε εικονικά παράθυρα του υπολογιστή, τα οποία απομονώνουν τις βασικότερες ρυθμίσεις των οργάνων. Έτσι, η φιλική διάταξη καθοδηγεί τον μη εξοικειωμένο χρήστη στον χειρισμό των οργάνων και αυτοματοποιεί την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τα οποία διαφορετικά απαιτούν εξοικείωση, είναι πιο χρονοβόρα και διαφέρουν από όργανο σε όργανο. Επίσης, το περιβάλλον προσφέρει αυτόματη προεπισκόπηση πολλαπλών αποτελεσμάτων μετρήσεων μαζί σε ίσες κλίμακες προς την άμεση σύγκρισή τους, η οποία απαιτεί προχωρημένες ρυθμίσεις από το συμβατικό χειρισμό των οργάνων. Ένα πλεονέκτημα του λογισμικού έναντι του συμβατικού χειρισμού επομένως είναι η:

- Ευκολία και απλότητα αποτελεσματικής χρήσης των οργάνων από γραφικό περιβάλλον

Το λογισμικό έχει την ικανότητα να συνδεθεί με τα τρία όργανα ταυτόχρονα και να τα χειριστεί αυτόνομα ή συνδυαστικά. Συγκεκριμένα, όταν δύο όργανα όπως η γεννήτρια κυματομορφών και ο αναλυτής φάσματος χρειάζεται να συνεργαστούν από τα δύο άκρα ενός συστήματος μέτρησης, το λογισμικό στέλνει αυτόματα τις αντίστοιχες εντολές και ρυθμίζει τα δύο όργανα με τις ίδιες παραμέτρους, ώστε επιτυγχάνεται η συνεργασία κάθε φορά που χρειάζεται. Έτσι ενισχύεται η:

- Αυτόματη και ακριβής επικοινωνία μεταξύ των οργάνων

Τέλος, το πρόγραμμα ενσωματώνει δύο λειτουργίες επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Οι δύο επεξεργασίες μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε προηγούμενη μέτρηση που έχει

αποθηκευτεί στον δίσκο του υπολογιστή και μπορούν να την αλλάξουν ή να την συνδυάσουν με κάποια άλλη, χωρίς την ανάγκη τρίτου ψηφιακού εργαλείου. Η επεξεργασία γίνεται αυτόματα, μετά από εκκίνηση της λειτουργίας από τον χρήστη. Τέτοιες επεξεργασίες είναι σημαντικές για την πειραματική διαδικασία και θα εξηγηθούν αργότερα. Δηλαδή, συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- Εύκολος συνδυασμός και τροποποίηση των εξαγόμενων δεδομένων από το ίδιο λογισμικό

Η γλώσσα προγραμματισμού του λογισμικού είναι η «Python». Το ψηφιακό περιβάλλον ανάπτυξής που χρησιμοποιήθηκε είναι το «Spyder, anaconda 3», [46], και τα λειτουργικά συστήματα «Windows 10» και «Windows 11». Το γραφικό περιβάλλον χρήστη υλοποιήθηκε με τη χρήση της βιβλιοθήκης «PyQt5». [47]. Η επικοινωνία του προγράμματος με τα εργαστηριακά όργανα έγινε με χρήση του πρωτοκόλλου «VISA» όπως υλοποιείται από το ψηφιακό πρόσθετο ή βιβλιοθήκη σε γλώσσα «Python»: «pyvisa-py». [48]. Η τηλε-ρύθμιση και χειρισμός των οργάνων έγινε στέλνοντας και λαμβάνοντας, μέσω του «VISA», εντολές γραμμένες σύμφωνα με το πρωτόκολλο επικοινωνίας «SCPI», το οποίο ακολουθούν τα χρησιμοποιούμενα όργανα. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη «openpyexel», [49], για την δημιουργία και ανάγνωση αρχείων τύπου «.xlsx».

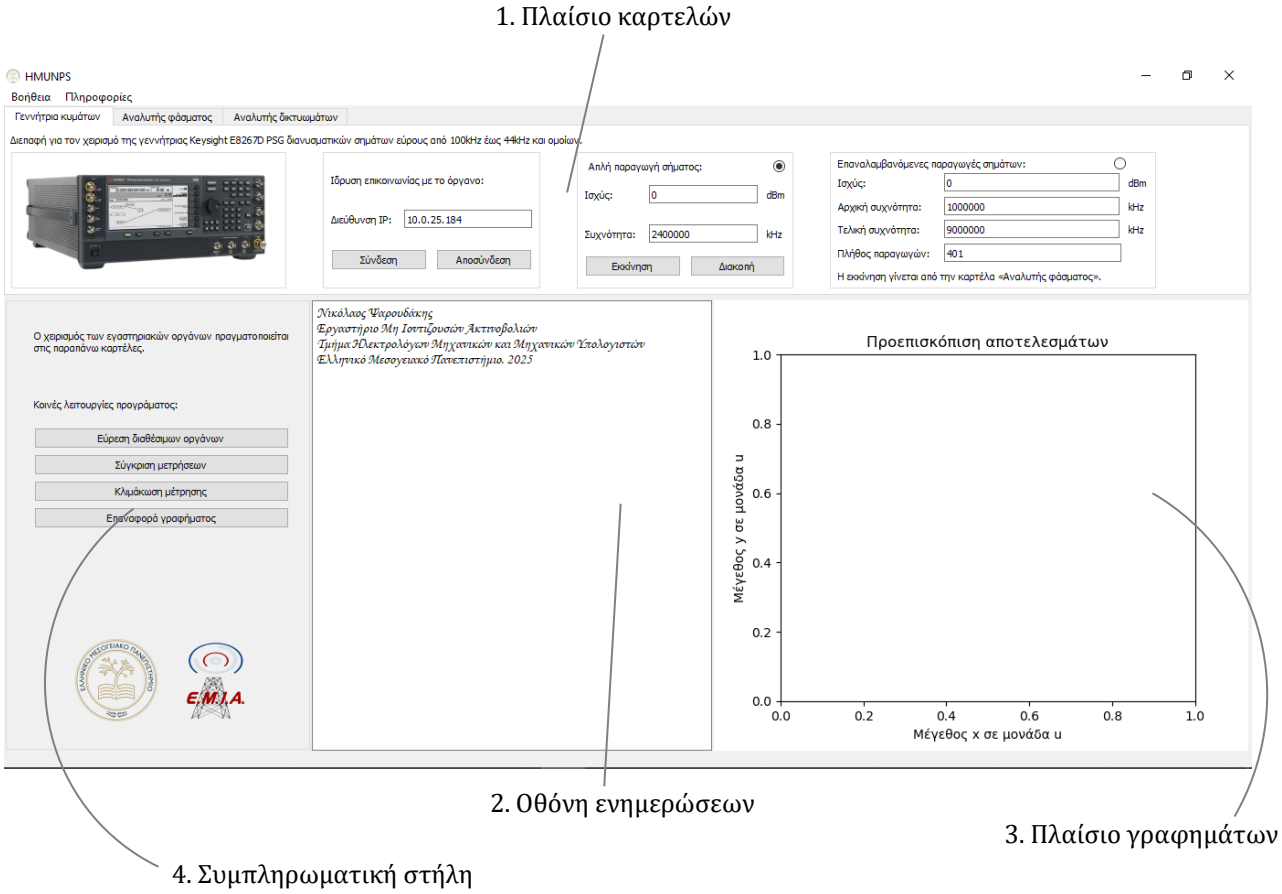
Στο παράρτημα Ι αναφέρονται ονομαστικά οι σημασίες των εντολών SCPI που χρησιμοποιήθηκαν και στο παράρτημα ΙΙ παρέχεται ο κώδικας που γράφτηκε για τα κύρια μέρη των βασικών λειτουργιών του λογισμικού. Ο τρόπος χρήσης του λογισμικού εξηγείται με απλές οδηγίες και μικρές απαιτήσεις τεχνικής κατάρτισης στο παρόν κεφάλαιο.

9.2. Οδηγίες χρήσεις

Η ενότητα αυτή περιέχει περιγραφή του γραφικού περιβάλλοντος, οδηγίες σύνδεσης των οργάνων, οδηγίες χειρισμού των οργάνων και περιγραφή και οδηγίες των ειδικών λειτουργιών του λογισμικού.

9.2.1. Γραφικό περιβάλλον

Το κύριο παράθυρο του γραφικού περιβάλλοντος, εμφανίζεται κατά την έναρξη του προγράμματος. Έχει τέσσερα τμήματα τα οποία φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 9.1: Ηλεκτρονικό γραφικό περιβάλλον χρήστη λογισμικού και διεπαφή χειρισμού γεννήτριας

Το πρώτο τμήμα είναι το πλαίσιο καρτελών, το οποίο καταλαμβάνει όλη την κορυφή του παραθύρου. Αυτό περιέχει τρείς καρτέλες από τις οποίες εμφανίζεται μόνο μία τη φορά. Κάθε καρτέλα περιέχει όλες τις επιλογές χειρισμού ενός από τα τρία όργανα και ονομάζεται διεπαφή χειρισμού του οργάνου. Εκεί γίνεται η σύνδεση, η εισαγωγή των παραμέτρων και η εκκίνηση των βασικών λειτουργιών που αφορούν το όργανο με ιδιαίτερα απλοποιημένο τρόπο.

Το δεύτερο τμήμα, η οθόνη ενημερώσεων, είναι ο χώρος όπου εμφανίζονται όλα τα μηνύματα του προγράμματος προς τον χρήστη σε μορφή κειμένου. Για παράδειγμα, πληροφορίες ενός συνδεδεμένου οργάνου, επαλήθευση των παραμέτρων που στάλθηκαν, σφάλματα που προέκυψαν κ.α.. Η οθόνη διατηρεί όλο το ιστορικό των ενημερώσεων έως τον τερματισμό του προγράμματος.

Το τρίτο τμήμα, το πλαίσιο γραφημάτων, είναι ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων όπου σχηματίζεται αυτόματα, μετά από μία επιτυχημένη μέτρηση ή επεξεργασία, η γραφική παράσταση της συνάρτησης του ζητούμενου μεγέθους ως προς τη συχνότητα, όπως προκύπτει από τα ζεύγη των τιμών που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που ελήφθησαν από ένα όργανο ή

υπολογίστηκαν από δεδομένα αναγνωσμένων αρχείων. Κάθε φορά που σχηματίζεται μια γραφική παράσταση στο πλαίσιο, έχει διαφορετικό χρώμα από τις προηγούμενες, οι οποίες συνεχίζουν να φαίνονται, χωρίς να επηρεάζεται η σωστή αντιστοίχισή τους στις κλίμακες των αξόνων. Αν οι παραστάσεις είναι δύο ή περισσότερες, εμφανίζεται και ενδεικτική λεζάντα που τις ταυτοποιεί.

Το τέταρτο και τελευταίο τμήμα του παραθύρου ονομάζεται συμπληρωματική στήλη και παρέχει στον χρήστη γενικές επιλογές που αφορούν το πρόγραμμα. Η πρώτη αφορά την σύνδεση των οργάνων και θα εξηγηθεί στην παράγραφο 9.2.2. Οι δύο επόμενες αφορούν τις δύο λειτουργίες αυτόματης επεξεργασίας αποτελεσμάτων μετρήσεων και θα αναλυθούν στις παραγράφους 9.2.7 και 9.2.8. Το τελευταίο πλήκτρο της στήλης, «Επαναφορά γραφήματος» διαγράφει όλες τις γραφικές παραστάσεις που απεικονίζονται στο πλαίσιο γραφημάτων και αρχικοποιεί τις κλίμακες των αξόνων.

Σημειώνεται εδώ ότι το λογισμικό περιέχει προεπιλεγμένες κάποιες δευτερεύουσες ρυθμίσεις των οργάνων, οι οποίες μπορούν να τροποποιηθούν και να συμπληρωθούν προγραμματιστικά σε περιπτώσεις εξειδικευμένων πειραμάτων.

9.2.2. Σύνδεση οργάνων

Κάθε όργανο που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει πρώτα να ενεργοποιηθεί χειροκίνητα από το πληκτρολόγιό του και, με καλώδιο «Ethernet», να συνδεθεί με το τοπικό δίκτυο υπολογιστών, που είναι συνδεδεμένος και ο υπολογιστής με το λογισμικό.

Έπειτα, για την εύρεση του οργάνου από το πρόγραμμα, χρειάζεται μόνο η πληροφορία της διεύθυνσης «IP» που έχει δοθεί στο όργανο από το δίκτυο, υπό αυτήν την καλωδίωση. Η διεύθυνση βρίσκεται από το πρόγραμμα άμεσα. Συγκεκριμένα, στο τμήμα 4 του κύριου παραθύρου, ή Συμπληρωματική στήλη, υπάρχει η επιλογή «Εύρεση διαθέσιμων οργάνων». Πατώντας το πλήκτρο, εμφανίζεται στην οθόνη ενημερώσεων μια λίστα από συμβολοσειρές. Κάθε συμβολοσειρά απαρτίζεται από τον αναγνωριστικό κωδικό του μοντέλου ενός οργάνου που είναι διαθέσιμο στο δίκτυο, την διεύθυνσή του και χαρακτηριστικά της σύνδεσης. Στην λίστα καταγράφονται όλα τα τοπικά συνδεδεμένα όργανα, τη στιγμή εκείνη.

Διαφορετικά, η προσωρινή διεύθυνση «IP» ενός συνδεδεμένου οργάνου μπορεί να βρεθεί από το περιβάλλον χρήσης του οργάνου, συνήθως επί κάποιας ακολουθίας επιλογών παρεμφερή με «Settings», «System», «System Configuration» ή «Utility», «LAN» ή «LAN Setup», «IP Address».

Η προσωρινή διεύθυνση «IP» θα εισαχθεί στο παράθυρο του λογισμικού από την αντίστοιχη υποδοχή για το κάθε όργανο, ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση μεταξύ αυτού και του υπολογιστή. Η σύνδεση αυτή θα ιδρύσει τον έλεγχο του οργάνου αυτού από το πρόγραμμα. Στη συνέχεια, περιγράφονται η διαδικασία αυτή και οι επιλογές ελέγχου για κάθε κατηγορία οργάνου.

9.2.3. Χειρισμός γεννήτριας

Η καρτέλα «Γεννήτρια σημάτων» είναι μία διεπαφή επικοινωνίας με το όργανο Keysight E8267D PSG. Η καρτέλα φαίνεται στη διαμέριση 1 της εικόνας 9.1. Το λογισμικό ωστόσο είναι ικανό να υποστηρίξει και άλλες όμοιες γεννήτριες διανυσματικού σήματος ή σύγχρονων παλμών.

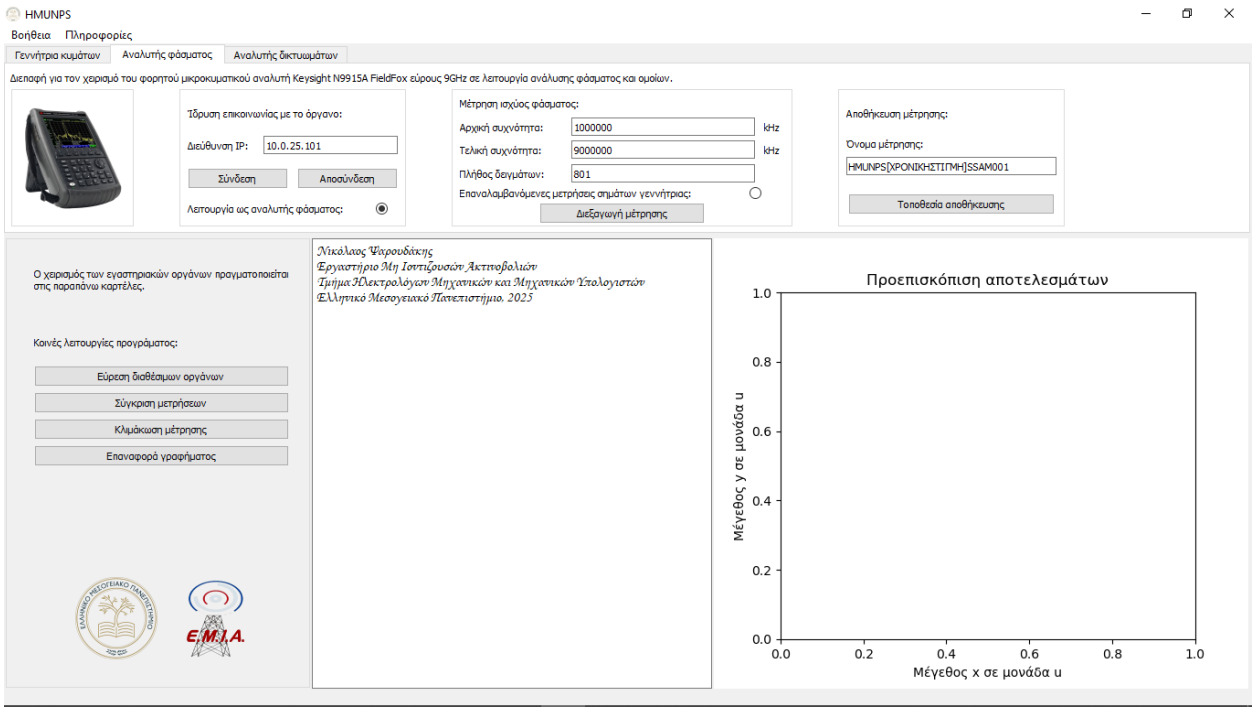
Η πρώτη ενότητα εισόδων της καρτέλας, δεξιά από το εικονίδιο της γεννήτριας, αφορά τη σύνδεση με το όργανο. Εκεί, εισάγεται η προσωρινή διεύθυνση «IP» του υπό το τοπικό δίκτυο και επιλέγεται το πλήκτρο «Σύνδεση». Αν επιτευχθεί, θα υπάρξει επιβεβαίωση στην οθόνη ενημερώσεων. Στην παράγραφο 9.2.2, εξηγήθηκε πως βρίσκεται η διεύθυνση «IP». Όλες οι επόμενες επιλογές ελέγχου της γεννήτριας προϋποθέτουν την πραγματοποίηση αυτής της σύνδεσης.

Η επόμενη ενότητα εισόδων αφορά την παραγωγή σήματος. Για τη λειτουργία αυτή, η κουκίδα «Απλή παραγωγή σήματος» πρέπει να είναι επιλεγμένη. Η ισχύς και η συχνότητα του σήματος εισάγονται εκεί σε dBm και kHz. Το πρόγραμμα δεν επιτρέπει ακραίες τιμές. Εφόσον η γεννήτρια είναι καλωδιωμένη από την έξοδό της, «RF Out» με κάποια κεραία ή άλλη διάταξη εκπομπής σήματος, επιλέγεται το πλήκτρο «Εκκίνηση» οπότε, και μόνο τότε, οι ρυθμίσεις αποστέλλονται από τον υπολογιστή στο όργανο και το ορισμένο σήμα παράγεται και μεταφέρεται στην διάταξη. Η εκπομπή διατηρείται σταθερή μέχρι να πατηθεί το πλήκτρο «Διακοπή», με το οποίο διακόπτεται η παραγωγή.

Η χρήση της τελευταίας ενότητας της καρτέλας, «Επαναλαμβανόμενες παραγωγές σημάτων», αφορά τη συνεργατική λειτουργία της γεννήτριας με τον αναλυτή φάσματος και περιγράφεται στην παράγραφο 9.2.5.

9.2.4. Χειρισμός αναλυτή φάσματος

Η καρτέλα «Αναλυτής φάσματος» είναι μία διεπαφή επικοινωνίας με το όργανο Keysight FieldFox N9915A σε λειτουργία αναλυτή φάσματος, ή όμοιο όργανο. Είναι η δεύτερη καρτέλα του πλαισίου καρτελών του κύριου παραθύρου και φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Μέσω αυτής, το πρόγραμμα ρυθμίζει τον αναλυτή φάσματος, δέχεται και οργανώνει τα πειραματικά δεδομένα της εξόδου του.



Εικόνα 9.2: Ηλεκτρονικό γραφικό περιβάλλον χειρισμού αναλυτή φάσματος

Η πρώτη ενότητα εισόδων της καρτέλας, δεξιά από το εικονίδιο του αναλυτή, αφορά τη σύνδεση με το όργανο. Εκεί, εισάγεται η προσωρινή διεύθυνση «IP» του υπό το τοπικό δίκτυο και επιλέγεται το πλήκτρο «Σύνδεση». Αν επιτευχθεί, θα υπάρξει επιβεβαίωση στην οθόνη ενημερώσεων. Στην παράγραφο 9.2.2, εξηγήθηκε πως βρίσκεται η διεύθυνση «IP» των οργάνων. Για οποιαδήποτε άλλη δυνατότητα αυτής της καρτέλας, η κουκίδα «Λειτουργία ως αναλυτής φάσματος» πρέπει να είναι επιλεγμένη.

Η δεύτερη ενότητα εισόδων αφορά την κύρια λειτουργία του οργάνου, την ανάλυση φάσματος. Εκεί εισάγονται η αρχική και η τελική συχνότητα της ανάλυσης σε kHz καθώς και το πλήθος δειγμάτων ισχύος που θα συμπεριλάβει. Το πρόγραμμα δεν επιτρέπει ακραίες τιμές. Δεν πρέπει να είναι επιλεγμένη η κουκίδα «Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σημάτων γεννήτριας». Η μέτρηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας γίνεται από την είσοδο «RF In» του αναλυτή. Επομένως, κάποια κεραία ή άλλη διάταξη λήψης σήματος πρέπει να έχει καλωδιωθεί με αυτήν την είσοδο.

Όταν η συνδεσμολογία είναι έτοιμη, επιλέγεται το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης». Οι ρυθμίσεις αποστέλλονται στο όργανο και ο αναλυτής εκτελεί τη σάρωση, προσδιορίζοντας και καταγράφοντας την τιμή της ισχύος της λαμβανόμενης ακτινοβολίας στην είσοδό του. Η λήψη γίνεται τόσες φορές, όσες το ορισμένο πλήθος δειγμάτων, για ακτινοβολία με συχνότητες που ξεκινούν από την ορισμένη αρχική και διαφέρουν κατά ίσα διαστήματα μέχρι την ορισμένη τελική. Οι καταγραφές του αναλυτή λαμβάνονται από τον υπολογιστή, αντιστοιχίζονται με τις σωστές συχνότητες και αποθηκεύονται μαζί

με τη γραφική τους παράσταση σε ηλεκτρονικό αρχείο «.xlsx», στη μόνιμη μνήμη του υπολογιστή. Επίσης, η γραφική παράσταση εμφανίζεται στο και πλαίσιο γραφημάτων του παραθύρου.

Η τρίτη ενότητα εισόδων της καρτέλας δίνει στον χρήστη την επιλογή του ονόματος του ηλεκτρονικού αρχείου του αποτελέσματος, που παράγεται μετά την ανάλυση φάσματος, καθώς και της προτιμώμενης τοποθεσίας αποθήκευσής του εντός του τοπικού σκληρού δίσκου. Κατά την προηγούμενη διαδικασία, πριν επιλεχθεί το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης», μπορεί να εισαχθεί νέο όνομα για το αρχείο στην θέση «Όνομα μέτρησης» και να επιλεχθεί νέα τοποθεσία, πατώντας το πλήκτρο «Τοποθεσία αποθήκευσης» και διαλέγοντας μία στο παράθυρο που αναδύεται. Το προεπιλεγμένο όνομα περιέχει ένα αναγνωριστικό του είδους της μέτρησης, αύξοντα αριθμό και την ημερομηνία και ώρα της διεξαγωγής από το υπολογιστικό σύστημα. Η προεπιλεγμένη ηλεκτρονική τοποθεσία είναι ένας φάκελος αποτελεσμάτων που γειτονεύει με τον φάκελο από όπου ενεργοποιήθηκε το πρόγραμμα και αν δεν υπάρχει, δημιουργείται.

Η χρήση της κουκίδας «Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σημάτων γεννήτριας» της καρτέλας εξηγείται στην επόμενη παράγραφο.

9.2.5. Λειτουργία συνδυαστικού ελέγχου γεννήτριας-αναλυτή φάσματος

Με σκοπό να καλύψει την ανάγκη ανάλυσης φάσματος με τεχνητά σήματα εντός ενός εργαστηριακού χώρου, το λογισμικό διαθέτει τη συνεργατική λειτουργία δύο εργαστηριακών οργάνων. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί αυτόματα την γεννήτρια Keysight E8267D PSG και τον αναλυτή Keysight FieldFox N9915A, σε λειτουργία αναλυτή φάσματος. Το λογισμικό ωστόσο είναι ικανό εναλλακτικά να υποστηρίξει δύο όμοια όργανα. Σκοπός αυτής της λειτουργίας είναι η μέτρηση από τον αναλυτή, μέσω μίας διάταξης εκπομπής-λήψης, μίας αλληλουχίας σημάτων με διαφορετικές συχνότητες παραγόμενων από τη γεννήτρια. Καθώς η γεννήτρια παράγει ένα σήμα ορισμένης συχνότητας ανά ρύθμιση, δεν θα ήταν πρακτικό να παραχθεί και να μετρηθεί ένα ευρύ φάσμα χωρίς ένα πρόγραμμα να επαναλαμβάνει αυτόματα την διαδικασία.

Πρώτον, απαιτείται η ίδρυση επικοινωνίας του προγράμματος με τα δύο όργανα. Στην καρτέλα «Γεννήτρια σημάτων», στην ενότητα «Ίδρυση επικοινωνίας με το όργανο» εισάγεται η προσωρινή διεύθυνση «IP» της γεννήτριας υπό το τοπικό δίκτυο και επιλέγεται το πλήκτρο «Σύνδεση». Στην καρτέλα «Αναλυτής φάσματος», στην «Ίδρυση επικοινωνίας με το όργανο» εισάγεται η προσωρινή διεύθυνση «IP» του αναλυτή υπό το τοπικό δίκτυο και επιλέγεται το πλήκτρο «Σύνδεση». Η κουκίδα «Λειτουργία ως αναλυτής φάσματος» πρέπει να είναι επιλεγμένη. Αν επιτευχθούν οι συνδέσεις, θα υπάρξουν επιβεβαιώσεις στην οθόνη ενημερώσεων. Στην παράγραφο 9.2.2, εξηγήθηκε πως βρίσκεται η διεύθυνση «IP» των οργάνων.

Στην καρτέλα «Γεννήτρια σημάτων», επιλέγεται η κουκίδα «Επαναλαμβανόμενες παραγωγές σημάτων». Στην ίδια ενότητα εισόδων εισάγονται η ισχύς των σημάτων σε dBm, το εύρος ζώνης εντός του οποίου θα έχουν συχνότητες σε kHz και το πλήθος τους. Το πρόγραμμα οριοθετεί τις εκχωρήσιμες τιμές. Στην καρτέλα «Αναλυτής φάσματος», στην ενότητα «Μέτρηση ισχύος φάσματος», αυτομάτως, οι τιμές των παραμέτρων θα είναι ίδιες με αυτές που εισάχθηκαν προηγουμένως και θα είναι επιλεγμένη

η κουκίδα «Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σημάτων γεννήτριας». Η ρύθμιση των παραμέτρων μπορεί να γίνει και από τις δύο ενότητες.

Η εκπομπή των σημάτων γίνεται από την έξοδο «RF Out» της γεννήτριας. Επομένως, κάποια κεραία ή άλλη διάταξη εκπομπής σήματος πρέπει να έχει καλωδιωθεί με την έξοδο. Η ανίχνευση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας γίνεται από την είσοδο «RF In» του αναλυτή. Επομένως, κάποια κεραία ή άλλη διάταξη λήψης σήματος σε επαφή με την διάταξη εκπομπής πρέπει να έχει καλωδιωθεί με την είσοδο. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη μέτρηση είναι πολύ ευαίσθητη σε παρεμβολές και πρέπει να γίνεται σε κλειστό, ηλεκτρομαγνητικά ουδέτερο περιβάλλον.

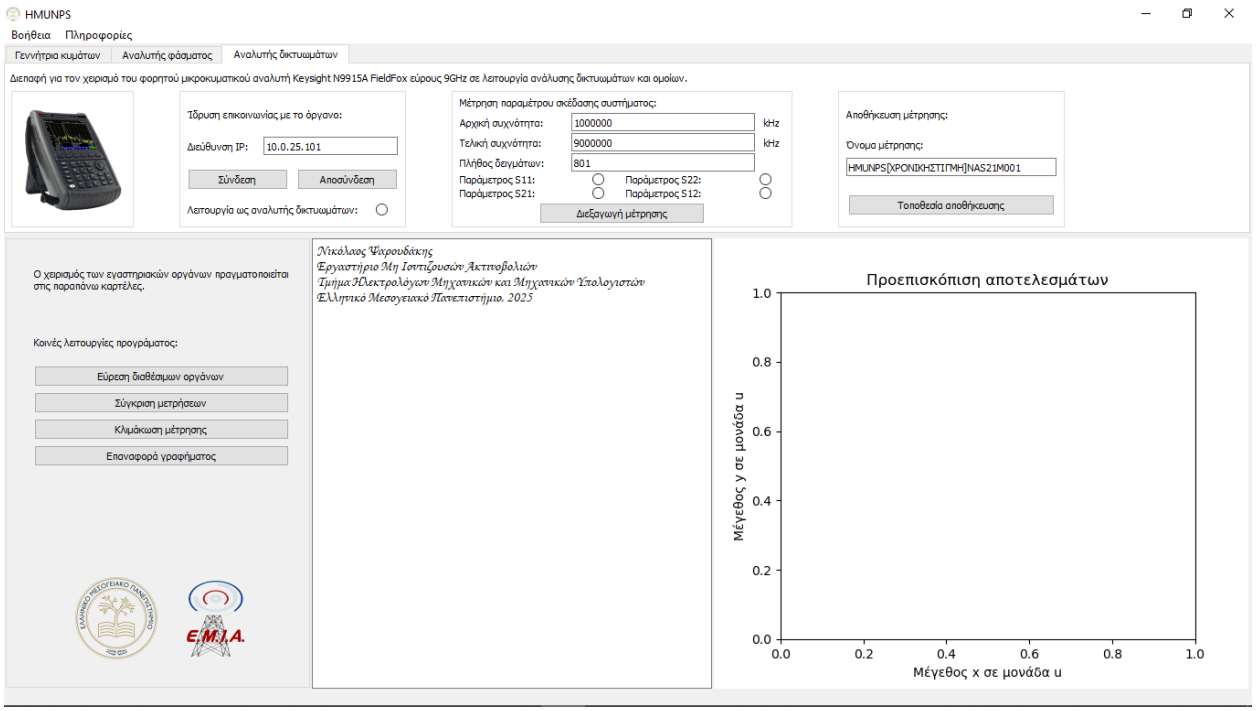
Για την εκκίνηση της διαδικασίας, επιλέγεται το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης» στην καρτέλα του αναλυτή. Η γεννήτρια λαμβάνει εντολή και παράγει το ορισμένο σήμα με την επόμενη τιμή συχνότητας και ο αναλυτής εκτελεί μία σάρωση ενός στενού τοπικού εύρους ζώνης, προσδιορίζοντας και καταγράφοντας την τιμή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος στην είσοδό του. Η παραγωγή και η λήψη επαναλαμβάνονται τόσες φορές όσες το ορισμένο πλήθος δειγμάτων, για σήματα με συχνότητες που ξεκινούν από την ορισμένη αρχική και διαφέρουν κατά ίσα διαστήματα, μέχρι την ορισμένη τελική.

Οι καταγραφές του αναλυτή λαμβάνονται από τον υπολογιστή, αντιστοιχίζονται με τις σωστές συχνότητες και αποθηκεύονται μαζί με τη γραφική τους παράσταση σε ηλεκτρονικό αρχείο «.xlsx», στη μόνιμη μνήμη του υπολογιστή. Επίσης, η γραφική παράσταση εμφανίζεται στο πλαίσιο γραφημάτων του παραθύρου. Προσοχή. Λόγω των ενσωματωμένων μηχανισμών αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ των οργάνων, η μέτρηση διαρκεί χρόνο πάγιων 3,2 δευτερολέπτων και 6,4 δευτερολέπτων για κάθε πλήρη επανάληψη. Επομένως, πολλαπλασιάζοντας με το πλήθος δειγμάτων, η μέτρηση μπορεί να καταστεί χρονοβόρα.

Το όνομα και η τοποθεσία του ηλεκτρονικού αρχείου του αποτελέσματος της μέτρησης μπορεί να επιλεχθεί από την ενότητα «Αποθήκευση μέτρησης» της καρτέλας «Αναλυτής φάσματος». Η αλλαγή αυτών των ρυθμίσεων πρέπει να γίνει πριν την εκκίνηση της μέτρησης. Διαφορετικά, το προεπιλεγμένο όνομα περιέχει ένα αναγνωριστικό του είδους της μέτρησης, αύξοντα αριθμό και την ημερομηνία και ώρα της διεξαγωγής από το υπολογιστικό σύστημα. Η προεπιλεγμένη ηλεκτρονική τοποθεσία είναι ένας φάκελος αποτελεσμάτων που γειτονεύει με τον φάκελο από όπου ενεργοποιήθηκε το πρόγραμμα και αν δεν υπάρχει, δημιουργείται.

9.2.6. Χειρισμός αναλυτή δικτυωμάτων

Η καρτέλα «Αναλυτής δικτυωμάτων» είναι μία διεπαφή επικοινωνίας με το όργανο Keysight FieldFox N9915A, ή όμοιο όργανο. Είναι η τρίτη καρτέλα του πλαισίου καρτελών του κύριου παραθύρου και φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Μέσω αυτής, το πρόγραμμα ρυθμίζει τον αναλυτή δικτυωμάτων, δέχεται και οργανώνει τα πειραματικά δεδομένα της εξόδου του.



Εικόνα 9.3: Ηλεκτρονικό γραφικό περιβάλλον χειρισμού αναλυτή δικτυωμάτων

Η πρώτη ενότητα εισόδων της καρτέλας, δεξιά του εικονιδίου του αναλυτή, αφορά τη σύνδεση με το όργανο. Εκεί, εισάγεται η προσωρινή διεύθυνση «IP» του αναλυτή υπό το τοπικό δίκτυο και επιλέγεται το πλήκτρο «Σύνδεση». Αν επιτευχθεί, θα εμφανιστεί επιβεβαίωση στην οθόνη ενημερώσεων. Στην παράγραφο 9.2.2, εξηγήθηκε πως βρίσκεται η διεύθυνση «IP» των οργάνων. Για οποιαδήποτε περαιτέρω δυνατότητα της καρτέλας, η κουκίδα «Λειτουργία ως αναλυτής δικτυωμάτων» πρέπει να είναι επιλεγμένη.

Η δεύτερη ενότητα εισόδων αφορά την κύρια λειτουργία του οργάνου, την μέτρηση παραμέτρων σκέδασης συστήματος εκπομπής-λήψης, ανιχνεύοντας ένα εύρος διαδιδόμενων σε αυτό δοκιμαστικών σημάτων. Εκεί εισάγονται η αρχική και η τελική συχνότητα της ανίχνευσης σε kHz καθώς και το πλήθος δειγμάτων λόγου ισχύων που θα συμπεριλάβει. Το πρόγραμμα δεν επιτρέπει ακραίες τιμές. Επίσης, επιλέγεται η κουκίδα με την επιθυμητή από τις διαθέσιμες βασικές παραμέτρους σκέδασης προς μέτρηση. Η εκπομπή δοκιμαστικών σημάτων γίνεται από την έξοδο «RF Out» του αναλυτή και η μέτρηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας γίνεται από την είσοδο «RF In» του αναλυτή. Επομένως, η διάταξη εκπομπής πρέπει να καλωδιωθεί με την παραπάνω έξοδο και η διάταξη λήψης με την παραπάνω είσοδο.

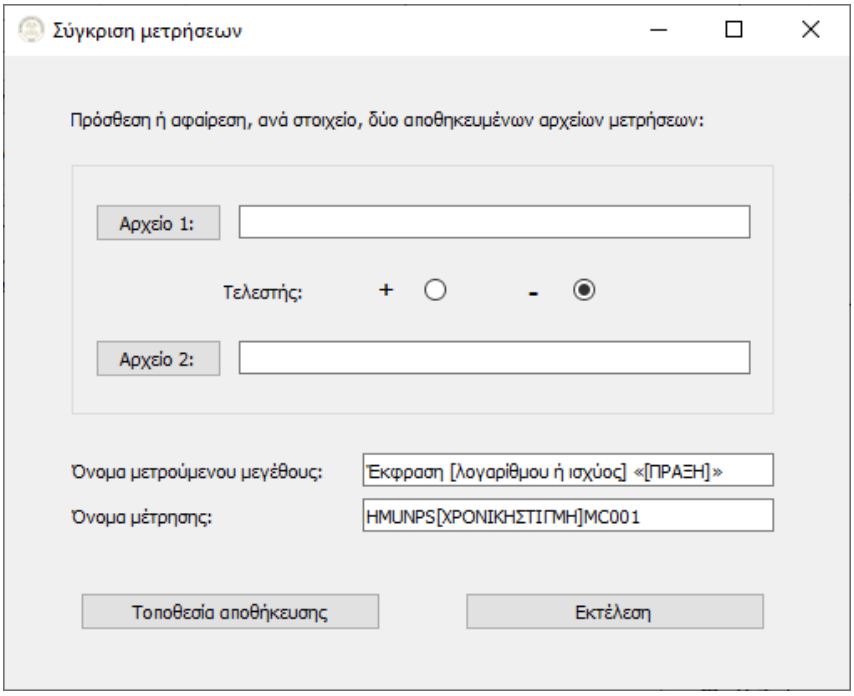
Όταν η συνδεσμολογία είναι έτοιμη, επιλέγεται το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης». Τότε, οι ρυθμίσεις αποστέλλονται στο όργανο και ο αναλυτής εκτελεί την ανίχνευση, προσδιορίζοντας και καταγράφοντας την τιμή της παραμέτρου. Ο προσδιορισμός γίνεται συγκρίνοντας τις διάφορες συνιστώσες του δοκιμαστικού σήματος που διαδίδεται στα άκρα του συστήματος, με τρόπο που καθορίζεται από την παράμετρο σκέδασης που μετράται. Η διαδικασία αυτή γίνεται τόσες φορές, όσες το ορισμένο πλήθος

δειγμάτων, για ακτινοβολία με συχνότητες που ξεκινούν από την ορισμένη αρχική και διαφέρουν κατά ίσα διαστήματα μέχρι την ορισμένη τελική. Οι καταγραφές του αναλυτή λαμβάνονται από τον υπολογιστή, αντιστοιχίζονται με τις σωστές συχνότητες και αποθηκεύονται μαζί με τη γραφική τους παράσταση σε ηλεκτρονικό αρχείο «.xlsx», στη μόνιμη μνήμη του υπολογιστή. Επίσης, η γραφική παράσταση της μέτρησης εμφανίζεται και στο πλαίσιο γραφημάτων του παραθύρου.

Το τρίτο πλαίσιο της καρτέλας δίνει στον χρήστη την επιλογή του ονόματος του ηλεκτρονικού αρχείου των αποτελεσμάτων, που παράγεται μετά την μέτρηση παραμέτρου σκέδασης, καθώς και την προτιμώμενη τοποθεσία αποθήκευσής του εντός του τοπικού σκληρού δίσκου. Κατά την προηγούμενη διαδικασία, πριν επιλεχθεί το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης», μπορεί να εισαχθεί νέο όνομα για το αρχείο στην θέση «Όνομα μέτρησης» και να επιλεχθεί νέα τοποθεσία πατώντας το πλήκτρο «Τοποθεσία αποθήκευσης» και διαλέγοντας μία στο παράθυρο που αναδύεται. Το προεπιλεγμένο όνομα περιέχει ένα αναγνωριστικό του είδους της μέτρησης, αύξοντα αριθμό και την ημερομηνία και ώρα της διεξαγωγής από το υπολογιστικό σύστημα. Η προεπιλεγμένη ηλεκτρονική τοποθεσία είναι ένας φάκελος αποτελεσμάτων που γειτονεύει με τον φάκελο από όπου ενεργοποιήθηκε το πρόγραμμα και αν δεν υπάρχει, δημιουργείται.

9.2.7. Λειτουργία σύγκρισης μετρήσεων

Το λογισμικό παρέχει δύο λειτουργίες αυτόματης επεξεργασίας δεδομένων μετρήσεων για την παραγωγή σύνθετων αποτελεσμάτων. Η λειτουργία σύγκρισης μετρήσεων ενεργοποιείται από το πλήκτρο «Σύγκριση μετρήσεων» της συμπληρωματικής στήλης του κυρίου παραθύρου. Βλέπε εικόνα 9.3. Μόλις πατηθεί, εμφανίζεται το παράθυρο της λειτουργίας, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 9.4: Γραφικό παράθυρο λειτουργίας σύγκρισης μετρήσεων

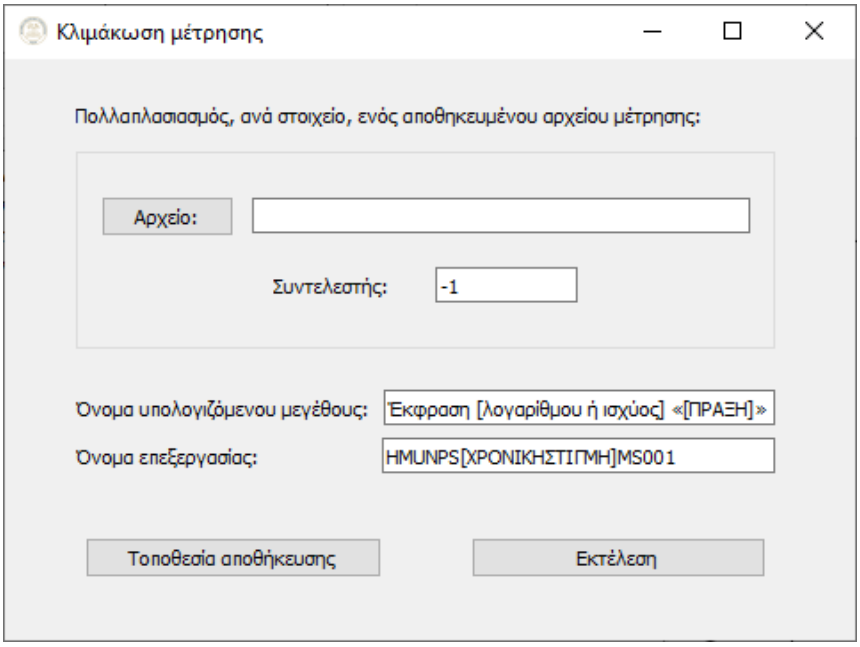
Η λειτουργία αυτή είναι η πρόσθεση ή η αφαίρεση δύο μεγεθών εξαρτημένων από τη συχνότητα που μετρήθηκαν από τα όργανα. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αναγνώθει τους δύο πίνακες από δύο ηλεκτρονικά αρχεία αποτελέσματος που έχουν παραχθεί από προηγούμενες μετρήσεις και τους προσθέτει ή τους αφαιρεί, ανά στοιχείο, μεταξύ τους. Η πράξη είναι εφικτή μόνο αν οι δύο μετρήσεις αφορούν ακριβώς τις ίδιες τιμές συχνότητας και οι μονάδες των δύο μεγεθών είναι συγκρίσιμες. Το αποτέλεσμα της πράξης αποθηκεύεται με τη σειρά του σε ηλεκτρονικό αρχείο και η γραφική του παράσταση εμφανίζεται στο πλαίσιο γραφημάτων του κυρίου παραθύρου. Κάθε αρχείο αποτελέσματος είναι συμβατό για εκ νέου επεξεργασία από το πρόγραμμα.

Στο παράθυρο της εικόνας 9.4, επιλέγονται από τον χρήστη δύο αρχεία «.xlsx» από την μόνιμη μνήμη του υπολογιστή. Πατώντας πάνω στο πλήκτρο «Αρχείο 1» ή «Αρχείο 2», εμφανίζεται ένα παράθυρο επιλογής αρχείου από το σκληρό δίσκο. Μόλις επιλεχθεί αρχείο, η πλήρης διεύθυνσή του αναγράφεται στην αντίστοιχη γειτονική υποδοχή κειμένου. Διαφορετικά, οι διευθύνσεις μπορούν να εισαχθούν από την υποδοχή άμεσα. Τα αρχεία πρέπει να είναι συμβατά αρχεία μέτρησης που έχουν παραχθεί από το λογισμικό σε προηγούμενο χρόνο. Επίσης, οι πίνακες των δύο αρχείων πρέπει να έχουν τις ίδιες διαστάσεις και οι τιμές της μεταβλητής της συχνότητας να είναι ίσες. Ακόμη, πρέπει να ορίζεται η ζητούμενη πράξη μεταξύ των δύο εξαρτημένων μεταβλητών. Πιθανές πράξεις μονάδων που δεν ορίζονται είναι «dBm + dBm» και «dB - dBm». Ο τελεστής της πράξης επιλέγεται από την αντίστοιχη κουκίδα και η λειτουργία εκκινεί με το πλήκτρο «Εκτέλεση».

Οι δύο τελευταίες υποδοχές του παραθύρου είναι προαιρετικές. Ο χρήστης μπορεί να ονοματίσει το μέγεθος που προκύπτει από την πράξη και το ηλεκτρονικό αρχείο του αποτελέσματος της επεξεργασίας. Διαφορετικά, προεπιλεγμένα ονόματα παράγονται αυτόματα. Το όνομα του αρχείου είναι μοναδικό λόγω της αναγραφόμενης χρονικής στιγμής. Το προεπιλεγμένο όνομα υπολογιζόμενου μεγέθους περιγράφει την πράξη και βοηθάει στο διαχωρισμό πολλαπλών επεξεργασιών. Με το πλήκτρο «Τοποθεσία αποθήκευσης», ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την ηλεκτρονική τοποθεσία αποθήκευσης του αρχείου. Η προεπιλεγμένη τοποθεσία είναι ο φάκελος αποτελεσμάτων του προγράμματος που αν δεν υπάρχει, δημιουργείται.

9.2.8. Λειτουργία κλιμάκωσης μέτρησης

Η λειτουργία κλιμάκωσης μέτρησης ενεργοποιείται από το πλήκτρο «Κλιμάκωση μέτρησης» της συμπληρωματικής στήλης του κυρίου παραθύρου. Βλέπε εικόνα 9.3. Μόλις πατηθεί, εμφανίζεται το παράθυρο της λειτουργίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 9.5.



Εικόνα 9.5: Γραφικό παράθυρο λειτουργίας κλιμάκωσης μέτρησης

Η λειτουργία κλιμακώνει ένα μέγεθος, εξαρτημένο από τη συχνότητα, που μετρήθηκε από τα όργανα, κατά μια σταθερά. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αναγνώθει ένα ηλεκτρονικό αρχείο αποτελέσματος που έχει παραχθεί από μία προηγούμενη μέτρηση και πολλαπλασιάζει όλα τα καταγεγραμμένα

στοιχεία του μεγέθους με ένα σταθερό συντελεστή. Οι νέες τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής αντιστοιχούν στις ίδιες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής, συχνότητας, που παραμένουν αναλλοίωτες. Το αποτέλεσμα της πράξης αποθηκεύεται με τη σειρά του σε ηλεκτρονικό αρχείο και η γραφική του παράσταση εμφανίζεται στο πλαίσιο γραφημάτων του κυρίου παραθύρου. Κάθε αρχείο αποτελέσματος είναι συμβατό να υποστεί εκ νέου επεξεργασία από το πρόγραμμα.

Στο παράθυρο της εικόνας 9.5, επιλέγεται από τον χρήστη ένα αρχείο«.xlsx» από την μόνιμη μνήμη του υπολογιστή. Πατώντας πάνω στο πλήκτρο «Αρχείο», εμφανίζεται ένα παράθυρο εύρεσης διεύθυνσης αρχείου, εντός του τοπικού υλισμικού. Μόλις επιλεχθεί αρχείο, η πλήρης διεύθυνσή του αναγράφεται στην αντίστοιχη γειτονική υποδοχή κειμένου. Διαφορετικά, η διεύθυνση μπορεί να εισαχθεί από την υποδοχή άμεσα. Το αρχείο πρέπει να είναι συμβατό αρχείο μέτρησης που έχει παραχθεί από το λογισμικό σε προηγούμενο χρόνο. Ο συντελεστής της πράξης επιλέγεται από την αντίστοιχη υποδοχή και μπορεί να είναι οποιοσδήποτε ρητός αριθμός. Η λειτουργία εκκινεί με το πλήκτρο «Εκτέλεση».

Οι δύο τελευταίες υποδοχές του παραθύρου είναι προαιρετικές. Ο χρήστης μπορεί να ονοματίσει το μέγεθος που προκύπτει από την πράξη και το ηλεκτρονικό αρχείο του αποτελέσματος της επεξεργασίας. Διαφορετικά, προεπιλεγμένα ονόματα παράγονται αυτόματα. Το όνομα του αρχείου είναι μοναδικό λόγω της αναγραφόμενης χρονικής στιγμής. Το όνομα υπολογιζόμενου μεγέθους περιγράφει την πράξη και βοηθάει στο διαχωρισμό πολλαπλών επεξεργασιών. Με το πλήκτρο «Τοποθεσία αποθήκευσης», ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την ηλεκτρονική τοποθεσία αποθήκευσης του αρχείου. Η προεπιλεγμένη τοποθεσία είναι ο φάκελος αποτελεσμάτων του προγράμματος που αν δεν υπάρχει, δημιουργείται.

10. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ

Στην παρούσα εργασία, σχεδιάστηκαν τρείς διαφορετικές ειδικές εργαστηριακές μέθοδοι αξιολόγησης της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης καθορισμένου υλικού και διαστάσεων, βασισμένες στην γενική μεθοδολογία του κεφαλαίου 8 και αξιοποιώντας τις δυνατότητες του ανεπτυγμένου λογισμικού. Σκοπός των μεθόδων είναι ο χαρακτηρισμός θωρακίσεων ως προς την εξασθένηση μετάδοσης, σε συνάρτηση της συχνότητας και η εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων για τα υλικά κατασκευής τους. Οι τρείς μέθοδοι χρησιμοποιούν διαφορετικά εργαστηριακά όργανα μέτρησης ή συνδυασμούς τους, δύο εξ αυτών χρησιμοποιούν έκθεση σε δοκιμαστική ακτινοβολία και η τρίτη χρησιμοποιεί έκθεση σε ακτινοβολία αστικών υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών.

Για την αποτελεσματική επίδειξή τους, οι μέθοδοι δοκιμάστηκαν μέσω της διεξαγωγής των αντίστοιχων ξεχωριστών πειραμάτων. Στα πειράματα που εκτελέστηκαν, χρησιμοποιείται αναφορικά, κοινή κυλινδρική ασπίδα από συνθετικό πειραματικό υλικό. Επίσης, τα πειράματα συμβιβάστηκαν με τα μέσα που ήταν διαθέσιμα. Ωστόσο, ο σκοπός των πειραμάτων ήταν παραδειγματικός και όχι η εξαγωγή συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα που αφορούν το πειραματικό υλικό. Κάθε πείραμα αποτελεί τη δοκιμαστική υλοποίηση κάθε μεθόδου, η οποία χαρακτηρίζεται από τα τρία επιλεγμένα όργανα μέτρησης, τη χρήση των λειτουργιών του λογισμικού και την γενική θεωρία του κεφαλαίου 8, αλλά μπορεί να τροποποιηθεί ως προς τον περιφερειακό εξοπλισμό, το περιβάλλον και τη γεωμετρία της διάταξης και το είδος της θωράκισης.

Η ηλεκτρομαγνητική εξασθένηση μετάδοσης εκτιμήθηκε στα πειράματα για το εύρος ραδιοσυχνοτήτων από 450 MHz έως 6 GHz. Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει περιγραφή των πειραματικών διαδικασιών, επίδειξη της πρακτικής χρήσης του λογισμικού για τον τηλεχειρισμό και την εξαγωγή και επεξεργασία αποτελεσμάτων και σύγκριση των τριών εργαστηριακών μεθόδων. Ο επόμενος πίνακας αναφέρει τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα πειράματα.

Πίνακας 10.1: Πειραματικά εργαλεία

Τίτλος	Λειτουργία	Ονομαστικό εύρος ζώνης
Keysight E8267D PSG	Γεννήτρια διανυσματικού σήματος	100 kHz έως 14GHz
Keysight FieldFox N9915A	Αναλυτής φάσματος και αναλυτής δικτυωμάτων	100 kHz έως 9GHz
Rohde & Schwarz HL300	Κατευθυντική λογαριθμική περιοδική κεραία	450 MHz έως 8GHz
Keysight N6850A	Κυλινδρική πανκατευθυντική κεραία	20 MHz έως 6GHz
Κυλινδρική ασπίδα	Εισαγωγή εξασθένησης	-
Φορητός Η/Υ	Windows 10	-
Σταθερός Η/Υ	Windows 11	-

10.1. Πείραμα πρώτο

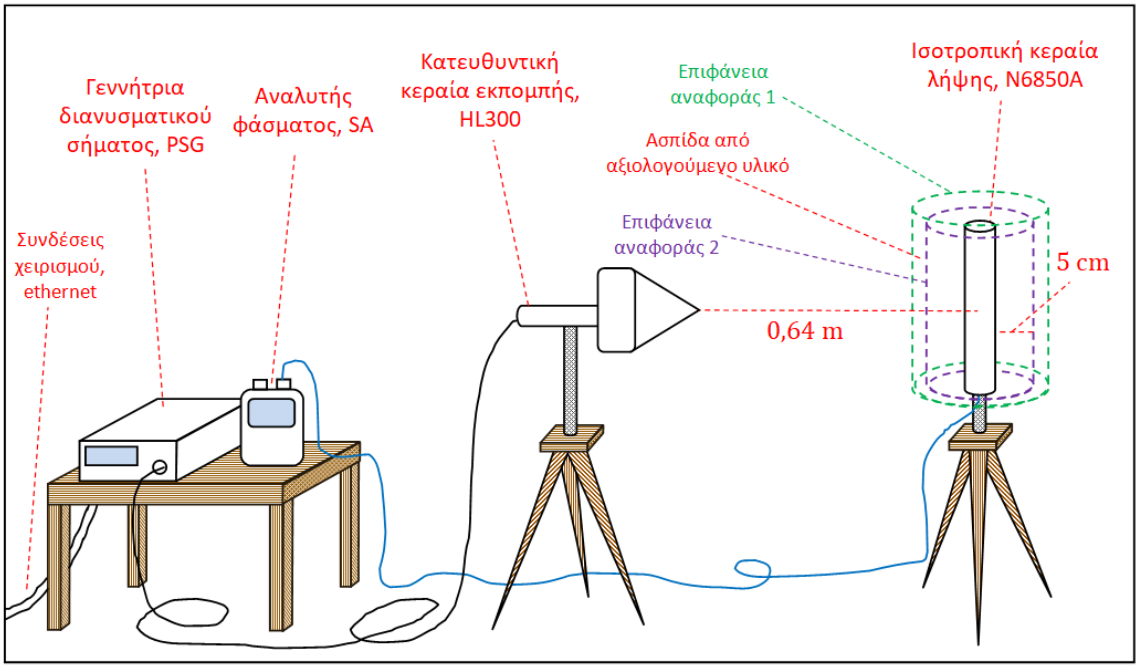
Στο πρώτο πείραμα, μετρήθηκε, από τον αναλυτή φάσματος, η ηλεκτρομαγνητική εξασθένηση μετάδοσης της κυλινδρικής ασπίδας του πίνακα 10.1, σε συνάρτηση με την συχνότητα διαδιδόμενων σε αυτήν δοκιμαστικών ΗΜ κυμάτων, παραγμένων από την γεννήτρια διανυσματικού σήματος. Το πείραμα αποτελεί δοκιμή της πρώτης εργαστηριακής μεθόδου.

10.1.1. Διάταξη πειράματος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε κλειστό χώρο. Η γεννήτρια διανυσματικού σήματος συνδέθηκε από την έξοδό της «RF Out» με την υποδοχή της κατευθυντικής κεραίας, μέσω του καλωδίου RF. Σε οριζόντια απόσταση 64 cm από την πρόσοψη της, τοποθετήθηκε το κέντρο της κυλινδρικής κεφαλής της πανκατευθυντικής κεραίας, η οποία περιβαλλόταν περιμετρικά και ομόκεντρα, με τροχιά 5 cm από την επιφάνεια αναφοράς 2 και 5,5 cm από την επιφάνεια αναφοράς 1 του πειράματος, που είχαν το ύψος της αξιολογούμενης ασπίδας. Ο χώρος ανάμεσα στις επιφάνειες αναφοράς ήταν κενός στο πρώτο στάδιο του πειράματος ενώ καταλαμβανόταν από το αξιολογούμενο υλικό στο δεύτερο στάδιο. Η πανκατευθυντική κεραία συνδέθηκε με την είσοδο «RF In» του οργάνου N9915A με λειτουργία αναλυτή φάσματος.

Η πρώτη κεραία θεωρήθηκε ως η κεραία εκπομπής και η δεύτερη ως η κεραία λήψης. Η γεννήτρια και ο αναλυτής συνδέθηκαν με καλώδια «Ethernet» στο τοπικό δίκτυο υπολογιστών. Ο υπολογιστής ελέγχου συνδέθηκε στο ίδιο δίκτυο από φυσικό σημείο εκτός του περιβάλλοντος της διάταξης.

Το σχήμα 10.1 αναπαριστά τις θέσεις των αντικειμένων στην διάταξη μέτρησης και οι εικόνες 10.1 και 10.2 είναι φωτογραφίες της όψης της πραγματικής διάταξης κατά την διεξαγωγή του πρώτου και του δεύτερου σταδίου αντίστοιχα.



Σχήμα 10.1: Σχηματική διάταξη πρώτου πειράματος



Εικόνα 10.1: Διάταξη πρώτου σταδίου πρώτου πειράματος



Εικόνα 10.2: Διάταξη δεύτερου σταδίου δεύτερου πειράματος

10.1.2. Εκτέλεση μετρήσεων

Αφού συναρμολογήθηκε η διάταξη, μέσω του υπολογιστή, ενεργοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα της παρούσας εργασίας.

Στην καρτέλα «Γεννήτρια κυμάτων», εισάχθηκε η τρέχουσα τετραμελής διεύθυνση «IP» της γεννήτριας που εξαρτάται από το τοπικό δίκτυο και επιλέχθηκε το πλήκτρο «Σύνδεση». Μετά, επιλέχθηκε η κουκίδα «Επαναλαμβανόμενες παραγωγές σημάτων». Στο ίδιο πλαίσιο επιλογών, η ισχύς ορίστηκε 0 dBm ή 1 mW, η αρχική συχνότητα 450 MHz, η τελική συχνότητα 6 GHz και το πλήθος παραγωγών 445.

Στην συνέχεια, στην καρτέλα «Αναλυτής φάσματος», εισάχθηκε η αντίστοιχη διεύθυνση «IP» του οργάνου N9915A και επιλέχθηκε το πλήκτρο «Σύνδεση». Οι κουκίδες «Λειτουργία ως αναλυτής φάσματος» και «Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σημάτων γεννήτριας» ήταν επιλεγμένες. Κατά αυτή τη διαδικασία, πραγματοποιήθηκαν τα εξής:

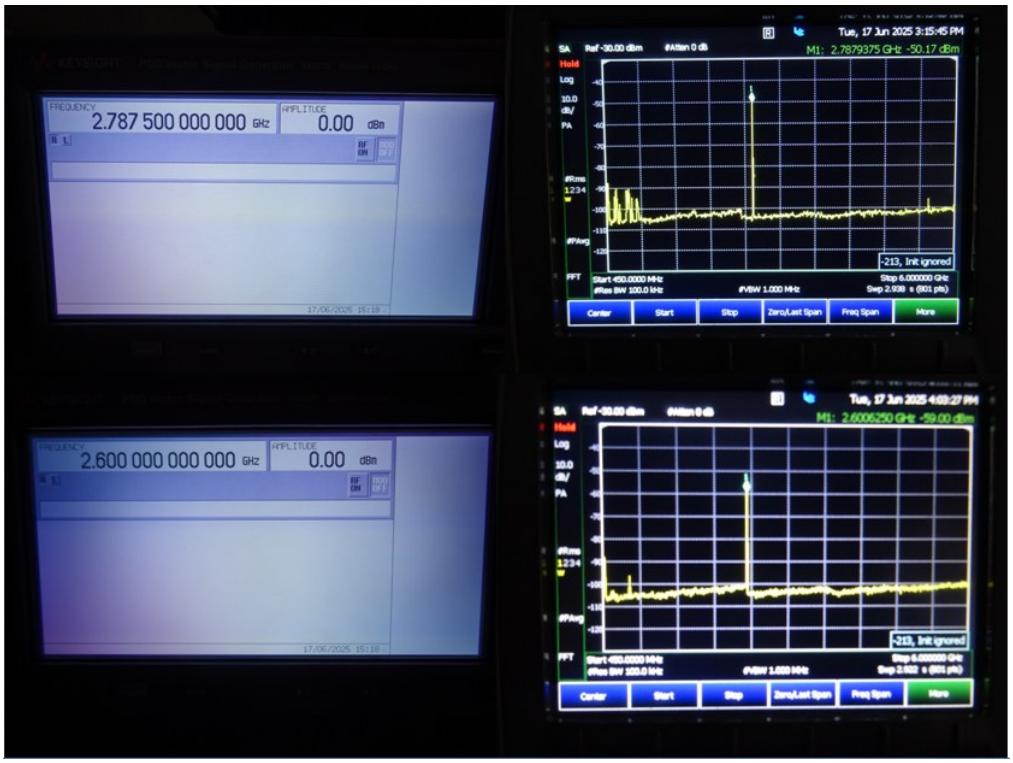
Το λογισμικό συνδέθηκε με την γεννήτρια, με χρήση των πρωτοκόλλων «TCP», «IP» και «VISA» και καθορίστηκε η ισχύς ενός δοκιμαστικού σήματος που θα οδηγούταν στην κεραία εκπομπής. Μετά, επιλέχθηκε το πλήθος τους και το εύρος ζώνης εντός του οποίου θα είχαν συχνότητα. Ο αναλυτής συνδέθηκε αντιστοίχως.

Ακολούθως, ελέγχθηκε ότι ο χώρος αναφοράς καταλαμβανόταν από το πειραματικό κενό και επιλέχθηκε το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης». Με αυτήν την πράξη, ολοκληρώνοντας το πρώτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε η εξής ακολουθία:

Πυροδοτήθηκαν η παραγωγή από τη γεννήτρια και εκπομπή δοκιμαστικού σήματος δια μέσου των επιφανειών αναφοράς, η ανίχνευση του εύρους από τον αναλυτή και λήψη του σήματος, η καταγραφή του στην διεπαφή εξόδου του αναλυτή και η αποθήκευσή του στον υπολογιστή. Η πυροδότηση έγινε, αυτόματα, 445 φορές, για δοκιμαστικά σήματα με συχνότητες ανά ίσα διαστήματα από 450 έως 6000 MHz. Ο χρόνος της ακολουθίας, λόγω των ενσωματωμένων παύσεων για αξιόπιστη επικοινωνία, ήταν 47,5 λεπτά.

Τέλος, ως δεύτερο στάδιο, ελέγχθηκε ότι ο χώρος αναφοράς καταλαμβανόταν από το αξιολογούμενο υλικό και, χωρίς καμία αλλαγή παραμέτρων, επιλέχθηκε ξανά το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης». Με αυτήν την πράξη, επαναλήφθηκε η παραπάνω ακολουθία.

Οι εικόνα 10.3 περιέχει φωτογραφία της οθόνης της γεννήτριας και φωτογραφία της οθόνης του αναλυτή για τη συχνότητα 2787,5 MHz στο πρώτο στάδιο και τις αντίστοιχες φωτογραφίες για τη συχνότητα 2600 στο δεύτερο στάδιο του πειράματος.



Εικόνα 10.3: Φωτογραφίες από οθόνες γεννήτριας και αναλυτή στα δύο στάδια του πρώτου πειράματος

10.1.3. Επεξεργασία δεδομένων

Στο τέλος κάθε σταδίου, το πρόγραμμα δημιούργησε ένα ηλεκτρονικό αρχείο «.xlsx» που περιείχε έναν πίνακα με τις καταγεγραμμένες τιμές των σημάτων ισχύος στη διεπαφή εξόδου του αναλυτή σε συνάρτηση με τις τιμές της συχνότητάς τους, καθώς και την αντίστοιχη γραφική παράσταση.

Οι τιμές του δεύτερου σταδίου αντιπροσωπεύουν την εξαρτημένη από τη συχνότητα «διεισδύσασα την ασπίδα s» ισχύ $\mathrm{P}_{\mathrm{s},\mathrm{e}_1,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$, στο περιβάλλον του πειράματος e_1, που συμπεριλαμβάνει απώλειες διάδοσης στο χώρο, στις επαφές και κατά μήκος των ζεύξεων, ενίσχυση από την κεραία και ενίσχυση από τον αναλυτή προς διόρθωση θορύβου για κάθε διαδιδόμενο ΗΜ κύμα. Αντιστοίχως, οι τιμές του πρώτου σταδίου αντιπροσωπεύουν την εξαρτημένη από τη συχνότητα ισχύ $\mathrm{P}_{\mathrm{e}_1,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$ που «διείσδυσε» το ίδιο πειραματικό περιβάλλον, χωρίς την ασπίδα s.

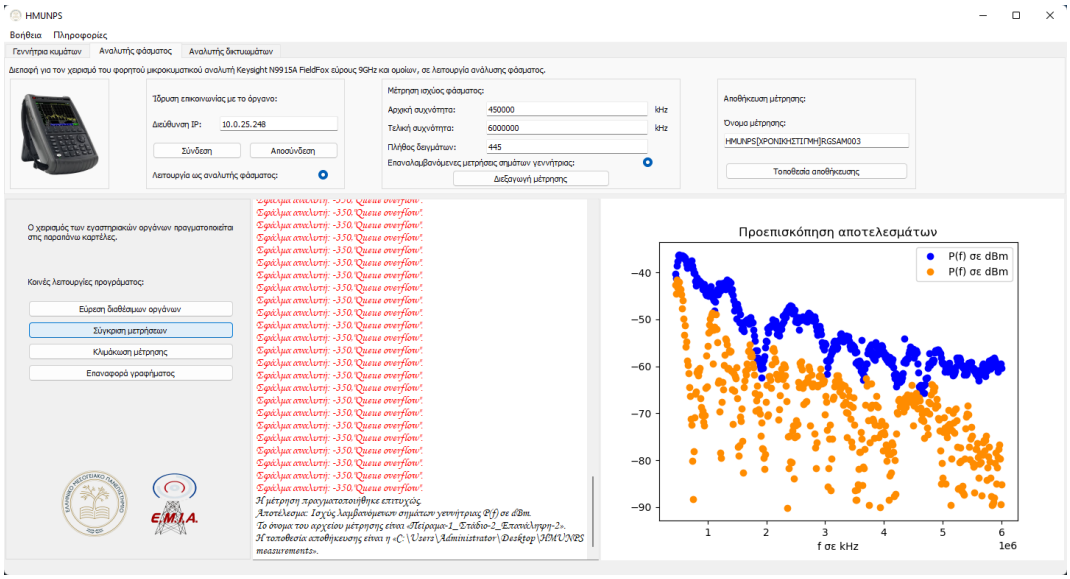
Οι δύο ισχύεις μετρήθηκαν σε dBm. Σύμφωνα με την σχέση (8.18), συγκρίνοντάς τις, παράγεται το μέγεθος της εξασθένησης μετάδοσης $\mathrm{TA}_{\mathrm{s}}(\mathrm{f})$, χαρακτηριστικό μόνο της αξιολογούμενης ασπίδας s. Ωστόσο, το πραγματικό αποτέλεσμα επιφυλάσσεται την αβεβαιότητα της πειραματικής διαδικασίας e_1 από τους τυχαίους παράγοντες και, για λόγους αναφοράς, γράφεται $\mathrm{TA}_{\mathrm{s},\mathrm{e}_1}(\mathrm{f})$. Η σύγκριση φαίνεται στην εξίσωση (10.1). Το αποτέλεσμα εκφράζει επίσης τον λογάριθμο του λόγου των δύο ισχύων, εκφρασμένων σε απόλυτες μονάδες.

$$\mathrm{TA}_{\mathrm{s},\mathrm{e}_1}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dB}) = \mathrm{P}_{\mathrm{e}_1,\mathrm{out}}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dBm}) - \mathrm{P}_{\mathrm{s},\mathrm{e}_1,\mathrm{out}}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dBm}) \tag{10.1}$$

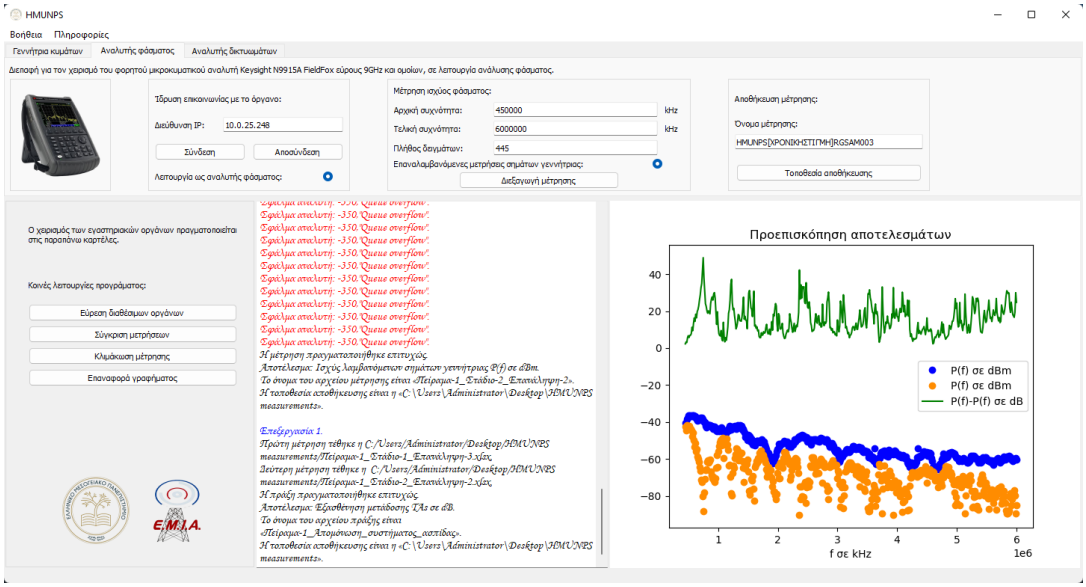
Στην πράξη, επιλέχθηκε το πλήκτρο «Σύγκριση μετρήσεων» της συμπληρωματικής στήλης του κυρίου παραθύρου του λογισμικού. Ως αρχείο 1 επιλέχθηκε το αρχείο της μέτρησης του πρώτου σταδίου και ως αρχείο 2 το αρχείο της μέτρησης του δεύτερου σταδίου. Ο τελεστής της πράξης τέθηκε «-». Έτσι, ο πίνακας των τιμών $\mathrm{P}_{\mathrm{s},\mathrm{e}_1,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$ του δεύτερου σταδίου αφαιρέθηκε ανά στοιχείο από τον πίνακα των τιμών $\mathrm{P}_{\mathrm{e}_1,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$ του πρώτου σταδίου και δημιουργήθηκε ένας τρίτος πίνακας τιμών, της $\mathrm{TA}_{\mathrm{s},\mathrm{e}_1}(\mathrm{f})$, ίσων διαστάσεων με τους δύο αρχικούς, συναρτήσει των αντίστοιχων συχνοτήτων που ήταν κοινές. Αυτόματα, αυτός ο πίνακας παραστάθηκε γραφικά και αποθηκεύτηκε σε ξεχωριστό αρχείο.

Η εικόνα 10.4 είναι το στιγμιότυπο του παραθύρου του λογισμικού, αμέσως μετά το τέλος του δεύτερου σταδίου. Στο πλαίσιο γραφημάτων φαίνονται οι 445 διακριτές τιμές της ισχύος $\mathrm{P}_{\mathrm{e}_1,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$ του πρώτου σταδίου, με μπλε χρώμα, και οι 445 διακριτές τιμές της ισχύος $\mathrm{P}_{\mathrm{s},\mathrm{e}_1,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$, με πορτοκαλί. Παρατηρείται η μείωση που οφείλεται στην εισαγωγή της θωράκισης και ότι, στην περίπτωση της πειραματικής θωράκισης, είναι ασταθής. Τα σφάλματα που αναγράφονται στην οθόνη δεν είναι παρά προειδοποιήσεις από τον αναλυτή ότι η πρόσφατη μνήμη υπερχείλισε από προειδοποιήσεις του ότι δεν του ζητήθηκε η επιστροφή των αποτελεσμάτων ορισμένων ανιχνεύσεων. Αυτό ήταν σκόπιμο καθώς το λογισμικό είχε προγραμματιστεί να πραγματοποιεί προκαταρκτικές ανιχνεύσεις για τη

σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων. Το στιγμιότυπο της εικόνας 10.5 λήφθηκε από το παράθυρο του λογισμικού αμέσως μετά το τέλος της σύγκρισης των μετρήσεων και το τέλος του πειράματος. Το γράφημα της εξασθένισης μετάδοσης $TA_{s,e_1}(f)$ εμφανίζεται με πράσινο χρώμα.



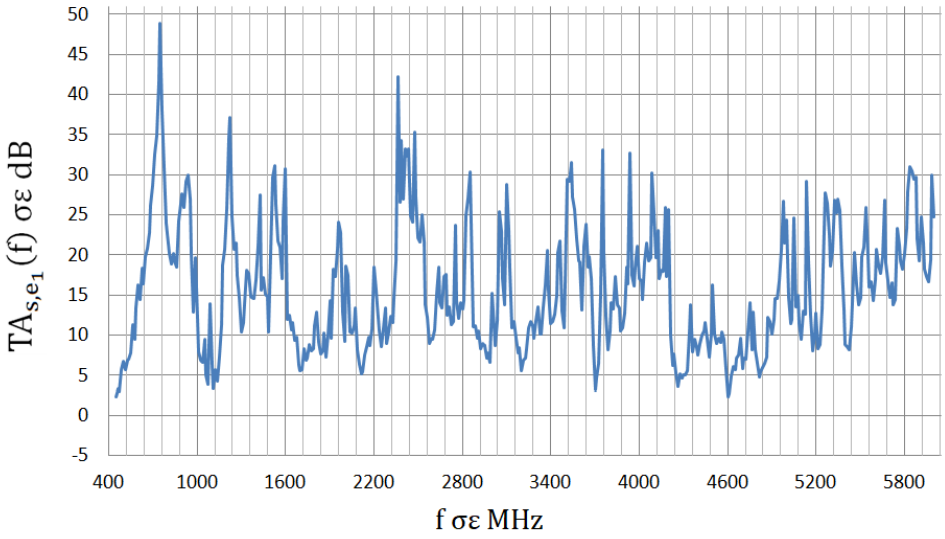
Εικόνα 10.4: Στιγμιότυπο λογισμικού μετά από δεύτερο στάδιο πρώτου πειράματος



Εικόνα 10.5: Στιγμιότυπο λογισμικού μετά από τέλος πρώτου πειράματος

10.1.4. Αποτελέσματα πειράματος

Η γραφική παράσταση της εξασθένησης μετάδοσης της αξιολογούμενης ασπίδας ως προς τη συχνότητα, που προέκυψε από το πρώτο πείραμα, εμφανίζεται αναλυτικά παρακάτω.



Σχήμα 10.2: Γραφική παράσταση αποτελέσματος εξασθένησης μετάδοσης ασπίδας s πρώτου πειράματος

10.2. Πείραμα δεύτερο

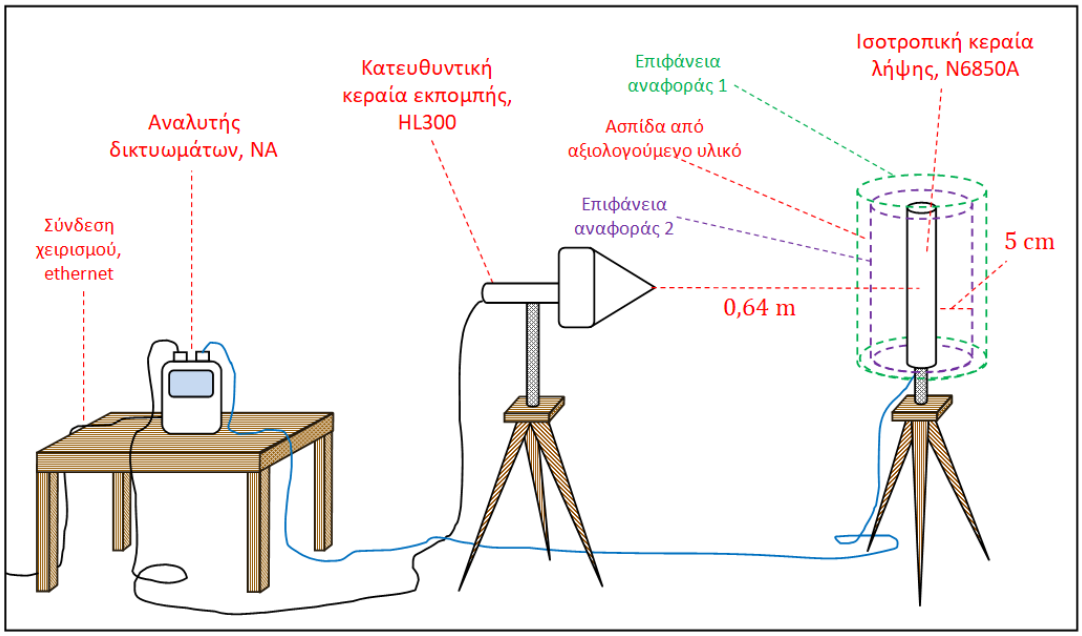
Στο δεύτερο πείραμα, μετρήθηκε η εξασθένηση μετάδοσης της κυλινδρικής ασπίδας του πίνακα 10.1 στο ζητούμενο εύρος ζώνης, μέσω της ανάλυσης ενός μεταβλητού συστήματος εκπομπής – λήψης ως συσκευή ενίσχυσης δοκιμαστικών ΗΜ κυμάτων, από τον αναλυτή δικτυωμάτων. Το πείραμα αποτελεί δοκιμή της δεύτερης εργαστηριακής μεθόδου.

10.2.1. Διάταξη πειράματος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε κλειστό χώρο. Το όργανο N9915A με λειτουργία αναλυτή δικτυωμάτων συνδέθηκε από την έξοδό του «RF Out» με την υποδοχή της κατευθυντικής κεραίας, μέσω του καλωδίου RF. Σε οριζόντια απόσταση 0,64 m από την πρόσοψη της, τοποθετήθηκε το κέντρο της κυλινδρικής κεφαλής της πανκατευθυντικής κεραίας, η οποία περιβαλλόταν περιμετρικά και ομόκεντρα, με τροχιά 5 cm από την επιφάνεια αναφοράς 2 και 5,5 cm από την επιφάνεια αναφοράς 1 του πειράματος, που είχαν το ύψος της κυλινδρικής ασπίδας. Ο χώρος ανάμεσα στις επιφάνειες αναφοράς καταλαμβανόταν από το πειραματικό κενό, κατά το πρώτο στάδιο του πειράματος και από την αξιολογούμενη ασπίδα στο δεύτερο στάδιο. Η δεύτερη κεραία συνδέθηκε με την είσοδο «RF In» του αναλυτή δικτυωμάτων.

Η πρώτη κεραία θεωρήθηκε ως η κεραία εκπομπής και η δεύτερη ως η κεραία λήψης. Ο αναλυτής συνδέθηκε με καλώδιο «Ethernet» στο τοπικό δίκτυο υπολογιστών. Ο φορητός υπολογιστής συνδέθηκε στο ίδιο δίκτυο από φυσικό σημείο εκτός του περιβάλλοντος της διάταξης.

Το σχήμα 10.3 αναπαριστά τις θέσεις των αντικειμένων στην διάταξη μέτρησης και οι εικόνες 10.6 και 10.7 είναι φωτογραφίες της όψης της πραγματικής διάταξης κατά την διεξαγωγή του πρώτου και του δεύτερου σταδίου αντίστοιχα.



Σχήμα 10.3: Αναπαράσταση διάταξης δεύτερου πειράματος



Εικόνα 10.6: Διάταξη πρώτου σταδίου δεύτερου πειράματος



Εικόνα 10.7: Διάταξη δεύτερου σταδίου δεύτερου πειράματος

10.2.2. Εκτέλεση μετρήσεων

Μέσω του υπολογιστή, ενεργοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα της παρούσας εργασίας.

Στην καρτέλα «Αναλυτής δικτυωμάτων», εισάχθηκε η τρέχουσα διεύθυνση «IP» του οργάνου N9915A που εξαρτάται από το τοπικό δίκτυο και επιλέχθηκε το πλήκτρο «Σύνδεση». Μετά, επιλέχθηκε η κουκίδα «Λειτουργία ως αναλυτής δικτυωμάτων». Στο πλαίσιο επιλογών «Μέτρηση παραμέτρων σκέδασης συστήματος», ορίστηκε η αρχική συχνότητα 450000 kHz, η τελική 6000000 kHz, το πλήθος δειγμάτων 801 και επιλέχθηκε η κουκίδα «Παράμετρος S21».

Κατά την παραπάνω διαδικασία, το λογισμικό συνδέθηκε με τον αναλυτή δικτυωμάτων, με χρήση των πρωτοκόλλων «TCP», «IP» και «VISA» και καθορίστηκαν το εύρος ζώνης και το πλήθος δειγματοληψίας της ανίχνευσης. Ύστερα, επιλέχθηκε η μέτρηση της παραμέτρου διάδοσης του συστήματος το οποίο σχηματίστηκε από την έξοδό εκπομπής του αναλυτή έως την είσοδό λήψης του και περιλαμβάνει τις επιφάνειες αναφοράς.

Αφού ελέγχθηκε ότι ο χώρος αναφοράς ήταν κενός, επιλέχθηκε το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης». Με την πράξη αυτή, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες ενέργειες:

Ο αναλυτής εκτέλεσε ανίχνευση υπολογίζοντας την παράμετρο διάδοσής S_{21} του συστήματος από την αλλοίωση 801 δοκιμαστικών σημάτων σε αυτό με συχνότητες ανά ίσα διαστήματα από 450 MHz έως 6 GHz. Ύστερα, οι υπολογισμοί αποθηκεύτηκαν. Ο χρόνος της διαδικασίας ήταν αμελητέος.

Έτσι τελείωσε το πρώτο στάδιο. Αμέσως μετά, ανάμεσα στις επιφάνειες αναφοράς τοποθετήθηκε η αξιολογούμενη ασπίδα και, χωρίς καμία αλλαγή ρυθμίσεων, επιλέχθηκε ξανά το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης». Η πράξη αυτή προκάλεσε την επανάληψη των παραπάνω ενεργειών στο σύστημα διάδοσης. Έτσι τελείωσε το δεύτερο στάδιο.

10.2.3. Επεξεργασία δεδομένων

Στο τέλος κάθε σταδίου, το λογισμικό δημιούργησε ένα ηλεκτρονικό αρχείο «.xlsx» που περιείχε έναν πίνακα με τις μετρημένες τιμές, σε decibel, της παραμέτρου διάδοσης S_{21}του συστήματος από την έξοδο εκπομπής στην είσοδο λήψης του αναλυτή σε αντιστοιχία με τις τιμές της συχνότητας f. Τα αρχεία περιείχαν επίσης και τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

Οι τιμές του δεύτερου σταδίου αντιπροσωπεύουν την εξαρτημένη από τη συχνότητα παράμετρο $S_{21,s,e_2}(\mathrm{f})$, του συστήματος που εμπεριέχει την ασπίδα s και συμπεριλαμβάνει απώλειες διάδοσης στο χώρο, στις επαφές και κατά μήκος των ζεύξεων και ενίσχυση από την κεραία για κάθε διαδιδόμενο ΗΜ κύμα. Αντιστοίχως, οι τιμές του πρώτου σταδίου αντιπροσωπεύουν την εξαρτημένη από τη συχνότητα παράμετρο $S_{21,e_2}(\mathrm{f})$ του ίδιου συστήματος, χωρίς την ασπίδα s.

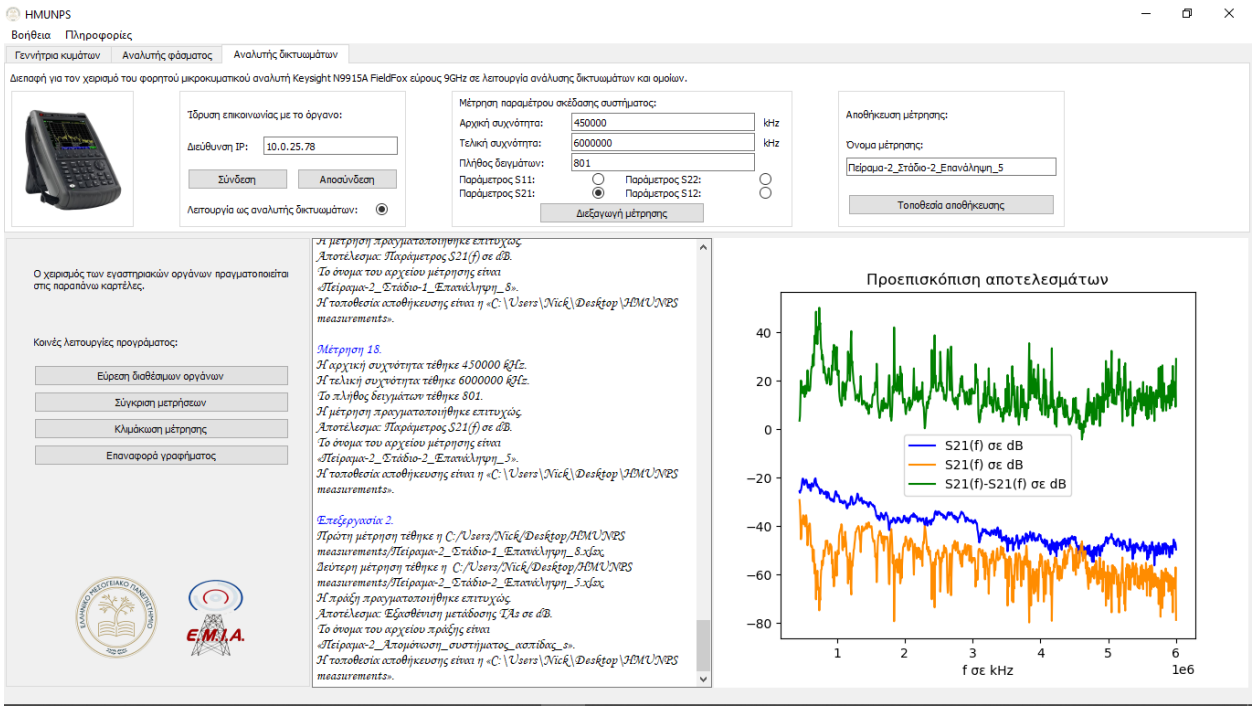
Οι δύο παράμετροι μετρήθηκαν σε dBm. Σύμφωνα με την σχέση (8.20), συγκρίνοντάς τις, παράγεται το μέγεθος της εξασθένησης μετάδοσης $TA_s(\mathrm{f})$, χαρακτηριστικό μόνο της αξιολογούμενης ασπίδας s. Ωστόσο, το πραγματικό αποτέλεσμα επιφυλάσσεται την αβεβαιότητα της πειραματικής διαδικασίας e_2 από τους τυχαίους παράγοντες και, για λόγους αναφοράς, γράφεται $TA_{s,e_2}(\mathrm{f})$. Η σύγκριση φαίνεται στην (10.2).

$$TA_{s,e_2}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dB}) = S_{21,e_2}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dB}) - S_{21,s,e_2}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dB}) \tag{10.2}$$

Στην πράξη, επιλέχθηκε το πλήκτρο «Σύγκριση μετρήσεων» της συμπληρωματικής στήλης του κυρίου παραθύρου του λογισμικού. Στο παράθυρο της λειτουργίας, επιλέχθηκε ως πρώτο, το αρχείο μέτρησης του πρώτου σταδίου και ως δεύτερο το αρχείο μέτρησης του δεύτερου σταδίου και ο τελεστής της πράξης τέθηκε «-». Έτσι, ο πίνακας των τιμών $S_{21,s,e_2}(\mathrm{f})$ του δεύτερου σταδίου αφαιρέθηκε ανά στοιχείο από τον πίνακα των τιμών $S_{21,e_2}(\mathrm{f})$ του πρώτου σταδίου και δημιουργήθηκε ένας τρίτος πίνακας τιμών, της $TA_{s,e_2}(\mathrm{f})$, ίσων διαστάσεων με τους δύο αρχικούς, συναρτήσει των αντίστοιχων

συχνοτήτων f που ήταν κοινές. Αυτόματα, αυτός ο πίνακας παραστάθηκε γραφικά και αποθηκεύτηκε σε νέο αρχείο.

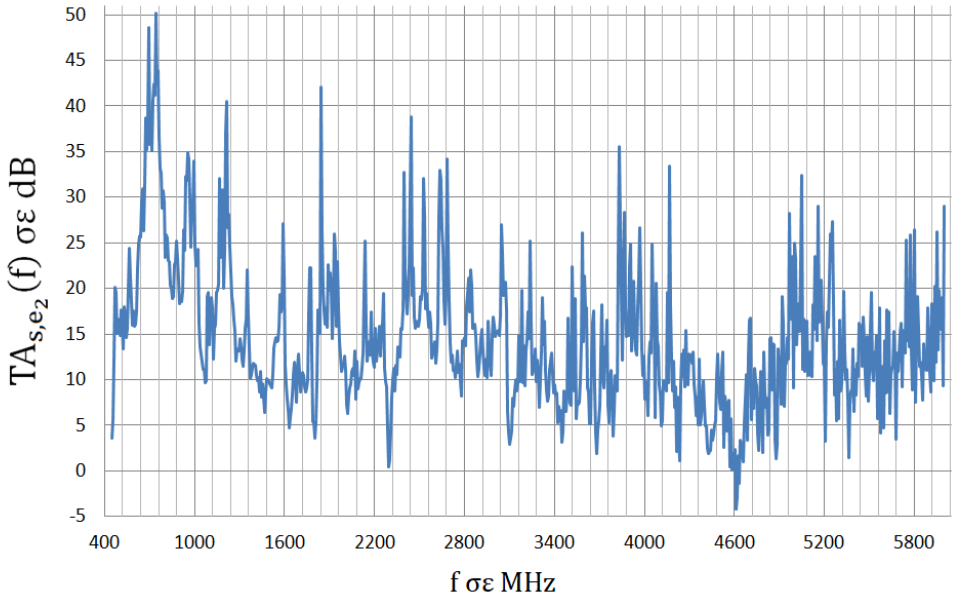
Η εικόνα 10.8 παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του παραθύρου χειρισμού του αναλυτή δικτυωμάτων του λογισμικού της εργασίας μετά την πραγματοποίηση του πειράματος, όπου φαίνονται οι ρυθμίσεις που εισάχθηκαν και οι αποκρίσεις του. Στο πλαίσιο γραφημάτων του στιγμιότυπου απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων του πρώτου σταδίου με μπλε, του δεύτερου σταδίου με πορτοκαλί και της διαφοράς τους με πράσινο.



Εικόνα 10.8: Στιγμιότυπο παραθύρου του λογισμικού κατά την ολοκλήρωση του δεύτερου πειράματος

10.2.4. Αποτελέσματα πειράματος

Η παρακάτω γραφική παράσταση είναι η εξασθένιση μετάδοσης της αξιολογούμενης ασπίδας σε διαδιδόμενα σε αυτήν δοκιμαστικά κύματα ως προς τη συχνότητα τους, που μετρήθηκε στο δεύτερο πείραμα.



Σχήμα 10.4: Γραφική παράσταση αποτελέσματος εξασθένησης μετάδοσης ασπίδας s δεύτερου πειράματος

10.3. Πείραμα τρίτο

Στο τελευταίο πείραμα, μετρήθηκε, από τον αναλυτή φάσματος, η εξασθένηση μετάδοσης της κυλινδρικής ασπίδας, σε εξωτερικό χώρο, χρησιμοποιώντας έκθεση σε τυπική αστική ακτινοβολία των εμπορικών υπηρεσιών επικοινωνιών σε συνάρτηση με την συχνότητά της. Το πείραμα αποτελεί δοκιμή της τρίτης εργαστηριακής μεθόδου.

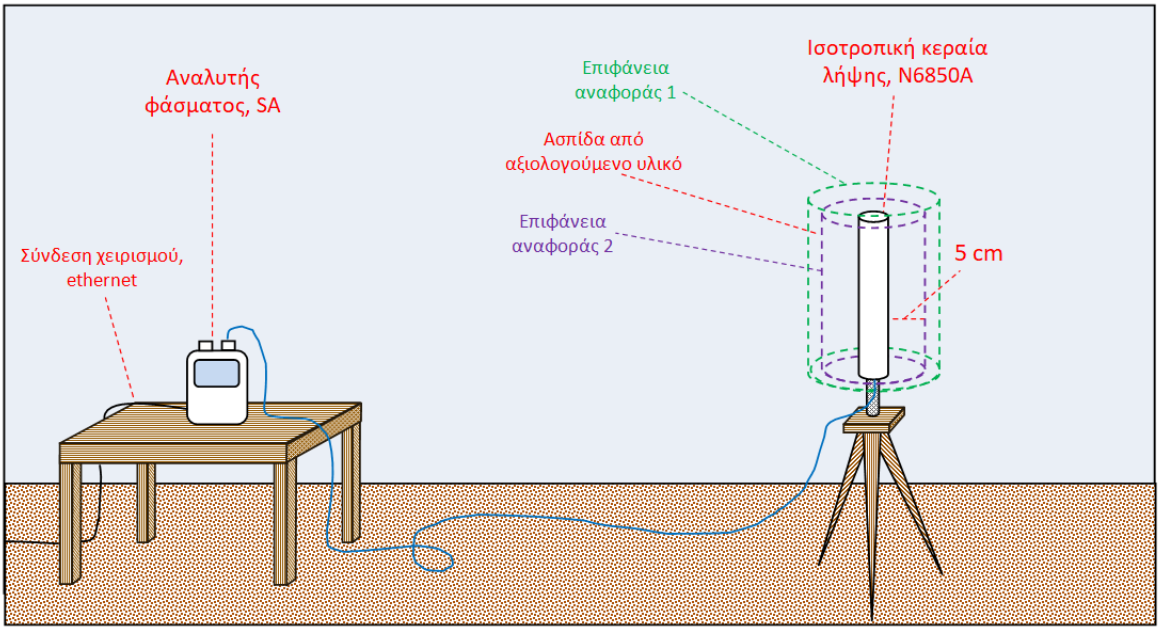
10.3.1. Διάταξη πειράματος

Το όργανο N9915A σε λειτουργία αναλυτή φάσματος συνδέθηκε από την είσοδό του «RF In», μέσω καλωδίου RF, στην υποδοχή της πανκατευθυντικής κεραίας, η οποία βρισκόταν σε εξωτερικό χώρο.

Στο πρώτο στάδιο του πειράματος, η κεραία ήταν ακάλυπτη. Στο δεύτερο στάδιο, η κεραία ήταν καλυμμένη περιμετρικά με απόσταση 5 cm από την αξιολογούμενη ασπίδα με πάχος 5 mm. Η εσωτερική και η εξωτερική επιφάνεια της ασπίδας, θεωρήθηκαν οι επιφάνειες αναφοράς 2 και 1 του πειράματος αντίστοιχα.

Η κεραία θεωρήθηκε ως κεραία λήψης. Ο αναλυτής συνδέθηκε με καλώδιο «Ethernet» στο τοπικό δίκτυο υπολογιστών. Ο φορητός υπολογιστής συνδέθηκε στο ίδιο δίκτυο από φυσικό σημείο εκτός του περιβάλλοντος της διάταξης. Η τοποθεσία στην οποία έγινε το πείραμα ήταν προαστιακή με πλήρη παροχή όλων των κοινών σύγχρονων ασυρμάτων υπηρεσιών. Οι άμεσες και έμμεσες διευθύνσεις διάδοσης καθώς και οι στάθμες ισχύος ήταν ουσιαστικά οι ίδιες που, οι σταθμοί εκπομπής είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε να, αναχαιτίζει ο τυχαίος παρατηρητής.

Το σχήμα 10.5 αναπαριστά τις θέσεις των αντικειμένων στην διάταξη μέτρησης και οι εικόνες 10.9 και 10.10 είναι φωτογραφίες της όψης της πραγματικής διάταξης λήψης, κατά την διεξαγωγή του πρώτου και του δεύτερου σταδίου αντίστοιχα.



Σχήμα 10.5: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης τρίτου πειράματος



Εικόνα 10.9: Διάταξη λήψης πρώτου σταδίου τρίτου πειράματος



Εικόνα 10.10: Διάταξη λήψης δεύτερου σταδίου τρίτου πειράματος

10.3.2. Εκτέλεση μετρήσεων

Μέσω του υπολογιστή, ενεργοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα της παρούσας εργασίας.

Στην καρτέλα «Αναλυτής φάσματος», εισάχθηκε η τρέχουσα διεύθυνση «IP» του οργάνου N9915A, που εξαρτάται από το τοπικό δίκτυο και επιλέχθηκε το πλήκτρο «Σύνδεση». Στο πλαίσιο «Μέτρηση ισχύος φάσματος», ορίστηκε η αρχική συχνότητα 450 MHz, η τελική 6 GHz και το πλήθος δειγμάτων 801, ενώ δεν ήταν επιλεγμένη η κουκίδα «Επαναλαμβανόμενες παραγωγές σημάτων». Έτσι, το λογισμικό συνδέθηκε με τον αναλυτή, με χρήση των πρωτοκόλλων «TCP», «IP» και «VISA» και καθορίστηκαν το εύρος ζώνης και το πλήθος δειγματοληψίας της ανίχνευσης που θα πραγματοποιήσει.

Μετά, ελέγχθηκε ότι η κεραία ήταν ακάλυπτη και επιλέχθηκε το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης» Έτσι, ολοκληρώθηκε το πρώτο στάδιο του πειράματος αφού πρώτα προκλήθηκαν οι εξής ενέργειες:

Πυροδοτήθηκε η καταγραφή της ισχύος που δεχόταν η κεραία λήψης, μεταφερόμενης από την ακτινοβολία που διαπέρνούσε τις επιφάνειες αναφοράς. Η ανίχνευση διενεργήθηκε, αυτόματα, από συνεχόμενη, δηλαδή επαναλαμβανόμενη, καταγραφή ισχύος ακτινοβολίας σε 801 συχνοτικές τιμές, ανά ίσα διαστήματα από 450 έως 6000 MHz, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις. Μετά το τέλος της ανίχνευσης, οι μέγιστες καταγραφές ανά συχνότητα αποθηκεύτηκαν.

Στην συνέχεια, η κεραία καλύφθηκε με την αξιολογούμενη ασπίδα και, χωρίς καμία αλλαγή των ρυθμίσεων, πατήθηκε ξανά το πλήκτρο «Διεξαγωγή μέτρησης». Αυτό προκάλεσε την επανάληψη των παραπάνω ενεργειών και ολοκλήρωσε το δεύτερο στάδιο του πειράματος.

Το συγκεκριμένο πείραμα προγραμματίστηκε από το λογισμικό ώστε κάθε μία από τις δύο ανιχνεύσεις να είναι συνεχόμενη, για χρονικό διάστημα τεσσάρων λεπτών, και με συγκράτηση μεγίστων τιμών, για την αντιπροσώπευση της εκτεταμένης έκθεσης στα στιγμιαία κύματα έκθεσης από αστικές τηλεπικοινωνίες.

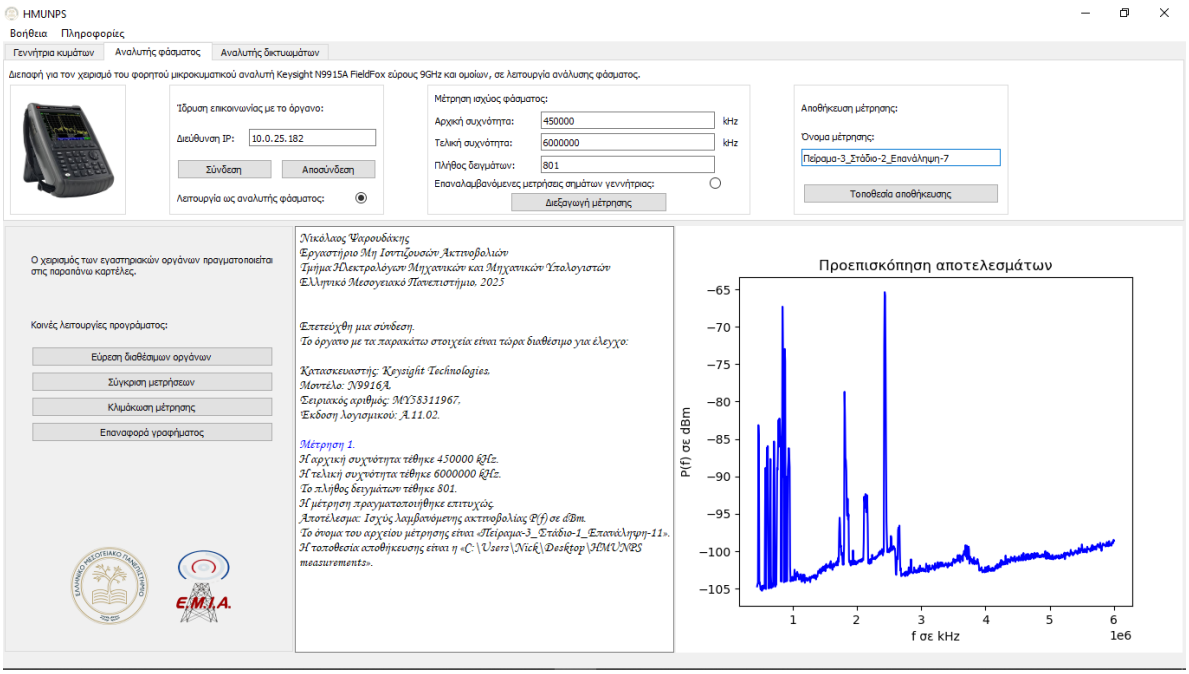
Η εικόνα 10.12 δείχνει την οθόνη του αναλυτή κατά της δύο ανιχνεύσεις, χωρίς την ασπίδα και με την ασπίδα, μαζί με την διάταξη του πειράματος.

10.3.3. Επεξεργασία δεδομένων

Στο τέλος κάθε σταδίου, το πρόγραμμα δημιούργησε ένα ηλεκτρονικό αρχείο «.xlsx» που περιέχει έναν πίνακα με τις τιμές των καταγεγραμμένων σημάτων ισχύος στην διεπαφή εξόδου του αναλυτή, σε συνάρτηση με τις τιμές της συχνότητας, καθώς και την αντίστοιχη γραφική παράσταση.

Οι τιμές του πρώτου σταδίου αντιπροσωπεύουν την, εξαρτημένη από τη συχνότητα, συνολική ισχύ $\mathrm{P}_{\mathrm{e}_3,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$ από έκθεση για τέσσερα λεπτά σε τυχαία αστική ακτινοβολία, η οποία λήφθηκε από την ακάλυπτη κεραία. Οι τιμές του δεύτερου σταδίου αντιπροσωπεύουν την ισχύ $\mathrm{P}_{\mathrm{s},\mathrm{e}_3,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$, της αντίστοιχης ακτινοβολίας, η οποία διαπέρασε την ασπίδα. Και τα δύο στάδια εισήγαγαν τις ίδιες απώλειες στις δύο ισχύες, εκτός από την απώλεια που οφείλεται στην ασπίδα. Οι δύο ισχύες μετρήθηκαν σε dBm.

Όπως παρατηρείται στο πλαίσιο γραφημάτων του παραθύρου του λογισμικού στο στιγμιότυπο της εικόνας 10.11, το οποίο καταγράφηκε αμέσως μετά την λήξη του πρώτου σταδίου, και στην οθόνη του αναλυτή στην πρώτη φωτογραφία της εικόνας 10.12, τα σήματα που λήφθηκαν αφορούν μόνο συγκεκριμένες συχνοτικές ζώνες, ενώ οι υπόλοιπες είναι ήσυχες εκτός από θόρυβο του υποβάθρου. Το σχήμα 10.6 είναι η μεγεθυμένη και αναλυτικότερη γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της ισχύος $\mathrm{P}_{\mathrm{e}_3,\mathrm{out}}(\mathrm{f})$ του πρώτου σταδίου. Εκεί μπορούν να διακριθούν καθαρά οι κατανεμημένες ζώνες των βασικών τηλεπικοινωνιών στην Ελλάδα, βάσει του πίνακα 2.1. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι στην τοποθεσία λαμβάνονται σήματα από ολόκληρη τη ζώνη της ψηφιακής τηλεόρασης, αλλά και σε χαμηλότερη συχνότητα από αυτήν, από τις ζώνες κινητής τηλεφωνίας, ονομαστικά 700, 800, 900, 1800, 2000 και 2600 MHz και λαμβάνονται τα ισχυρότερα σήματα από τη ζώνη 2,4 GHz, στην οποία λειτουργούν τα τοπικά δίκτυα πρωτοκόλλου WiFi.



Εικόνα 10.11: Στιγμιότυπο παραθύρου λογισμικού μετά από πρώτο στάδιο τρίτου πειράματος



Εικόνα 10.12: Οθόνη αναλυτή και διάταξη στα δύο στάδια του τρίτου πειράματος

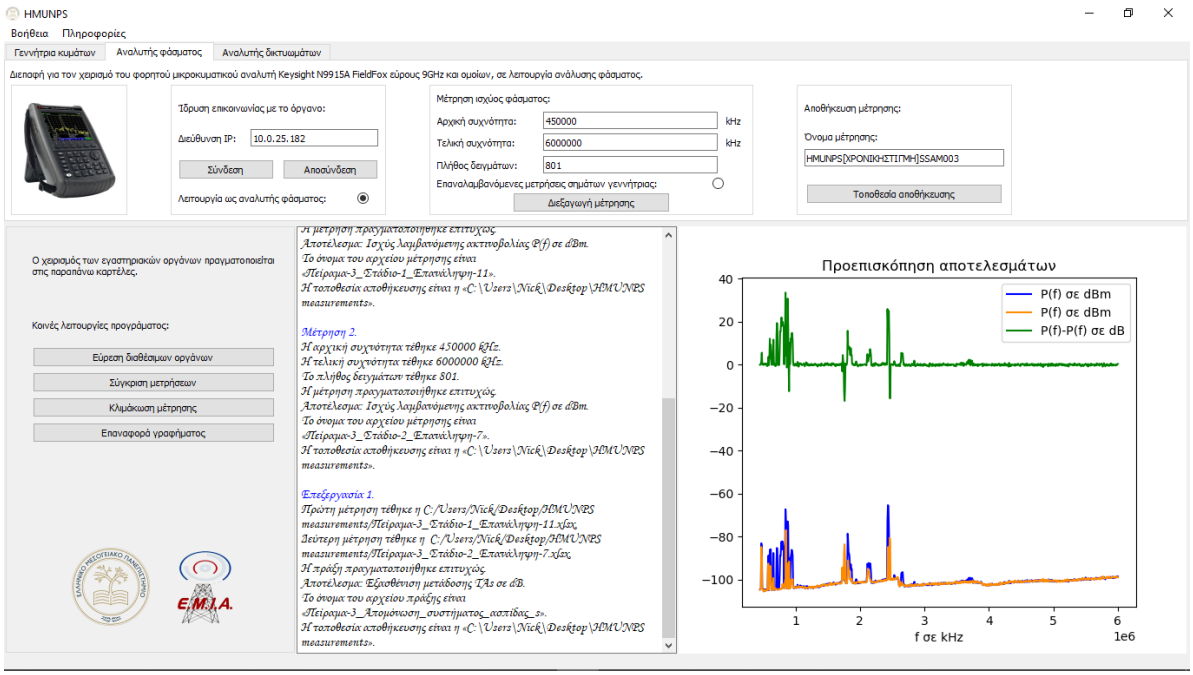
Η ισχύς $\mathrm{P}_{\mathrm{s,e_3,out}}(\mathrm{f})$ του δεύτερου σταδίου, που αντιστοιχεί στα εξασθενημένα από την θωράκιση σήματα των τηλεπικοινωνιών, παρατηρείται στην οθόνη του αναλυτή στην δεύτερη φωτογραφία της εικόνας 10.12 και στο γράφημα του στιγμιότυπου της εικόνας 10.13 με πορτοκαλί χρώμα, σε σχέση την $\mathrm{P}_{\mathrm{e_3,out}}(\mathrm{f})$ του πρώτου σταδίου με μπλε χρώμα, χωρίς την θωράκιση. Παρατηρείται ξανά ότι η απόσβεση είναι επιλεκτική ως προς τη συχνότητα.

Σύμφωνα με την σχέση (8.18), μόνο σε όσες συχνοτικές ζώνες έχουν τιμή μετρημένη από σήματα τηλεπικοινωνιών, η σύγκριση των δύο ισχύων, $\mathrm{P}_{\mathrm{e_3,out}}(\mathrm{f})$ και $\mathrm{P}_{\mathrm{s,e_3,out}}(\mathrm{f})$, παράγει το μέγεθος της εξασθένησης μετάδοσης $\mathrm{TA}_{\mathrm{s}}(\mathrm{f})$, χαρακτηριστικό μόνο της αξιολογούμενης ασπίδας s. Ωστόσο, το πραγματικό αποτέλεσμα επιφυλάσσεται την αβεβαιότητα της πειραματικής διαδικασίας $\mathrm{e_3}$ από τους τυχαίους παράγοντες και, για λόγους αναφοράς, γράφεται $\mathrm{TA}_{\mathrm{s,e_3}}(\mathrm{f})$. Επίσης, η ασυνέχεια των γραφικών παραστάσεων κάνει δύσκολο να χωριστούν οι έγκυρες από τις άκυρες συχνότητες. Παρ' όλα αυτά, η εξίσωση (10.3) δείχνει την προσεγγιστική τους σχέση. Το αποτέλεσμα εκφράζει τον λογάριθμο του λόγου των δύο ισχύων, όταν εκείνες εκφράζονται σε απόλυτες μονάδες.

$$\mathrm{TA}_{\mathrm{s,e_3}}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dB}) = \mathrm{P}_{\mathrm{e_3,out}}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dBm}) - \mathrm{P}_{\mathrm{s,e_3,out}}(\mathrm{f})\ (\mathrm{dBm}) \qquad (10.3)$$

Στην πράξη, για την σύγκριση επιλέχθηκε το πλήκτρο «Σύγκριση μετρήσεων» της συμπληρωματικής στήλης του κυρίου παραθύρου του λογισμικού. Στο παράθυρο που αναδύθηκε, ως αρχείο 1 επιλέχθηκε το αρχείο της μέτρησης του πρώτου σταδίου και ως αρχείο 2 το αρχείο της μέτρησης του δεύτερου

σταδίου. Ο τελεστής της πράξης τέθηκε «-». Έτσι, οι τιμές $P_{s,e_3,out}(f)$ του πίνακα του δεύτερου σταδίου αφαιρέθηκαν από τις αντίστοιχες τιμές $P_{e_3,out}(f)$ του πίνακα του πρώτου σταδίου και δημιουργήθηκε ένας τρίτος πίνακας των διαφορών $TA_{s,e_3}(f)$, ίσων διαστάσεων με τους δύο αρχικούς, συναρτήσει των κοινών συχνοτήτων. Αυτόματα, αυτός ο πίνακας παραστάθηκε γραφικά και αποθηκεύτηκε σε ξεχωριστό αρχείο.

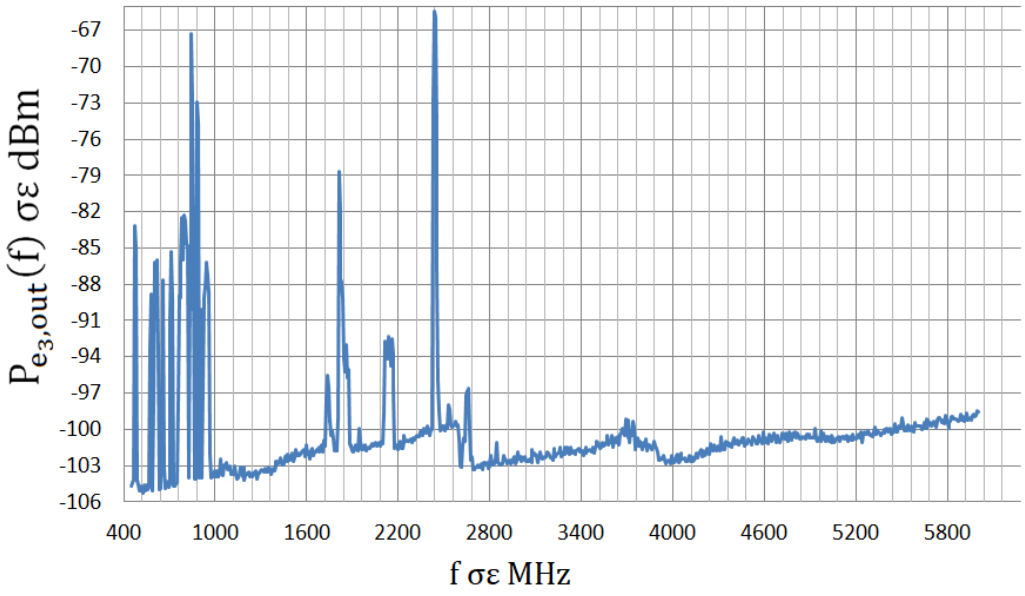


Εικόνα 10.13: Στιγμιότυπο παραθύρου του λογισμικού μετά το τέλος του τρίτου πειράματος

Στο πλαίσιο γραφημάτων του στιγμιότυπου της εικόνας 10.13, παρατηρείται πως προέκυψαν τρία διακριτά σφάλματα στην εξασθένηση μετάδοσης $TA_{s,e_3}(f)$, με πράσινο χρώμα, η οποία θα έπρεπε να ήταν πάντα θετική. Τα σφάλματα προέκυψαν λόγω της ασυνέχειας των τηλεπικοινωνιακών σημάτων και αποδίδονται στο ότι περισσότερα σήματα προέκυψαν κατά την ανίχνευση του δευτέρου σταδίου, οπότε, με τη σύγκριση, αφαιρέθηκαν από το μηδέν.

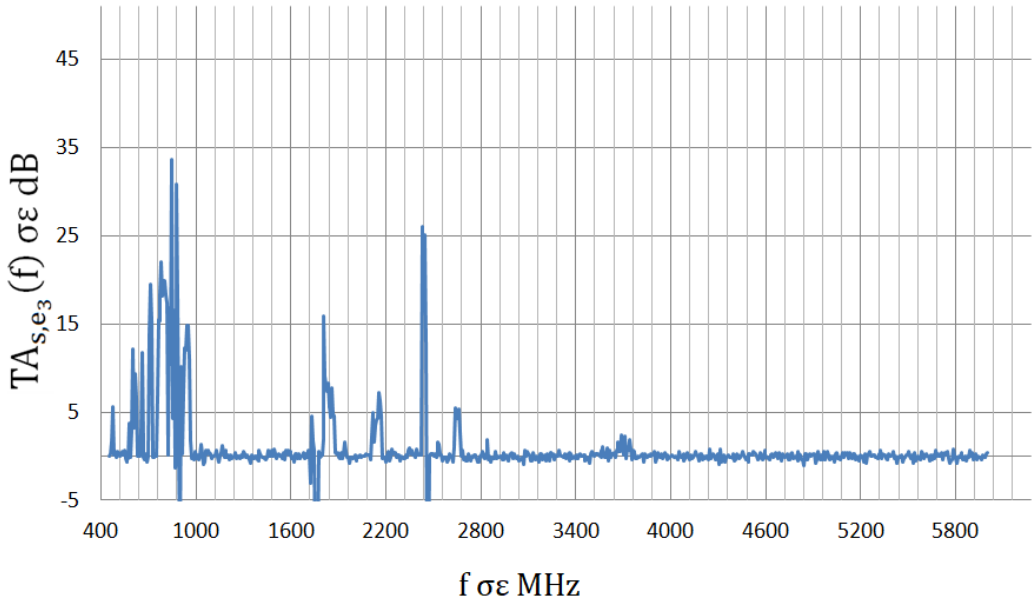
10.3.4. Αποτελέσματα πειράματος

Παρακάτω παρουσιάζεται η συνολική ισχύς στην έξοδο του αναλυτή από έκθεση σε τυπική αστική ακτινοβολία τηλεπικοινωνιών για τέσσερα λεπτά, ως προς τη συχνότητα:



Σχήμα 10.6: Γραφική παράσταση ισχύος έκθεσης σε τυπική αστική ραδιοακτινοβολία για τέσσερα λεπτά

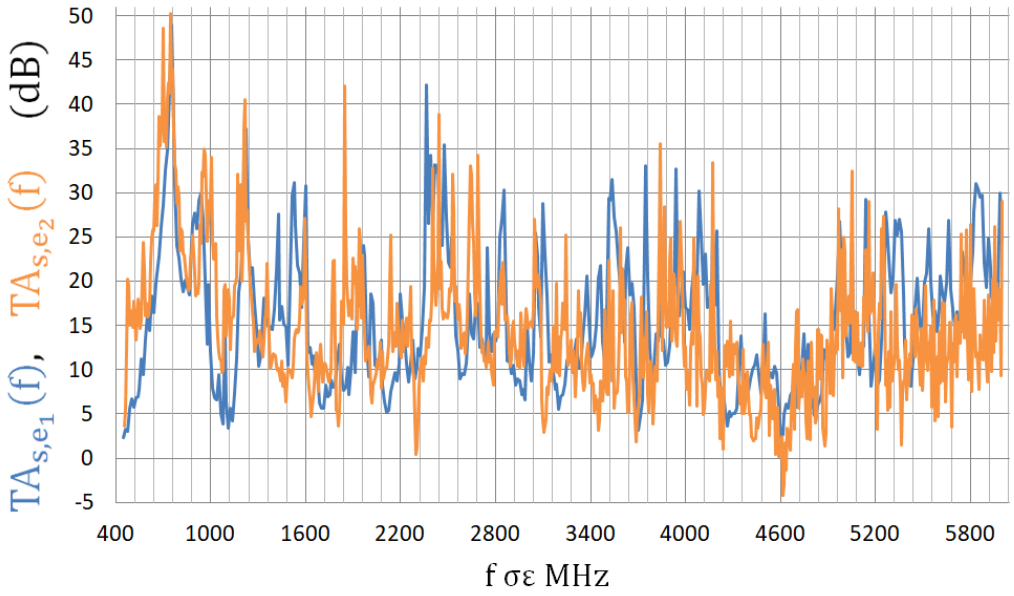
Παρακάτω, παρουσιάζεται η εξασθένηση μετάδοσης της κυλινδρικής ασπίδας, ως προς τη συχνότητα, όπως προέκυψε από έκθεση της σε τυπική αστική ακτινοβολία. Αλλιώς, τα σήματα της τυπικής ακτινοβολίας που απέρριψε η θωράκιση:



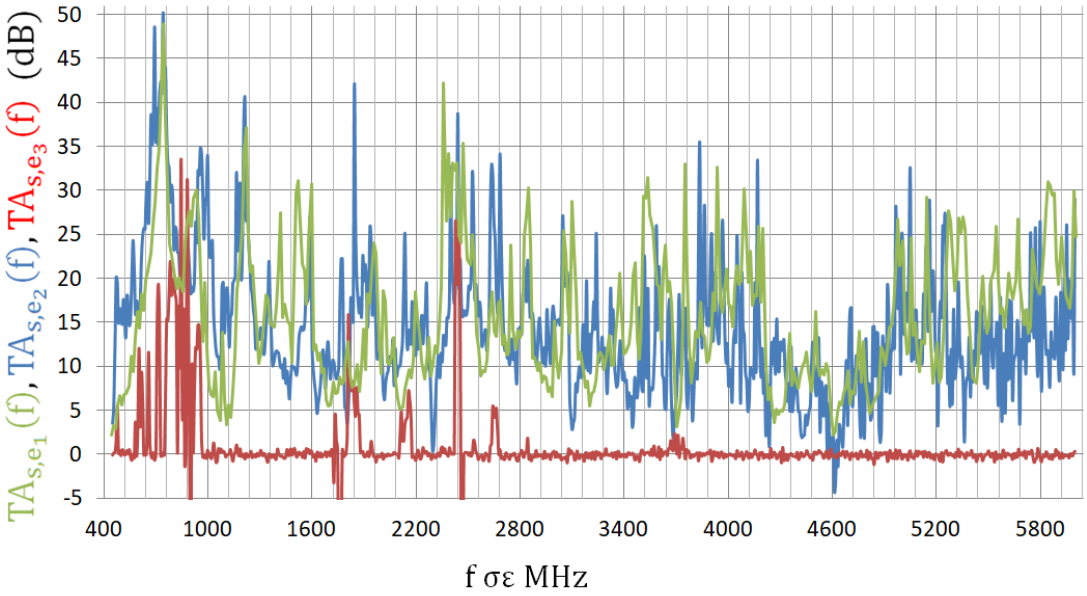
Σχήμα 10.7: Γραφική παράσταση αποτελέσματος εξασθένησης μετάδοσης ασπίδας s τρίτου πειράματος

10.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Τα τρία πειράματα έγιναν με την ίδια γενική μεθοδολογία, αλλά είχαν κάποιες διαφορές. Μία από αυτές είναι ότι τα δύο πρώτα πειράματα χρησιμοποίησαν δοκιμαστική ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολία γνωστής αρχικής ισχύος σε όλο το μετρούμενο φάσμα της μέτρησης στενής ζώνης ενώ το τρίτο πείραμα χρησιμοποίησε τυχαία πρακτική ακτινοβολία από τα καθημερινά συστήματα τηλεπικοινωνιών. Έτσι, αρχικά συγκρίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων ένα και δύο, στο σχήμα 10.8. Εκεί η εξασθένηση μετάδοσης της ίδιας ασπίδας, μετρημένη από το πρώτο πείραμα απεικονίζεται με μπλε χρώμα και από το δεύτερο με πορτοκαλί. Έπειτα, το σχήμα 10.9 απεικονίζει τη σύγκριση και των τριών πειραμάτων μαζί: του πρώτου με πράσινο, του δεύτερου με μπλε και του τρίτου με κόκκινο.



Σχήμα 10.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων πρώτου και δεύτερου περιράματος



Σχήμα 10.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων πρώτου, δεύτερου και τρίτου πειράματος.

Διαφορές μεταξύ των διεξαγωγών του πρώτου και του δεύτερου πειράματος είναι ότι στο πρώτο πείραμα η αρχική ισχύς ήταν γνωστή ενώ στο δεύτερο αυτόματη και ενδέχεται να μην ήταν αρκετή να αναδείξει με ακρίβεια όλες τις ιδιομορφίες στο γράφημα εξασθένησης του υλικού. Ταυτόχρονα, ήταν πιο επιρρεπής στον θόρυβο. Επίσης, η μέτρηση του πρώτου πειράματος με τον αναλυτή φάσματος ήταν γενικά πιο εξειδικευμένη σε θέματα ισχύος έκθεσης σε σχέση με την μέτρηση της παραμέτρου σκέδασης S_{21}. Εν τω μεταξύ, όλα τα πειράματα, δεδομένου ότι αφορούσαν χαμηλές στάθμης ισχύος, και πιο πολύ τα δύο πρώτα τα οποία έγιναν σε κλειστό χώρο, ήταν ευαίσθητα σε τυχαίες ανακλάσεις του χώρου. Οι διαφορές στα αποτελέσματα των δύο πρώτων πειραμάτων αποδίδονται στα προαναφερθέντα. Μια παρατήρηση είναι ότι το αποτέλεσμα του πρώτου πειράματος είναι πιο σταθερό και έχει λιγότερο θόρυβο. Αν στο εργαστήριο ήταν διαθέσιμος ανηχοϊκός θάλαμος, ο οποίος είναι ο κατάλληλος χώρος για τέτοιου είδους μετρήσεις, κρίνεται ότι οι θα ήταν κατά το δυνατόν ταυτόσημα. Επιπλέον, εξ αιτίας του σχεδιασμού της, η πειραματική ασπίδα είχε σχετικά ασταθή συμπεριφορά στις ανακλάσεις. Παρ' όλα αυτά, η μετρημένη εξασθένηση με αναλυτή φάσματος και με αναλυτή δικτυωμάτων παρουσιάζουν εμφανή ομοιότητα.

Για λόγους ανάλυσης, οι δύο παραστάσεις παρέχονται όπως μετρήθηκαν, χωρίς επεξεργασία. Όμως, για πολλούς λόγους, κρίνεται ότι οι περισσότερες από τις απότομες μεταβολές οφείλονται στα σφάλματα που αναφέρθηκαν. Επομένως, σε μια εκτίμηση για πρακτικούς σκοπούς, θα μπορούσαν να αγνοηθούν. Σε εκείνη την περίπτωση, με έναν αλγόριθμο σταθεροποίησης, ο οποίος περιορίζει τις διαφορές ανάμεσα στα γειτονικά δείγματα, ώστε να απορριφθούν οι απότομες μεταβολές εκτός ορίων, μία τέτοια παράσταση θα λειαινόταν αρκετά ώστε να αποτυπώνουν ευκρινέστερα οι βασικές καμπύλες στις ευρύτερες ζώνες ενδιαφέροντος.

Τα αποτελέσματα του τρίτου πειράματος εξαρτώνται από τη στάθμη των τυχαίων σημάτων η οποία δεν είναι αντιπροσωπευτική όλων των δυνατοτήτων του υλικού, ενώ οι ασυνέχειες δύναται να προκαλέσουν σφάλματα στη διαδικασία. Ωστόσο, για τις συχνότητες στις οποίες λήφθηκαν επαρκή σήματα, η μετρημένη εξασθένιση ταιριάζει με εκείνες των δύο πρώτων πειραμάτων.

10.5. Συμπεράσματα πειραμάτων

Ο στόχος των πειραμάτων της παρούσας εργασίας ήταν η παρουσίαση των τριών εργαστηριακών μεθόδων για τον χαρακτηρισμό υλικών ως προς την ικανότητα ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης και η σύγκρισή τους. Μέσω αυτών, επιδιώχθηκε επίσης η επίδειξη της χρησιμότητας και της αποτελεσματικότητας του ανεπτυγμένου λογισμικού, αλλά και γενικά της σημασίας του αυτοματισμού στις μετρήσεις στενής ζώνης.

10.5.1. Γενικά

Εφόσον διεξαχθούν σε πρότυπες εργαστηριακές συνθήκες, τα αποτελέσματα των δύο πρώτων εργαστηριακών μεθόδων, καταγράφουν τα χαρακτηριστικά ως προς τη συχνότητα της αξιολογούμενης θωράκισης και, γνωστής της γεωμετρίας της, του αξιολογούμενου υλικού. Για παράδειγμα, μία υλοποίηση της πρώτης μεθόδου εντός ανηχοϊκού θαλάμου με επίπεδη θωράκιση ανάμεσα σε κατευθυντικές κεραίες, με ελεγχόμενες αποστάσεις, θα έδινε τα βέλτιστα αποτελέσματα ως προς το υλικό, δεδομένου ότι είναι ομοιογενές. Διαφορετικά, ανάλογα με το βαθμό στον οποίο εξουδετερώθηκαν οι αιτίες σφαλμάτων που προαναφέρθηκαν, οι δύο μέθοδοι εξάγουν καλύτερης ποιότητας εκτίμηση για συγκεκριμένες θωρακίσεις και υλικά. Η τρίτη μέθοδος παρέχει μια πρακτική αναφορά των δυνατοτήτων μιας κλειστής θωράκισης στο ζητούμενο περιβάλλον χρήσης της, η οποία μπορεί να συγκριθεί με όμοιες θωρακίσεις διαφορετικών υλικών. Ο χαρακτηρισμός είναι σαφέστερος ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης σε αστική ακτινοβολία, για τον οποίο μετρήθηκαν οι συγκρινόμενες ισχύεις.

Υπενθυμίζεται ότι η μετρούμενη ποσότητα των μεθόδων είναι η ηλεκτρομαγνητική εξασθένηση μετάδοσης της αξιολογούμενης θωράκισης. Το μέγεθος δεν εκφράζει ισχύ αλλά λόγο ισχύων. Συγκεκριμένα, η τιμή του εκφράζει τον διαιρέτη ισχύος τον οποίο εφαρμόζει η θωράκιση στην προσπίπτουσα από την έκθεση ισχύ. Δηλαδή τα γραφήματα εκφράζουν τη σχετική μείωση ως ποσοστό της προσπίπτουσας ισχύος ή αλλιώς, πόση από την ισχύ της προσπίπτουσας σε θωράκιση ακτινοβολίας, μεταδίδεται από τη θωράκιση.

Όπως περιγράφεται στο τέλος της παραγράφου 8.5, για να βρεθεί πόσο συμβάλει μια θωράκιση στη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, με γνωστή την εξασθένηση μετάδοσής της, πρέπει να γίνει νέα μέτρηση ισχύος έκθεσης στην ζητούμενη περιοχή, με κεραία ανάλογου μεγέθους και με τη μεθοδολογία μέτρησης που προτείνεται στην παράγραφο 5.3, ώστε από την τιμή της να αφαιρεθεί η εξασθένηση μετάδοσης. Έπειτα, με μετατροπή της ισχύος από λογαριθμική σε απόλυτη και με γνώση της ενεργού επιφάνειας της κεραίας, βρίσκεται η πυκνότητα ισχύος και, από αυτήν, οι εντάσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Έτσι, γίνεται για παράδειγμα αναφορά στα καθιερωμένα όρια επιτρεπτής έκθεσης σε ακτινοβολία του πίνακα 4.1, και καθορισμός της συμμόρφωσης.

Χάρη στην πληροφορία της συχνοτικής απόκρισης της θωράκισης που δίνουν οι τρείς μέθοδοι, μπορούν να χαρακτηρίσουν τη θωράκιση για τις πιθανές της χρήσεις σε ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ή άλλες. Για παράδειγμα, στην περιοχή περίπου 670 με 790 MHz, σύμφωνα με δύο τις υλοποιήσεις των δύο πρώτων μεθόδων, η πειραματική ασπίδα αποσβεννύει ισχύ με διαιρέτη πάνω από 20 decibel, που ισοδυναμεί με 100 φορές μείωσή της, ενώ στο μέγιστο, κοντά στα 760 MHz, η εξασθένηση φτάνει τα 50 decibel. Αναλόγως, οι δύο μέθοδοι προτείνουν ότι σε ολόκληρη την περιοχή περίπου από 4240 έως 4900 MHz, η ασπίδα εισάγει εξασθένηση κάτω των 17 decibel. Συμπερασματικά, οι προτεινόμενες εργαστηριακές μέθοδοι δύνανται να αναδείξουν τέτοιες σταθερές περιοχές τοπικών ακροτάτων σε υλοποιήσεις τους για διάφορα υλικά και, με αναφορές στους πίνακες κατανομής συχνοτήτων, όπως για παράδειγμα ο πίνακας 2.1, να υποδείξουν για αυτά πιθανές χρήσεις.

10.5.2. Σύγκριση μεθόδων

Λόγω του ελέγχου της ισχύος από τη γεννήτρια διανυσματικού σήματος και πολλών σύνθετων ρυθμίσεων του αναλυτή φάσματος, εξειδικευμένων για την μέτρηση ισχύος έκθεσης, η πρώτη μέθοδος κρίνεται η βέλτιστη ως προς την ακρίβεια. Αυτό διακρίνεται και από το πιο ευσταθές αποτέλεσμά της σε σχέση με τη δεύτερη μέθοδο, ακόμη κι αν παράχθηκε με περίπου τα μισά δείγματα. Όμως, σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος, η οποία απαιτεί την επαναλαμβανόμενη παραγωγή με σταδιακή αύξηση της συχνότητας και άμεση ανίχνευση από τον αναλυτή και εντοπισμό του σήματος, δεν είναι πρακτικά δυνατή χωρίς την χρήση του λογισμικού αυτοματισμού.

Η δεύτερη μέθοδος απαιτεί λιγότερο και οικονομικότερο εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, δεν απαιτεί τη γεννήτρια κυμάτων αλλά μόνο τον αναλυτή δικτυωμάτων. Ταυτόχρονα, αποτελεί εναλλακτική προσέγγιση στην μέτρηση εξασθένησης σε περίπτωση που δεν υπάρχει ούτε αναλυτής φάσματος. Επίσης, μέσω της ενσωμάτωσης δοκιμαστικών σημάτων και ανίχνευσης από τον αναλυτή δικτυωμάτων, η μέθοδος είναι δραστικά λιγότερο χρονοβόρα. Δηλαδή, ενώ η συνεργασία μεταξύ των οργάνων στο πρώτο πείραμα κράτησε χρονικό διάστημα όσο δύο φορές τα 47,5 λεπτά, και μάλιστα για δειγματοληψία περίπου μισής ακρίβειας, το σύνολο της δεύτερης μεθόδου μπορεί να κρατήσει μόνο λίγα δευτερόλεπτα. Έτσι, η δεύτερη μέθοδος διευκολύνει την ικανότητα επανάληψης, ενώ η πρώτη την περιορίζει.

Η σημασία της τρίτης πειραματικής μεθόδου έγκειται στο ότι περιγράφει από τα γραφήματά της ευκρινέστερα το ποιες τυπικές ζώνες ραδιοσυχνοτήτων μια θωράκιση εξασθενεί καλύτερα. Επίσης, δεν χρειάζεται αυστηρό εργαστηριακό περιβάλλον αλλά διεξάγεται στον ελεύθερο χώρο. Ακόμη, έχει την ικανότητα διαφοροποίησης επειδή πραγματοποιείται σε διαφορετικά περιβάλλοντα, το οποίο είναι χρήσιμο στον καθορισμό τύπου θωράκισης για ένα συγκεκριμένο τύπο τοποθεσίας. Τέλος, είναι πρακτική επειδή απαιτεί μόνο έναν, κατά προτίμηση φορητό, αναλυτή φάσματος, ένα καλώδιο RF, μία κατάλληλη κεραία και την αξιολογούμενη ασπίδα.

11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Προηγουμένως στην εργασία, αναφέρθηκαν η σημασία του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για την ασύρματη τηλεπικοινωνία και άλλους τομείς της τεχνολογίας και η μακροχρόνια προσπάθεια αντιμετώπισης των προκλήσεων που εισάγει ώστε να γίνει κατάλληλα εκμεταλλεύσιμο από τον άνθρωπο. Προέκυψε ότι η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι εκείνη που δίνει τη βάση για την κατόρθωση του ζητουμένου. Συγκεκριμένα, η συμβατότητα επιλύει το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και ως συνέπεια, βοηθάει στην επίλυση ενός άλλου προβλήματος: του ελέγχου της επιβλαβούς ανθρώπινης ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης.

Η πορεία που ακολουθεί η ηλεκτρολογία προς την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας έχει βασιστεί στην τυποποίηση των μεθόδων της. Η ηλεκτρομαγνητική θωράκιση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ή οποιουδήποτε είδους ηλεκτρολογικών συσκευών και συστημάτων είναι βασική και αναπόσπαστη μέθοδος συμβατότητας. Η μέτρηση της αποτελεσματικότητας ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης ενός υλικού αποτελεί προϋπόθεση για την απόφαση της χρήσης του ως θωράκιση σε ηλεκτρολογικά συστήματα και ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών ή ιδιαιτεροτήτων του υλικού απαιτείται για να αναδειχθεί το είδος των συστημάτων στα οποία είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί. Δηλαδή, η αξιολόγηση και ο χαρακτηρισμός ενός υλικού θωράκισης είναι μέθοδοι της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης, η οποία είναι μέθοδος της συμβατότητας και οπότε τείνει να τυποποιείται. Η τυποποίηση είναι επίσης συνήθης πρακτική σε όλες τις φυσικές επιστήμες και δεν κατοχυρώνεται από τον κλάδο της συμβατότητας. Η καθιέρωση τυποποιημένων διαδικασιών μέτρησης παρέχει τα σημεία αναφοράς ώστε να αποφεύγονται τα ανθρώπινα σφάλματα και να βελτιστοποιείται η μέτρηση.

Στα προηγούμενα κεφάλαια, υποστηρίχθηκε ότι η αντιμετώπιση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής εξαρτάται από τη συχνότητα και η συμμόρφωση με τα όρια έκθεσης εξαρτάται επίσης από τη συχνότητα. Επομένως, η επιλογή ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης σε συσκευές για την κάλυψη των δύο ζητουμένων, εκτός από την ικανότητα εξασθένησης μετάδοσης ενός υλικού, βασίζεται στην διάκρισή της ως προς τη συχνότητα. Η διάκριση της συχνότητας της ηλεκτρομαγνητικής ασπίδας είναι η βασική της ιδιαιτερότητα, η οποία κρίνει τις εφαρμογές για τις οποίες είναι κατάλληλη.

Οι μέθοδοι τυποποίησης μετρήσεων αξιολόγησης της ικανότητας θωράκισης υλικών που προτείνονται στην παρούσα εργασία, σχεδιάστηκαν θεωρητικά και δοκιμάστηκαν παραδειγματικά στην πράξη. Χρησιμοποιώντας μετρήσεις στενής ζώνης και όργανα υψηλής ευαισθησίας, διευκρινίζουν την διάκριση των αξιολογούμενων ασπίδων ως προς τη συχνότητα. Το υλικό και η γεωμετρία της ασπίδας κρίνουν την ικανότητα εξασθένησης μετάδοσης και διάκρισης της συχνότητας. Οι μέθοδοι προσαρμόζονται στη διαφοροποίηση της γεωμετρίας των αξιολογούμενων θωρακίσεων. Επίσης, χρησιμοποιούν την αυτοματοποίηση για να εκμεταλλευθούν καλύτερα την ευαισθησία και άλλες προδιαγραφές των οργάνων, να διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ τους καθώς και να ελαχιστοποιήσουν την παρεμβολή, να επιτρέψουν την επεξεργασία των δεδομένων και να απλοποιήσουν τις διαδικασίες. Οι τρείς μέθοδοι είναι επίσης προσαρμοσμένες στην διαθεσιμότητα του εργαστηριακού εξοπλισμού.

Με χρήση αυτών των τυποποιημένων μεθόδων και του λογισμικού, το οποίο αναπτύχθηκε για την εργασία, δύνανται να γίνουν αξιολογήσεις υποσχόμενων υλικών ώστε να εγκριθεί η εφαρμογή τους για την επιλεκτική τους απόσβεση σε ηλεκτρικές συσκευές όπως ο φούρνος μικροκυμάτων, σε ασύρματους πομποδέκτες, όπως οι μικρής εμβέλειας έξυπνες οικιακές συσκευές, σε οικοδομικές κατασκευές για ακτινοπροστασία, σε ευαίσθητο βιομηχανικό εξοπλισμό και άλλες. Το παρεχόμενο λογισμικό είναι επίσης χρήσιμο για τη μέτρηση της έκθεσης σε ακτινοβολία και τη μέτρηση θορύβου σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, την μέτρηση παραμέτρων του κέρδους και των ανακλάσεων κεραιών και των παραμέτρων σκέδασης ηλεκτρονικών φίλτρων και άλλων κυκλωμάτων και γενικά ένα μεγάλο πλήθος από τις ικανές μετρήσεις με τα επιλεγμένα εργαστηριακά όργανα.

Ως πιθανή μελλοντική επέκταση, οι μέθοδοι μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να διακρίνουν την ικανότητα απορρόφησης των υλικών από την ικανότητα ανάκλασής τους. Για την κατόρθωση αυτού, θα χρειαζόταν η αναδιάταξη των κεραιών ώστε να μπορούν να απομονώνουν και να υπολογίζουν την ανακλώμενη ισχύ από την εξωτερική επιφάνεια μιας ασπίδας. Ο βαθμός στον οποίο μια θωράκιση απορροφά την ακτινοβολία και την ενέργεια που εμποδίζει ή την επιστρέφει πίσω, είναι σημαντικός για πολλές ειδικευμένες εφαρμογές της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης.

12. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Δ. Ι. Στρατάκης, «Ανασκόπηση βιβλιογραφίας,» σε *Μέτρηση και εκτίμηση αβεβαιότητας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε σύγχρονα συστήματα ασυρμάτων ευρυζωνικών επικοινωνιών, κεφάλαιο 1.3*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010.

[2] Χ. Καψάλης και Π. Τρακάδας, «Η επανάσταση των τηλεπικοινωνιών,» σε *Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC)*, Τζιόλα, 2006.

[3] Δ. Σ. Βλάχος, «Δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων,» σε *Βασικά Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητισμού, κεφάλαιο 13.4*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ανοικτές εκδόσεις Κάλλιπος, 2015.

[4] Δ. Σ. Βλάχος, «Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα,» σε *Βασικά Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητισμού, κεφάλαιο 13.6*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ανοικτές εκδόσεις Κάλλιπος, 2015.

[5] «Έγκριση Εθνικού Κανονισμού Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων (ΕΚΚΖΣ), ΚΥΑ 18941 ΕΞ 2023,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 2628, Β, 2023.

[6] «Οργάνωση και λειτουργία του τομέα ηλεκτρονικών επικοινωνιών, Νόμος 4070,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 82, Α, 2012.

[7] «Ποια είναι η ΕΕΤΤ,» Επίσημη ιστοσελίδα Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.eett.gr/eett/schetika-me-tin-eett/poia-einai-i-eett/.

[8] «Ραδιοφωνία,» Επίσημη ιστοσελίδα Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.eett.gr/docs/sychnes-erotiseis-gia-parochoys/fasma-radiosychnotiton/radiofonia/.

[9] «Πληροφορίες για την ψηφιακή τηλεόραση,» Επίσημη ιστοσελίδα Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.eett.gr/docs/sychnes-erotiseis-gia-katanalotes/psifiaki-tileorasi/plirofories-psifiaki-tileorasi/.

[10] «Εθνικό Συμβούλιο Ραδιοτηλεόρασης,» Επίσημη ιστοσελίδα, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.esr.gr/.

[11] «Κανονισμός όρων χρήσης ραδιοφάσματος,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 4471, Β, 2021.

[12] «Δικαιώματα με διαγωνιστική διαδικασία,» Επίσημη ιστοσελίδα Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.eett.gr/parochoi/fasma-radiosychnotiton/adeiodotisi-radiosychnotiton/dikaiomata-me-diagonistiki-diadikasia/.

[13] «Χάρτης Συχνοτήτων Επίγειας Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Τηλεοπτικού Σήματος,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 1752, Β, 2020.

[14] Μ. Ταμπουρατζής, «Ηλακτρομαγνητική Συμβατότητα - Διάλεξη 1 - Ορισμοί Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC),» Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Eclass, (https://eclass.hmu.gr/courses/ECE170/), 2024.

[15] R. Leach and M. Alexander, "Eletronic Systems Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference," NASA Reference Publication 1374, Marshall Space Flight Center, Alabama, 1995.

[16] I. Majid, «EMI Effects in Flight Control Systems and Their Mitigations, Reported Occurrences,» σε *Handbook of Aerospace Electromagnetic Compatibility, Chapter 9.3.2*, John Wiley & Sons, Inc., 2019.

[17] «Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία και Κινητή Τηλεφωνία - Τα επιστημονικά δεδομένα,» Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων - Σε συνεργασία με το Ε.Μ. Πολυτεχνείο, 2010.

[18] «World Health Organization (WHO),» Official website, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.who.int/.

[19] B. Prokopios, «Thermal Effects,» σε *Exposure EMF Measurements with Spectrum Analyzer using open source software, chapter 2.1.1*, Department of Informatics Engineering, School of Aplied Technology, Technological Educational Institute of Crete, 2017.

[20] B. Prokopios, «Serious health issues reported and possible association with EMF,» σε *Exposure EMF Measurements with Spectrum Analyzer using open source software, chapter 2.1.3*, Department of Informatics Engineering, School of Aplied Technology, Technological Educational Institute of Crete, 2017.

[21] «Ενημέρωση έκθεσης σε χαμηλόσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία,» Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), 2005.

[22] B. Prokopios, «Non-Thermal Effects,» σε *Exposure EMF Measurements with Spectrum Analyzer using open source software, chapter 2.1.2*, Department of Informatics Engineering, School of Aplied Technology, Technological Educational Institute of Crete,

2017.

[23] «Όρια ασφαλούς έκθεσης γενικού πληθυσμού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων,» Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://eeae.gr/%CE%B1%CF%83%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CE%BD/%CF%81%CF%85%CE%B8%CE%BC%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82-%CE%AD%CE%BB%CE%B5%CE%B3%CF%87%CE%BF%CF%82/%CE%BC%.

[24] «International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - Aim, status & history,» Official website, [Ηλεκτρονικό]. Available: www.icnirp.orgenabout-icnirpaim-status-historyindex.html.

[25] «Council Recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz),» Official Journal of the European Communities, L, 199, 1999.

[26] «Μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία κεραιών εγκατεστημένων στην ξηρά,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 1105, Β, 2000.

[27] «Νόμος 3431,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 13, Α, 2006.

[28] «Νόμος 4635,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 167, Α, 2019.

[29] «Μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 512, Β, 2002.

[30] «Καθορισμός ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο περιβάλλον σταθμών κεραιών σε εφαρμογή του Ν. 3431/2006, Εγκύκλιος,» Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2007.

[31] «Τήρηση των ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία,» Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.eett.gr/docs/sychnes-erotiseis-gia-parochoys/keraiosystimata/nomothetikes-rythmiseis-gia-tin-tirisi-ton-orion-asfaloys-ekthesis-toy-koinoy-se-ilektromagnitiki-aktinovolia/.

[32] «Όρια ασφαλούς έκθεσης γενικού πληθυσμού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία υψηλών συχνοτήτων,» Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://eeae.gr/%CE%B1%CF%83%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CE%BD/%CF%81%CF%85%CE%B8%CE%BC%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82-

%CE%AD%CE%BB%CE%B5%CE%B3%CF%87%CE%BF%CF%82/%CE%BC%.

[33] Δ. Ι. Στρατάκης, «Προβληματισμοί που σχετίζονται με το θέμα των μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων,» σε *Μέτρηση και εκτίμηση αβεβαιότητας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε σύγχρονα συστήματα ασυρμάτων ευρυζωνικών επικοινωνιών, κεφάλαιο 1.1*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010.

[34] W. p. Spectrum Analyzer Basics, Keysight Technologies, 2024.

[35] Δ. Ι. Στρατάκης, «Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων και για μια συγκεκριμένη πόλωση της κεραίας λήψης,» σε *Μέτρηση και εκτίμηση αβεβαιότητας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε σύγχρονα συστήματα ασυρμάτων ευρυζωνικών επικοινωνιών, κεφάλαιο 4.3*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010.

[36] D. Stratakis, T. Xenos, T. Yioultsis, B. Zacharopoulos, N. Farsaris, I. Zacharopoulou και C. Katsidis, «Mathematical Analysis,» σε *Automation in Electromagnetic Field Measurements, chapter 4*, Heraklion, Crete, International Conference on Telecommunications and Multimedia, 2006.

[37] Δ. Σ. Βλάχος, «Ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων,» σε *Βασικά Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητισμού, κεφάλαιο 13.4*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ανοικτές εκδόσεις Κάλλιπος, 2015.

[38] Χ. Καψάλης και Π. Τρακάδας, «Ο συντονιστικός ρόλος των επιτροπών θέσπισης προτύπων,» σε *Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC), κεφάλαιο 1.4*, Τζιόλα, 2006.

[39] «Directive 2014/30/EU on the harmonisation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility,» Official Journal of the European Communities, L, 96, 2014.

[40] «Οδηγία 2014/53/ΕΕ σχετικά με την εναρμόνιση των νομοθεσιών των κρατών μελών σχετικά με τη διαθεσιμότητα ραδιοεξοπλισμού στην αγορά,» Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L, 153, 2014.

[41] «Εναρμόνιση της Ελληνικής Νομοθεσίας προς την Οδηγία 2014/53/ΕΕ σχετικά με την διαθεσιμότητα ραδιοεξοπλισμού στην αγορά,» Εφημερίδα της κυβερνήσεως, φύλλο 139, Α, 2017.

[42] D. Chung, «Materials for electromagnetic interference shielding,» Materials Chemistry and Physics, ELSEVIER, 2020.

[43] «Υλικά για θωράκιση Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών - Ακτινοπροστασία,» Aktinovolia.gr, 2021.

[44] «S-Parameter Measurements, Basics for High Speed Digital Engineers,» Keysight Technologies, 2019.

[45] Z. K. J. Dřínovský, «Electromagnetic Shielding Efficiency Measurement,» *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW,* 2009.

[46] «Spyder - Python IDE,» Official website, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.spyder-ide.org/.

[47] «PyQt5 project, latest version,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://pypi.org/project/PyQt5/.

[48] «PyVISA-py - Pure Python backend for PyVISA,» Official documentation, [Ηλεκτρονικό]. Available: 28-06-2025.

[49] «Openpyxl - Python library,» Official documentation, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/.

[50] «Programming guide for Keysight FieldFox handheld analyzers,» Keysight Technologies, Inc., 2021.

[51] «Keysight E8257D/67D & E8663D PSG Signal Generators SCPI Command Reference,» Keysight Technologies, Inc., 2017.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΝΤΟΛΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

Οι Πρότυπες Εντολές για Προγραμματιζόμενα Όργανα (Standard Commands for Programmable Instruments, SCPI) είναι πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά εργαστηριακά όργανα δοκιμών ή μετρήσεων για να αποδέχονται τηλεχειρισμό από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στην ανάπτυξη του λογισμικού της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι εντολές που καταγράφονται στους παρακάτω πίνακες για τη ρύθμιση της γεννήτριας διανυσματικού σήματος, του αναλυτή φάσματος και του αναλυτή δικτυωμάτων αντίστοιχα. Οι εντολές παρέχονται στα εγχειρίδια από τον κατασκευαστή των οργάνων: [50], [51]. Όλες οι εντολές καθώς και οι μεταβλητές που συνοδεύουν, ανταλλάσσονται ως συμβολοσειρές.

Πίνακας 0.1: Εντολές SCPI ρυθμίσεων γεννήτριας διανυσματικού σήματος

Σύνταξη εντολής	Διερμηνεία	Τύπος συνοδευόμενης μεταβλητής
*IDN?	Αίτημα ταυτοποίησης συσκευής	Πίνακας συμβολοσειρών
SYSTem:PRESet	Προεπιλογή τρεχόντων ρυθμίσεων	-
:OUTPut:STATe <b>	Εναλλαγή κατάστασης παραγωγής	Δυαδική
:OUTPut:MODulation:STATe <b>	Εναλλαγή κατάστασης διαμόρφωσης	Δυαδική
SOURce:FREQuency <num>	Επιλογή συχνότητας σε Hz	Θετική δεκαδική
POWer <num>	Επιλογή τιμής ισχύος. Από προεπιλογή σε dBm.	Δεκαδική

Πίνακας 0.2: Εντολές SCPI ρυθμίσεων αναλυτή φάσματος

Σύνταξη εντολής	Διερμηνεία	Τύπος συνοδευόμενης μεταβλητής
*IDN?	Αίτημα ταυτοποίησης συσκευής	Πίνακας συμβολοσειρών
SYSTem:PRESet	Προεπιλογή τρεχόντων ρυθμίσεων	-
:SENSe:FREQuency:STARt <num>	Επιλογή αρχικής συχνότητας σε Hz	Θετική δεκαδική
:SENSe:FREQuency:STOP <num>	Επιλογή τελικής συχνότητας σε Hz	Θετική δεκαδική
SENSe:SWEep:POINts <num>	Επιλογή πλήθους δειγμάτων	Φυσική

	ανίχνευσης	
:SENSe:BANDwidth:RESolution <num>	Επιλογή εύρους ανάλυσης σε Hz	Θετική δεκαδική
:SENSe:BANDwidth:VIDeo <num>	Επιλογή εύρους οπτικοποίησης σε Hz	Θετική δεκαδική
:SENSe:AVERage:TYPE <char>	Επιλογή τρόπου υπολογισμού μέσων όρων	Κατηγορική
'DISPlay:WINDow:TRACe <n>:Y:SCALe:RLEVel <num>	Επίπεδο αναφοράς κατακόρυφου άξονα προβολής σε dB	Δεκαδική
:SENSe:DETector:FUNCtion <char>	Επιλογή συνάρτησης ανιχνευτή	Κατηγορική
AVERage:COUNt <num>	Επιλογή πλήθους δοκιμών μάσκας φασματικής εκπομπής	Φυσική
:SENSe:POWer:RF:GAIN:STATe <b>	Εναλλαγή κατάστασης προενισχυτή	Δυαδική
INITiate:CONTinuous <b>	Εναλλαγή κατάστασης συνεχόμενης ανίχνευσης	Δυαδική
INIT:IMMediate	Εκτέλεση στιγμιαίας ανίχνευσης	-
TRACe <n>:TYPE <char>	Επιλογή κατάστασης φασματικού ίχνους	Κατηγορική
TRACE:DATA?	Αίτημα δεδομένων ανίχνευσης	Πίνακας δεκαδικών

Πίνακας 0.3: Εντολές SCPI ρυθμίσεων αναλυτή δικτυωμάτων

Σύνταξη εντολής	Διερμηνεία	Τύπος συνοδευόμενης μεταβλητής
*IDN?	Αίτημα ταυτοποίησης συσκευής	Πίνακας συμβολοσειρών
SYSTem:PRESet	Προεπιλογή τρεχόντων ρυθμίσεων	-
:CALCulate:PARameter:DEFine <char>	Επιλογή παραμέτρου σκέδασης ανίχνευσης	Κατηγορική
:SENSe:FREQuency:STARt <num>	Επιλογή αρχικής συχνότητας σε Hz	Θετική δεκαδική
:SENSe:FREQuency:STOP <num>	Επιλογή τελικής συχνότητας σε Hz	Θετική δεκαδική
SENSe:SWEep:POINts <num>	Επιλογή πλήθους δειγμάτων ανίχνευσης	Φυσική
SENSe:BWIDth <b>	Επιλογή τιμής εύρους φίλτρου ενδιάμεσης συχνότητας σε Hz	Φυσική
INITiate:CONTinuous <b>	Εναλλαγή κατάστασης συνεχόμενης ανίχνευσης	Δυαδική
'CALC:DATA:FDATA?	Αίτημα δεδομένων ανίχνευσης	Πίνακας δεκαδικών

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΤΜΗΜΑΤΑ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το λογισμικό που συντάχθηκε για την εργασία είναι ανοικτής πηγής (open source) σε γλώσσα Python. Ο πηγαίος κώδικας του λογισμικού είναι διαθέσιμος. Για την παραπομπή του αναγνώστη, παρατίθενται εδώ ορισμένοι αλγόριθμοι που υπαγορεύουν το κύριο μέρος των βασικών λειτουργιών του λογισμικού. Τα παρακάτω τμήματα επιτρέπουν την επικοινωνία με τα εργαστηριακά όργανα: τον αναλυτή φάσματος, τον αναλυτή δικτυωμάτων και τη γεννήτρια διανυσματικού σήματος. Η εξήγηση και οι οδηγίες του λογισμικού, καθώς και οι βιβλιογραφία του, παρέχονται στο κεφάλαιο 9.

Σύνδεση εργαστηριακού οργάνου

```
import pyvisa
import time

def connectToInstrument(self, instrumentIPAddress):

    instrumentTitle = f"TCPIP0::{instrumentIPAddress}::inst0::INSTR"

    resourceManager = pyvisa.ResourceManager()
    instrumentObject = resourceManager.open_resource(instrumentTitle)

    instrumentObject.read_termination = '\n'
    instrumentObject.write_termination = '\n'

    #instrumentObject.write('*IDN?')
    #response = instrumentObject.read(); time.sleep(0.1)

    instrumentObject.timeout = 200
    instrumentObject.write("SYST:PRES"); time.sleep(0.1)

    return instrumentObject
```

Απλή ανίχνευση αναλυτή φάσματος

```
import time

def conductSimpleSAMeasurement(self, analyzerObject, f0, fn, n):

  f0 = f0 * 1e03 # Μετατρέπουν τις συχνότητες από kHz σε Hz.
  fn = fn * 1e03
  numberOfAverages = 5

  displayAndClearPossibleAnalyzerErrors(self, analyzerObject)

  analyzerObject.write(f':SENSe:FREQuency:STARt {f0}'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write(f':SENSe:FREQuency:STOP {fn}'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write(f'SENSe:SWEep:POINts {n}'); time.sleep(0.1)

  RBW = 1e05 # Θέτει εύρος ανάλυσης (Resolution Bandwidth) σε Hz. Προεπιλογή: 2e06.
  VBW = 1e06 # Θέτει εύρος οπτικοποίησης (Video Bandwidth) σε Hz. Προεπιλογή: 2e06.
  analyzerObject.write(f':SENSe:BANDwidth:RESolution {RBW}'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write(f':SENSe:BANDwidth:VIDeo {VBW}'); time.sleep(0.1)

  analyzerObject.write(':SENSe:AVERage:TYPE POWer'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write(':SENSe:POWer:RF:ATTenuation 0'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write('DISPlay:WINDow:TRACe1:Y:SCALe:RLEVel -30'); time.sleep(0.1)

  analyzerObject.write(':SENSe:DETector:FUNCtion AVERage'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write(f'AVER:COUNt {numberOfAverages}'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write(':SENSe:POWer:RF:GAIN:STATe ON'); time.sleep(0.1)

  # Διαφοροποίηση ανίχνευσης 1:
  analyzerObject.write('INIT:CONT OFF'); time.sleep(0.5) # Απενεργοποιεί τη χρονική συνέχεια ανίχνευσης

  for i in range(numberOfAverages): # Εκτελεί ένα σύνολο στιγμιαίων ανιχνεύσεων.
    analyzerObject.write('INIT:IMMediate'); time.sleep(1)
  # Τέλος διαφοροποίησης.

  ## Διαφοροποίηση ανίχνευσης 2:
  ## analyzerObject.write('INIT:CONT ON'); time.sleep(0.5) # Ενεργοποιεί τη χρονική συνέχεια ανίχνευσης
  #analyzerObject.write(':TRACe1:TYPE MAXH'); time.sleep(0.1)
  #time.sleep(240) # Επιτρέπει συνεχόμενη ανίχνευση για ορισμένο χρονικό διάστημα
  ## Τέλος διαφοροποίησης.
```

```
  P = analyzerObject.query('TRACE:DATA?') # Ζητάει και δέχεται τα αποτελέσματα της μέτρησης.

  analyzerObject.write(':SENSe:POWer:RF:GAIN:STATe OFF'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write('DISPlay:WINDow:TRACe1:Y:SCALe:RLEVel 0'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write(':SENSe:POWer:RF:ATTenuation:AUTO ON'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write(':SENSe:AVERage:COUNt 1'); time.sleep(0.1)
  analyzerObject.write('INIT:CONT ON'); time.sleep(0.2)

  displayAndClearPossibleAnalyzerErrors(self, analyzerObject)

  return P # Επιστρέφει τον πίνακα τιμών ισχύος προς επεξεργασία
```

Απλή παραγωγή και διακοπή παραγωγής γεννήτριας

```
import time

def beginSimpleGeneration(self, generatorObject, P0, f):

  f = f * 1e03 # Μετατρέπει τη συχνότητα από kHz σε Hz.
  displayAndClearPossibleGeneratorErrors(self, generatorObject)

  generatorObject.write(':OUTPut:STATe OFF'); time.sleep(0.1) # Διακόπτει την προηγούμενη παραγωγή
  generatorObject.write(':OUTPut:MODulation:STATe OFF'); time.sleep(0.1) # Απεν. τη λειτ. διαμόρφωσης
  generatorObject.write(f'SOURce:FREQuency {f}'); time.sleep(0.1) # Ρυθμίζει τη συχνότητα παραγωγής
  generatorObject.write(f'POWer {P0}'); time.sleep(0.1) # Ρυθμίζει την ισχύ παραγωγής σε dBm.
  generatorObject.write(':OUTPut:MODulation:STATe ON'); time.sleep(0.1) # Ενεργ. τη λειτ. διαμόρφωσης.
  generatorObject.write(':OUTPut:STATe ON'); time.sleep(0.1) # Εκκινεί την παραγωγή.


def stopSimpleGeneration(self, generatorObject):

  displayAndClearPossibleGeneratorErrors(self, generatorObject)

  generatorObject.write(':OUTPut:STATe OFF'); time.sleep(0.1)
  generatorObject.write(':OUTPut:MODulation:STATe OFF'); time.sleep(0.1)
```

Συνδυαστική μέτρησης γεννήτριας και αναλυτή φάσματος

```
import time

def conductRepeatedGenerationSAMeasurement(self, generatorObject, analyzerObject, P0, f0, fn, N):

    P = []
    n = 801
    f = list(linspace(f0, fn, N))

    GeneratorInterface.initiateRepeatedGeneration(self, generatorObject, P0
    AnalyzerInterface.initiateRepeatedMeasurement(self, analyzerObject, f0, fn, n)

    for i in range(N):

        GeneratorInterface.executeQuickSampleGeneration(self, generatorObject, f[i])
        Pi = AnalyzerInterface.executeQuickSASampleSweep(self, analyzerObject)

        Pi = Pi.split(',')
        for j in range(n): Pi[j] = float(Pi[j])
        P += [max(Pi)].

    GeneratorInterface.stopSimpleGeneration(self, generatorObject)
    AnalyzerInterface.concludeRepeatedMeasurement(self, analyzerObject)

    P = str(P); P = P.replace('[',").replace(']',") # Λίστα αποτελεσμάτων συνολικής μέτρησης.

    return P


def initiateRepeatedGeneration(self, generatorObject, P0):

    displayAndClearPossibleGeneratorErrors(self, generatorObject)

    generatorObject.write(':OUTPut:STATe OFF'); time.sleep(0.1)
    generatorObject.write(':OUTPut:MODulation:STATe OFF'); time.sleep(0.1)
    generatorObject.write(f'POWer {P0}'); time.sleep(0.1)


def initiateRepeatedMeasurement(self, analyzerObject, f0, fn, n):
```

```
    displayAndClearPossibleAnalyzerErrors(self, analyzerObject)

    f0 = f0 * 1e03
    fn = fn * 1e03
    RBW = 1e05
    VBW = 1e06
    numberOfAverages = 5

    analyzerObject.write(f':SENSe:FREQuency:STARt {f0}'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(f':SENSe:FREQuency:STOP {fn}'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(f'SENSe:SWEep:POINts {n}'); time.sleep(0.1)
    # n: πλήθος σημείων ανίχνευσης δείγματος, διαφορετικό του N: πλήθους δειγμάτων
    analyzerObject.write(f':SENSe:BANDwidth:RESolution {RBW}'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(f':SENSe:BANDwidth:VIDeo {VBW}'); time.sleep(0.1)

    analyzerObject.write(':SENSe:AVERage:TYPE POWer'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(':SENSe:POWer:RF:ATTenuation 0'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write('DISPlay:WINDow:TRACe1:Y:SCALe:RLEVel -30'); time.sleep(0.1)

    analyzerObject.write(':SENSe:DETector:FUNCtion AVERage'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(f'AVER:COUNt {numberOfAverages}'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(':SENSe:POWer:RF:GAIN:STATe ON'); time.sleep(0.1)

    analyzerObject.write('INIT:CONT OFF'); time.sleep(0.5)


def executeQuickSampleGeneration(self, generatorObject, f):  # Επαναλαμβάνεται για N δείγματα

    f = f * 1e03
    generatorObject.write(':OUTPut:STATe OFF'); time.sleep(0.1)
    generatorObject.write(f'SOURce:FREQuency {f}'); time.sleep(0.1)
    generatorObject.write(':OUTPut:STATe ON'); time.sleep(0.1)


def executeQuickSASampleSweep(self, analyzerObject):  # Επαναλαμβάνεται για N δείγματα

    numberOfAverages = int(analyzerObject.query('SENSe:AVERage:COUNt?'))
    for i in range(numberOfAverages): analyzerObject.write('INIT:IMMediate'); time.sleep(1)
    analyzerObject.write(':CALCulate:MARKer:FUNCtion:MAXimum'); time.sleep(0.5)

    P = analyzerObject.query('TRACE:DATA?');

    return P
```

```
def concludeRepeatedMeasurement(self, analyzerObject):

    analyzerObject.write(':CALCulate:MARKer:STATe OFF'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(':SENSe:AVERage:COUNt 1'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write('INIT:CONT ON'); time.sleep(0.2)
    analyzerObject.write(':SENSe:POWer:RF:GAIN:STATe OFF'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write('DISPlay:WINDow:TRACe1:Y:SCALe:RLEVel 0'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(':SENSe:POWer:RF:ATTenuation:AUTO ON'); time.sleep(0.1)

    displayAndClearPossibleAnalyzerErrors(self, analyzerObject)
```

Ανίχνευση παραμέτρου σκέδασης

```
import time

def conductNAMeasurement(self, analyzerObject, f0, fn, n, parameter):

    f0 = f0 * 1e03
    fn = fn * 1e03

    displayAndClearPossibleAnalyzerErrors(self, analyzerObject)

    analyzerObject.write(f':CALCulate:PARameter:DEFine {parameter}'); time.sleep(0.5)

    analyzerObject.write(f':SENSe:FREQuency:STARt {f0}'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(f':SENSe:FREQuency:STOP {fn}'); time.sleep(0.1)
    analyzerObject.write(f'SENSe:SWEep:POINts {n}'); time.sleep(0.1)
    #IFBW = 1e05 # Θέτει εύρος φίλτρου ενδιάμεσης συχνότητας σε Hz. Προεπιλογή: 1e04.
    #analyzerObject.write(f':SENSe:BWIDth {IFBW}'); time.sleep(0.1)

    analyzerObject.write('INIT:CONT 0'); time.sleep(0.5)
    analyzerObject.write('CALC:DATA:FDATA?'); time.sleep(1)
    G = analyzerObject.read()
    analyzerObject.write("INIT:CONT 1")

    displayAndClearPossibleAnalyzerErrors(self, analyzerObject)

    return G
```