



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

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ GTEM CELL

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παττακός Πολυχρόνης
Στελλάτου Αναστασία
Τσούτσικα Γεωργία

Επιβλέπων Καθηγητής : Φίλιππος Κωνσταντίνου

Αθήνα, Οκτώβριος 2005



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

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ GTEM CELL

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παττακός Πολυχρόνης
Στελλάτου Αναστασία
Τσούτσικα Γεωργία

Επιβλέπων Καθηγητής : Φίλιππος Κωνσταντίνου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Οκτωβρίου 2005

.....
Φ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χ. ΚΑΨΑΛΗΣ
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. ΟΥΖΟΥΝΟΓΛΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2005

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Φ. Κωσταντίνου, καθηγητή ΕΜΠ, για την πολύτιμη καθοδήγηση του και τις χρήσιμες και απαραίτητες διορθώσεις του. Η διάθεση ερευνητικού υλικού από μέρος του αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την περάτωση της διπλωματικής εργασίας μας.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Νίκο Παπανικολάου, υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ, για το συνεργάσιμο πνεύμα του και τις εποικοδομητικές συμβουλές του.

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και κατασκευή ενός GTEM cell. Το GTEM cell (Gigahertz Transversal Electromagnetic Mode) είναι μια εκτεταμένη γραμμή μεταφοράς που λειτουργεί σε ρυθμό TEM (δηλαδή σε εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό ρυθμό) ώστε να προσομοιώνει ένα επίπεδο κύμα ανοιχτού χώρου. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση τόσο μετρήσεων εκπομπής όσο και μετρήσεων ευαισθησίας ηλεκτρονικών συσκευών σε ένα εκτεταμένο εύρος συχνοτήτων που φτάνει μέχρι και το 1GHz.

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται διαδοχικά το θεωρητικό υπόβαθρο του GTEM cell, μια αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών του χαρακτηριστικών και της μεθόδου υπολογισμού των γεωμετρικών διαστάσεών του, καθώς και μια προσομοίωση ενός εικονικού GTEM cell. Τέλος, γίνεται μια ενδεικτική, τελική πρόταση για την κατασκευή ενός GTEM cell με διαστάσεις περιοχής εξέτασης 74cmx82cmx30cm.

Abstract

Aim of this thesis is the study and construction of a GTEM cell. The GTEM cell (Gigahertz Transversal Electromagnetic Mode) is an extensive transmission line that is operated in the TEM mode so as to simulate a free space planar wave. This device is used for the realisation of either measurements of radiated emissions or radiated susceptibility tests of electronic equipment in an extensive range of frequencies up to 1 GHz.

In this paper, the theoretical background of GTEM cell, an analytical presentation of its technical characteristics, the method of calculating its geometric dimensions, as well as a simulation of a virtual GTEM cell are represented successively. Finally, an indicative, final proposal for the construction of a GTEM cell, with defined testing volume of 74 cmx 82 cmx 30 cm, is made.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**Κεφάλαιο 1**

Εισαγωγή.....σελ 15

Κεφάλαιο 2

Στοιχεία θεωρίας.....σελ 23

2.1 Το TEM CELL.....σελ 23

2.2 Το GTEM cell.....σελ 32

2.2.1 Χαρακτηριστική αντίσταση.....σελ 38

2.2.2 Σύστημα τερματισμού δύο ζωνών συχνοτήτων.....σελ 45

2.2.2.1 Ωμικός Τερματισμός.....σελ 47

2.2.2.2 Τερματισμός πεδίου.....σελ 51

Κεφάλαιο 3

Βασική μελέτη - ανάλυση των γεωμετρικών διαστάσεων του
GTEM cell.....σελ 55

3.1 Προδιαγραφές.....σελ 55

3.2 Οι Διαστάσεις του GTEM cell.....σελ 56

3.2.1 Οι Εξωτερικές Διαστάσεις.....σελ 57

3.2.1.1 $h_{eut} = 0,22m$ σελ 60

3.2.1.2 $h_{eut} = 0,25m$ σελ 62

3.2.1.3 $h_{eut} = 0,30m$σελ 64

3.2.2 Η Περιοχή Εξέτασης.....σελ 66

3.2.2.1 $h_{eut} = 0,22m$ σελ 67

3.2.2.2 $h_{eut} = 0,25m$ σελ 67

3.2.2.3 $h_{eut} = 0,30m$σελ 68

3.2.3 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων και
σύγκριση.....σελ 69

3.2.4 Το $apex$σελ 71

3.2.4.1 $h_{eut} = 0,22m$σελ 73

3.2.4.2 $h_{eut} = 0,25m$σελ 73

3.2.4.3 $h_{eut} = 0,30m$σελ 74

3.2.5 Συνολικές διαστάσεις.....σελ 75

Κεφάλαιο 4

<i>Επιμέρους τμήματα του GTEM cell</i>σελ	77
4.1 Τμήμα Ωμικού Φορτίου.....σελ	77
4.2 RF απορροφητές.....σελ	86
4.3 Συμπληρωματικά τεχνικά στοιχεία.....σελ	92

Κεφάλαιο 5

<i>Η προσομοίωση του GTEM cell</i>σελ	93
5.1 Το πρόγραμμα προσομοίωσης Super NEC.....σελ	93
5.1.1 Εισαγωγή.....σελ	93
5.1.2 Θεωρία του προγράμματος προσομοίωσης Super NEC.....σελ	95
5.1.3 Η εξίσωση του Rocklington.....σελ	99
5.2 Η προσομοίωση του GTEM cell με τη χρήση του Super NEC.....σελ	100
5.2.1 Μονόπολο-Δέκτης στη θέση 2.....σελ	103
5.2.1.1 $f=400\text{MHz}$σελ	105
5.2.1.2 $f=500\text{MHz}$σελ	106
5.2.1.3 $f=600\text{MHz}$σελ	107
5.2.1.4 $f=700\text{MHz}$σελ	108
5.2.1.5 $f=800\text{MHz}$σελ	109
5.2.1.6 $f=900\text{MHz}$σελ	110
5.2.1.7 $f=1000\text{MHz}$σελ	111
5.2.1.8 $f=1100\text{MHz}$σελ	112
5.2.2 Μονόπολο-Δέκτης στη θέση 1.....σελ	112
5.2.2.1 $f=400\text{MHz}$σελ	114
5.2.2.2 $f=500\text{MHz}$σελ	115
5.2.2.3 $f=600\text{MHz}$σελ	116
5.2.2.4 $f=700\text{MHz}$σελ	117
5.2.2.5 $f=800\text{MHz}$σελ	118
5.2.2.6 $f=900\text{MHz}$σελ	119
5.2.2.7 $f=1000\text{MHz}$σελ	120
5.2.2.8 $f=1100\text{MHz}$σελ	121
5.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....σελ	121

Κεφάλαιο 6

Τελική πρόταση.....σελ 127

Βιβλιογραφία.....σελ 132

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1.1:Το TEM cell.....	σελ 25
Σχήμα 2.1.2:Κατανόηση του μεγέθους Δs	σελ 27
Σχήμα 2.1.3:Τομή του TEM cell.....	σελ 28
Σχήμα 2.1.4:Τα μέρη του TEM cell.....	σελ 30
Σχήμα 2.2.1:Το γεωμετρικό σχέδιο του GTEM cell.....	σελ 33
Σχήμα 2.2.2:Η μορφή των πεδίων που σχηματίζονται μέσα στο cell όπως φαίνονται από την είσοδο του GTEM cell....	σελ 34
Σχήμα 2.2.3:Το α_{ref} ενός GTEMcell.....	σελ 34
Σχήμα 2.2.4:Γραφική παράσταση της εξάρτησης των μεγεθών E, h_n και P	σελ 37
Σχήμα 2.2.1.1:Κάθετη τομή στο μήκος του cell.....	σελ 40
Σχήμα 2.2.1.2:Η χαρακτηριστική αντίσταση σε σχέση με την κατακόρυφη θέση του κεντρικού αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές του πλάτους του.....	σελ 44
Σχήμα 2.2.1.3:Η χαρακτηριστική αντίσταση σε σχέση με το πλάτος του κεντρικού αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης θέσης του.....	σελ 44
Σχήμα 2.2.2.1.1:Ο τερματισμός ρεύματος στον πίσω τοίχο του cell.....	σελ 50
Σχήμα 2.2.2.1.2:Ο συντελεστής ανάκλασης ως συνάρτηση της συχνότητας για διαφορετικούς αριθμούς δοντιών και αντιστάσεων, απουσία RF απορροφητών.....	σελ 51
Σχήμα 2.2.2.2.1:Απορροφητές πυραμιδοειδούς σχήματος.....	σελ 52
Σχήμα 2.2.2.2.2:Πλάγια όψη του GTEM cell.....	σελ 53
Σχήμα 3.2.1.1:Η πλάγια όψη του GTEM cell.....	σελ 58

Σχήμα 3.2.1.2: Η κάτοψη του GTEM cell.....	σελ 59
Σχήμα 3.2.2.1: Η πλάγια όψη της περιοχής εξέτασης του GTEM cell.....	σελ 66
Σχήμα 3.2.4.1: Η πλάγια όψη του apex, στην αρχή του GTEM cell.....	σελ 71
Σχήμα 3.2.4.2: Η κάτοψη του apex.....	σελ 72
Σχήμα 4.1.1: Η δύναμη του πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του εσωτερικού αγωγού.....	σελ 79
Σχήμα 4.1.2: Κάτοψη του GTEM cell.....	σελ 80
Σχήμα 4.1.3: Η δύναμη πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του κεντρικού αγωγού.....	σελ 82
Σχήμα 4.1.4: Το σχήμα του κεντρικού δοντιού προκειμένου ο ωμικός τερματισμός να ανταποκρίνεται στην εκθετική ελάττωση από τα 50 στα 330Ω.....	σελ 84
Σχήμα 4.1.5: Πλευρικά δόντια και στις δύο περιπτώσεις.....	σελ 85
Σχήμα 4.2.1: Το EBB-600.....	σελ 88
Σχήμα 4.2.2: Γράφημα της απορρόφησης του EBB-600.....	σελ 88
Σχήμα 4.2.3: Το EHP-24.....	σελ 90
Σχήμα 4.2.3: Απόκριση της απορρόφησης του EHP-24 σε dB.....	σελ 90
Σχήμα 4.2.4: Απόκριση της απορρόφησης του FRANKO _{Sorb} P600 σε dB.....	σελ 92
Σχήμα 5.1.2.1: Οι διαφορετικοί συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη όταν συμπληρώνεται ο πίνακας αλληλεπιδράσεων της μεθόδου των ροπών.....	σελ 98
Σχήμα 5.2.1: Η πίσω όψη της προσομοιωμένης δομής του GTEM cell.....	σελ 101
Σχήμα 5.2.2: Μια τρισδιάστατη άποψη του GTEM cell χωρίς το ένα πλάγιο φύλλο του.....	σελ 101
Σχήμα 5.2.3: Δισδιάστατη όψη του GTEM cell όπου υποδεικνύονται κάποια στοιχεία του καθώς και οι θέσεις των μονοπόλων που συμμετέχουν στην προσομοίωση.....	σελ 102

Σχήμα 5.2.4: Η κάτοψη του GTEM cell έχοντας αφαιρέσει το πάνω φύλλο.....σελ	102
Σχήμα 5.2.3.1: Γραφική παράσταση της διαφοράς ισχύος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για μονόπολο-δέκτη στη θέση 2.....σελ	123
Σχήμα 5.2.3.2: Γραφική παράσταση της διαφοράς ισχύος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για μονόπολο-δέκτη στη θέση 1.....σελ	124
Σχήμα 6.1: Μηχανολογικό σχέδιο της πλάγιας όψης του GTEM cell.....σελ	129
Σχήμα 6.2: Μηχανολογικό σχέδιο της κάτοψης του GTEM cell.....σελ	131

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.2.3.1: Αναλυτική παρουσίαση των τιμών που προκύπτουν για όλα τα γεωμετρικά μεγέθη του cell για τις διαφορετικές απαιτούμενες τιμές h_{eut}σελ	70
Πίνακας 3.2.3.2: Σύγκριση των αναλογίων του cell που υπολογίζονται με αυτές που θα συναντήσει κάποιος σήμερα αν αναζητήσει ένα GTEM cell στο εμπόριο.....σελ	70
Πίνακας 4.2.1: Απορρόφηση του EBB-600.....σελ	87
Πίνακας 4.2.2: Απορρόφηση του SFC 24.....σελ	89
Πίνακας 4.2.3: Απορρόφηση του EHP-24.....σελ	91
Πίνακας 5.2.3.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης 1.....σελ	122
Πίνακας 5.2.3.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης 2.....σελ	122

Κεφάλαιο 1

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMC/EMI) είναι όροι που συναντώνται σήμερα στις περισσότερες εκφάνσεις της σύγχρονης ζωής εξαιτίας της ραγδαίας εξάπλωσης της χρήσης των ηλεκτρονικών συστημάτων και των ψηφιακών κυκλωμάτων. Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα μιας ηλεκτρονικής συσκευής είναι η ικανότητα της για ασφαλή λειτουργία σε ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον χωρίς να επηρεάζεται από αυτό. Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή είναι η εξασθένιση του επιθυμητού ηλεκτρομαγνητικού σήματος εξαιτίας κάποιας ηλεκτρομαγνητικής ανατάραξης.

Μία από τις πρώτες καταγεγραμμένες περιπτώσεις ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής αναφέρεται το 1927 όταν παρατηρήθηκε λανθασμένη ένδειξη ύψους από την αντίστοιχη συσκευή ενός αεροσκάφους εξαιτίας παρεμβολής παραγόμενης από το σύστημα ανάφλεξης του αεροσκάφους. Όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα η πρώτη αναφορά έγινε το 1945 από τμήμα του πολεμικού ναυτικού στο κείμενο με τίτλο 'Interference Measurement, Radio, Methods of 150kc to 20Mc). Με το πέρασμα των χρόνων έγιναν πολλές προσπάθειες προκειμένου να μελετηθούν αυτά τα δύο φαινόμενα.

Από το 1996 όλα τα ηλεκτρονικά προϊόντα τα οποία πωλούνται στην ευρωπαϊκή ένωση είναι απαραίτητο πριν να έχουν εξεταστεί όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική τους συμβατότητα (EMC). Οι κλασικές μετρήσεις για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (ΗΣ) περιλαμβάνουν δύο μέρη:

α) Τις μετρήσεις ευαισθησίας στα οποία ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία διαφόρων συχνοτήτων έτσι ώστε να εξετασθεί αν ο εξοπλισμός αυτός μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά μέσα σε αυτό το περιβάλλον.

β) Διεξαγωγή μετρήσεων προκειμένου να εξετασθεί η εκπομπή του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και κατά πόσον ακτινοβολούνται ανεπιθύμητα σήματα από αυτόν.

Υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι μετρήσεων κατάλληλες για την διεξαγωγή ελέγχου της ευαισθησίας και της εκπομπής μιας συσκευής οι οποίες εξαρτώνται από τους παρακάτω παράγοντες: [2]

- μέγεθος του εξοπλισμού υπό εξέταση
- περιοχή συχνοτήτων
- περιορισμοί των μετρήσεων
- είδος του πεδίου που θα μετρηθεί (ηλεκτρικό ή μαγνητικό)
- πόλωση του πεδίου
- ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου σήματος

Όλες οι μέθοδοι έχουν τους δικούς τους περιορισμούς και έτσι καμία μέθοδος δεν είναι ιδανική για όλα τις μετρήσεις. Η τεχνική βάση για αυτές τις μεθόδους καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποδεικνύουν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς κάθε μιας από αυτές. Μερικές από αυτές τις μεθόδους αναφέρονται παρακάτω:

- μέθοδος ανοιχτού χώρου (τα γνωστά OATS:Open Area Test Site)
- ανηχοικά δωμάτια
- ανακλαστικά δωμάτια
- εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κελιά (TEM) και η εξέλιξη τους για μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων τα GTEM

Στην συνέχεια αναφέρονται λίγα λόγια για κάθε από τις παραπάνω μεθόδους.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος του ανοιχτού χώρου (Open Area Test Site) εξασφαλίζει μια καθαρή, ευθεία προσέγγιση των χαρακτηριστικών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από ένα γειωμένο παραπέτασμα στο οποίο τοποθετείται ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός και ταυτόχρονα από την απουσία οποιασδήποτε άλλης επιφάνειας γύρω από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Παράλληλα χρησιμοποιούνται κεραίες για την δημιουργία και την μέτρηση των πεδίων. Έχουμε έτσι μια κεραία πομπού και μια κεραία δέκτη. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι είναι δύσκολο να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο ανοιχτού χώρου χωρίς να έχουμε παρεμβολές εξαιτίας του όλο και αυξανόμενου αριθμού των ραδιοσυχνοτήτων εκπομπής που χρησιμοποιούνται από τα δημόσια επικοινωνιακά συστήματα. Οι εξωτερικές πηγές προκαλούν σφάλματα στις μετρήσεις εκπομπής οι οποίες και επηρεάζονται από τα πεδία που δημιουργούνται από τα tests ευαισθησίας. Επιπροσθέτως ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η αναγκαιότητα μεγάλου χώρου μετρήσεων καθώς και η απουσία μεταλλικών αντικειμένων στην γύρω περιοχή. Εξαιτίας όλων αυτών οι μετρήσεις ανοιχτού χώρου είναι χρήσιμες μόνο σε συχνότητες κάτω των 30MHz.

Μία άλλη μέθοδος είναι αυτή των ανηχοικών δωματίων. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε ηλεκτρομαγνητικό

απομονωμένο περιβάλλον σύμφωνα με τα διεθνή δεδομένα. Στην μέθοδο αυτή, για την δημιουργία και την μέτρηση του πεδίου χρησιμοποιούνται δύο κεραίες μία πομπού και μία δέκτη. Προκειμένου το ανηχοϊκό δωμάτιο να πλησιάζει στις ιδιότητες του ελεύθερου χώρου οι τοίχοι του καλύπτονται με RF απορροφητές. Βέβαια πρέπει να σημειώσουμε ότι η απορρόφηση δεν είναι πάντοτε τέλεια οπότε οι ανακλάσεις εισάγουν σφάλματα είτε πρόκειται για tests ευαισθησίας είτε για μετρήσεις εκπομπής. Επιπροσθέτως ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα της μεθόδου αυτής έγκειται στο γεγονός ότι απαιτείται υψηλή τάση εισόδου προκειμένου να δημιουργηθεί πεδίο γύρω στα 10V/m σε απόσταση 3m από την κεραία του πομπού [1]. Τέλος είναι σημαντικό να σημειώσουμε στα μειονεκτήματα της μεθόδου το υψηλό κόστος για την μεγάλη ποσότητα του απορροφητικού υλικού που απαιτείται για την κάλυψη ολόκληρου του δωματίου.

Η τρίτη μέθοδος είναι αυτή των ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένων δωματίων ,η οποία χρησιμοποιείται για την δημιουργία ενός ομοιόμορφου, ιστροπικού πεδίου μέσα σε μια εσώκλειστη μεταλλική κατασκευή. Η πόλωση του ομοιόμορφου πεδίου ποικίλει και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στην μέθοδο αυτή να είναι δυνατόν να αποφευχθεί η περιστροφή του εξοπλισμού υπό εξέταση, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους όπου η περιστροφή του EUT (Equipment Under Test) είναι απαραίτητη. Το ομοιόμορφο και ιστροπικό πεδίο επιτυγχάνεται με την περιστροφή tuner ή stirrer.[2],[3] Η περιστροφή αυτή γίνεται είτε συνεχόμενα είτε με βήματα ανάλογα με τις ανάγκες των μετρήσεων. Κατά την διάρκεια της περιστροφής του tuner μεταβάλλονται οι συσχετιζόμενες οριακές συνθήκες του δωματίου , η πόλωση και η δύναμη του πεδίου καθώς και η δύναμη εισόδου του δωματίου. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής είναι ακριβή μέχρι μια συγκεκριμένη συχνότητα ,που ονομάζεται συχνότητα αποκοπής

και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δωματίου.

Ένας από τους κύριους περιορισμούς κοινός σε όλες τις μεθόδους διεξαγωγής μετρήσεων ευαισθησίας είναι η ύπαρξη μιας κεραίας που χρησιμεύει ως πηγή του πεδίου. Για ακριβείς μετρήσεις η απόσταση που χωρίζει την κεραία από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό υπό εξέταση θα πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη προκειμένου να εισάγει τα χαρακτηριστικά του μακρινού πεδίου.[2] Αυτό βέβαια δεν είναι πάντα εφικτό κυρίως σε περιπτώσεις περιορισμένων δωματίων. Ταυτόχρονα η απαίτηση για ευαίσθητη και υψηλού επιπέδου εξέταση του πεδίου υποδεικνύει την ανάγκη για μετρήσεις κοντινού πεδίου.[2] Αυτές οι απαιτήσεις εισάγουν ένα άλλο πρόβλημα το οποίο έγκειται στην ομοιομορφία του πεδίου πάνω από τον υπό εξέταση εξοπλισμό. Μερικές από αυτές τις δυσκολίες και τους περιορισμούς μπορούν να αποφευχθούν ή να ελαχιστοποιηθούν με την χρησιμοποίηση των Tem Cells επειδή αυτά λειτουργούν τα ίδια ως εκπομποί (μεταφορά ρεύματος μέσω του κεντρικού αγωγού) και έτσι ελαχιστοποιείται η χρήση των κεραίων. Το 1974 ο M.L.Crawford περιέγραψε το Tem (Transverse Electromagnetic Mode) Cell. Το Tem Cell σχεδιάστηκε με βάση την ιδέα μιας εκτεταμένης γραμμής μεταφοράς που λειτουργεί σε ρυθμό Tem (εγκάρσιος ηλεκτρομαγνητικός ρυθμός) έτσι ώστε να προσομοιάζει ένα ανοιχτού χώρου επίπεδο κύμα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε να κάνουμε με ένα κλειστό προστατευμένο χώρο και κατά συνέπεια μπορεί να ελεγχθεί πολύ πιο εύκολα από όλες τις άλλες μεθόδους. Η κατασκευή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για μετρήσεις ευαισθησίας όσο και για μετρήσεις εκπομπής σε συχνότητες μέχρι μια ανώτερη τιμή η οποία κυμαίνεται γύρω στα 500MHz και εξαρτάται από τις μηχανικές διαστάσεις του cell.[1] Τα επόμενα χρόνια έγιναν προσπάθειες να

κατασκευαστούν και κάποιες βελτιωμένες μορφές του TEM cell με την χρήση απορροφητών ,προκειμένου να αυξηθεί η συχνότητα αποκοπής αλλά και πάλι η μέγιστη συχνότητα ήταν πολύ κάτω από το 1GHz.[1] Αυτές οι προσπάθειες για βελτίωση του TEM μπορεί αρχικά να μην οδήγησαν στα επιθυμητά αποτελέσματα αλλά στην συνέχεια έδωσαν την ιδέα για ένα καινούριο τύπο του TEM που θα ανταποκρινόταν στην ανάγκη για μετρήσεις σε υψηλότερες συχνότητες.

Έτσι λοιπόν οδηγηθήκαμε στην κατασκευή του GTEM (Gigahertz Transversal Electromagnetic Mode) cell το 1987 από τον D.Konigstein και τον D.Hansen.Η νέα αυτή κατασκευή ξεπέρασε όλους τους περιορισμούς των προηγούμενων TEM με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της σε συχνότητες της τάξης των Gigahertz.Πρόκειται για μια εκτεταμένη γραμμή μεταφοράς που λειτουργεί σε εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικό ρυθμό ,όπως άλλωστε και το TEM,με την διαφορά ότι τερματίζεται με σύστημα τερματισμού δύο ζωνών συχνοτήτων.[1] Επίσης στην νέα κατασκευή έγινε προσπάθεια να αποφευχθούν οι γωνίες οι οποίες αποτελούν τον κύριο λόγο των περιορισμών της μέγιστης συχνότητας. Εξαιτίας αυτών το GTEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μετρήσεις ευαισθησίας όσο και σε μετρήσεις εκπομπής για συχνότητες πάνω από 1GHz.Με το πέρασμα των χρόνων όλο και περισσότερες βελτιώσεις γίνονταν με την χρήση απορροφητών και άλλων εξαρτημάτων με αποτέλεσμα σήμερα τα GTEM να χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή μετρήσεων σε συχνότητες πολύ μεγαλύτερες του 1GHz.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η κατασκευή ενός GTEM cell προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την διεξαγωγή τόσο μετρήσεων ευαισθησίας όσο και μετρήσεων εκπομπής μικρού ηλεκτρονικού εξοπλισμού ,σύμφωνα με τα

διεθνή δεδομένα των EMC (Electromagnetic Compatibility) μετρήσεων. Οι ηλεκτρονικές συσκευές που μας ενδιαφέρουν είναι κυρίως ασύρματα μικρόφωνα, κινητά και γενικά μικρών διαστάσεων αντικείμενα, γεγονός που θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό και τις διαστάσεις του GTEM που θα κατασκευάσουμε.

Παρακάτω γίνεται μια αναφορά ξεχωριστά σε κάθε κεφάλαιο της εργασίας, έτσι ώστε να γίνει κατανοητό το περιεχόμενο καθενός από αυτά:

- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια πρώτη αναφορά και σύντομη περιγραφή του TEM cell, στην οποία αναφέρονται όλες οι δυνατότητες και οι περιορισμοί που εισάγονται κατά την χρησιμοποίηση του. Επιπροσθέτως γίνεται μια πιο εκτεταμένη αναφορά στην εξελιγμένη μορφή του cell, το GTEM. Αναφέρονται αναλυτικά οι αρχές οι οποίες διέπουν το GTEM καθώς και κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες που παίζουν πρωταρχικό ρόλο στην εγγύηση για ακριβή αποτελέσματα.
- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτικός υπολογισμός των συνολικών αριθμητικών διαστάσεων του GTEM cell σύμφωνα με τις προδιαγραφές που προέκυψαν από τη θεωρητική μελέτη και τη συλλογή των ήδη υπάρχοντων δεδομένων.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που απαιτείται να έχουν τα επιμέρους τμήματα που χρειάζονται για να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του GTEM cell.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο κάνοντας χρήση προγράμματος ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης (Super NEC) ελέγξαμε τη

συμπεριφορά ενός εικονικού GTEM cell τα χαρακτηριστικά του οποίου προσδιορίστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

- Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια τελική πρόταση για την πιο αποδοτική κατασκευή του GTEM cell υπό το πρίσμα όλων των προηγούμενων στοιχείων που προέκυψαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 2

Κεφάλαιο 2

Στοιχεία θεωρίας

2.1 Το TEM CELL

Το GTEM cell και ο τρόπος που δουλεύει αποτελεί εξέλιξη του TEM cell το οποίο παρουσιάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Η βασική αρχή πάνω στην οποία βασίζεται η λειτουργία του GTEM, ωστόσο, παραμένει η ίδια και έτσι θα ήταν χρήσιμο να παρουσιάσουμε πρώτα το TEM cell και στη συνέχεια να παρουσιάσουμε τις διαφορές.

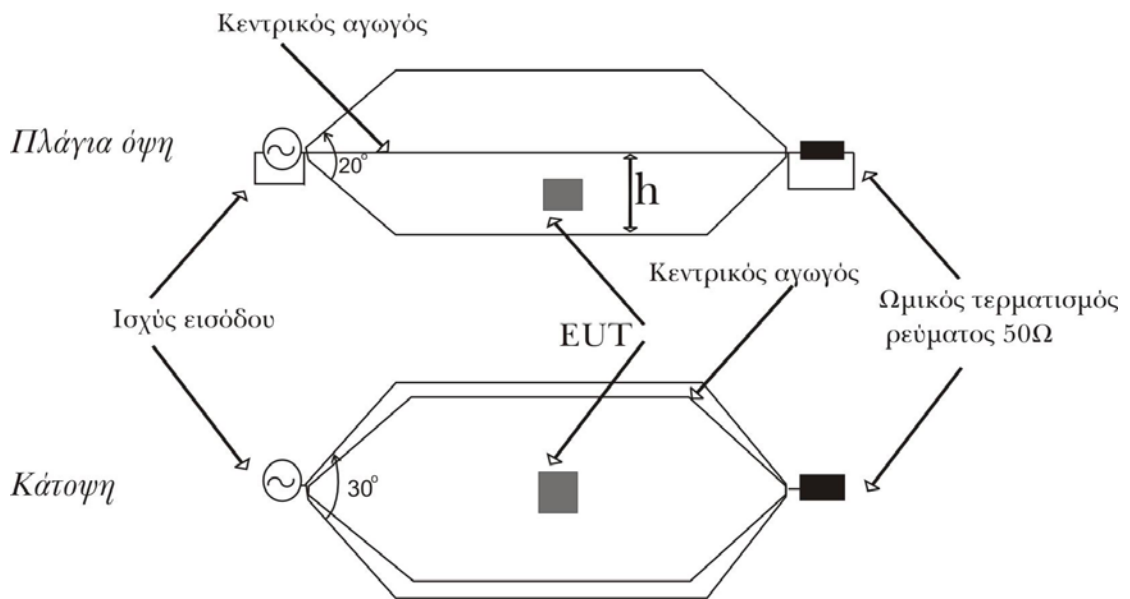
Το TEM cell είναι στην ουσία μια συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός ενιαίου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου το οποίο είναι θωρακισμένο από το περιβάλλον του. Ο τρόπος με τον οποίο είναι κατασκευασμένο δίνει πολλές δυνατότητες για εργαστηριακές μετρήσεις που αλλιώς δε θα ήταν εφικτές. Το ίδιο το TEM cell είναι ένα σύνολο από γραμμές εκπομπής των οποίων η γεωμετρική κατασκευή αποτρέπει την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο περιβάλλον αλλά προσφέρει και ηλεκτρομαγνητική απομόνωση στο εσωτερικό του.

Η χρησιμότητα μιας τέτοιας κατασκευής είναι πολλαπλή καθώς οι μετρήσεις που μπορούμε να πάρουμε είναι δυο ειδών:

Το πρώτο είδος μετρήσεων λέγονται μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας ή EMC (από τα αρχικά των λέξεων *electromagnetic compatibility*) κατά τις οποίες μετράμε την ικανότητα μιας ηλεκτρονικής συσκευής να λειτουργεί μέσα σε ένα γνωστό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και κατά πόσο αυτό επηρεάζει την απόδοσή του. Επιπλέον, μετράμε τα επίπεδα εκπομπής μιας ηλεκτρονικής συσκευής και βλέπουμε κατά πόσο ανταποκρίνεται στις διεθνείς προδιαγραφές.

Το δεύτερο είδος μετρήσεων είναι οι λεγόμενες μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (*EMI - electromagnetic interference*). Εδώ μετράμε την εξασθένιση του επιθυμητού ηλεκτρομαγνητικού σήματος το οποίο λειτουργεί μέσα σε συνθήκες οι οποίες προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Σε αυτό το είδος μετρήσεων το TEM cell υπερέχει αισθητά των άλλων τρόπων μέτρησης καθώς με αυτό τον τρόπο δε χρειαζόμαστε κάποια κεραία να δρα ως πηγή. Κάτι τέτοιο δημιουργεί συνήθως πολλά προβλήματα καθώς οι κεραίες έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης και δεν έχουν γραμμική απόκριση φάσης σε σχέση με τη συχνότητα. Αυτό κάνει την εκτίμηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων ασαφή και περιορισμένη. Επίσης, η χρήση κεραίας σημαίνει ότι θα πρέπει να έχουμε αρκετή απόσταση μεταξύ της κεραίας και της συσκευής που θέλουμε να μετρήσουμε (καλείται και EUT - από τα αρχικά των λέξεων *equipment under test*) ώστε να εξασφαλίσουμε συνθήκες μακρινού πεδίου κάτι που δεν είναι πάντοτε δυνατό στο εργαστήριο. Με τη χρήση του TEM cell αποφεύγουμε ή έστω ελαχιστοποιούμε τα προβλήματα αυτά καθώς δρα το ίδιο ως εκπομπός και έτσι η χρήση της κεραίας είναι περιττή.

Το TEM cell αποτελείται από μια παραλληλεπίπεδη ομοαξονική γραμμή εκπομπής της οποίας τα πλάτη και στα δυο άκρα μειώνονται και καταλήγουν το καθένα σε μια ομοαξονική επαφή με αντίσταση 50Ω . Αυτές οι επαφές στη συνέχεια ενώνονται μεταξύ τους με ένα πλατύ και επίπεδο αγωγό ο οποίος περνά από το κέντρο του cell. Αυτά φαίνονται καλύτερα στο σχήμα 2.1.1.



Σχήμα 2.1.1: Το TEM cell

Η μείωση του πλάτους στα δύο άκρα της ομοαξονικής γραμμής θα πρέπει να γίνεται σταδιακά και σε αρκετό μήκος ώστε να ελαχιστοποιείται η διαταραχή του κύματος καθώς αυτό περνά από το ένα μέρος στο άλλο. Γενικότερα, ενδείκνυται το μήκος αυτό να είναι τουλάχιστον το μισό του πλάτους του cell.

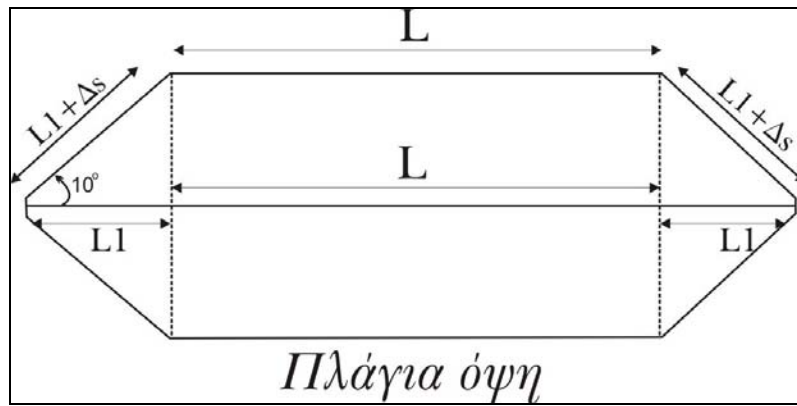
Στο σχήμα 2.1.1 βλέπουμε το μέγεθος h το οποίο είναι η απόσταση του εσωτερικού αγωγού από τον εξωτερικό. Το ύψος της συσκευής υπό εξέταση περιορίζεται στο ένα τρίτο του μεγέθους h , επειδή στα όρια της περιοχής αυτής το EM (ηλεκτρομαγνητικό) πεδίο είναι επαρκώς ομοιόμορφο και άρα αυτό είναι το μέγιστο μέγεθος της συσκευής. Επίσης

ισχύει και ότι για μεγαλύτερες συσκευές η ίδια η παρουσία της συσκευής επηρεάζει το πεδίο και έτσι δε μπορούμε να έχουμε ακριβή αποτελέσματα.

Ένα άλλο μέγεθος το οποίο μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε είναι το $2\Delta s$. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.2 το μέγεθος αυτό αντιπροσωπεύει τη διαφορά στο μήκος μεταξύ των δυο αγωγών (του εσωτερικού και του εξωτερικού) λόγω της κλίσης που έχει ο εξωτερικός αγωγός. Το Δs υπολογίζεται ως εξής:

$$\cos 10^\circ = \frac{L1}{L1 + \Delta s} \rightarrow \Delta s = L1 * \frac{1 - \cos 10^\circ}{\cos 10^\circ}$$

Αυτή η διαφορά είναι πολύ σημαντική γιατί επηρεάζει το εύρος συχνοτήτων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω αυτής της διαφοράς το κύμα διαδίδεται με μια χρονική καθυστέρηση Δt που είναι ίση με: $\Delta t = 2\Delta s / c$ (όπου c η ταχύτητα του φωτός). Αυτή η χρονική καθυστέρηση προκαλεί παραμόρφωση στο πεδίο η οποία γίνεται ιδιαίτερα εμφανής όταν αυτό λειτουργεί σε μεγαλύτερες συχνότητες. Είναι λοιπόν λογικό να συμπεράνουμε ότι το άνω άκρο του εύρους συχνοτήτων εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη γωνία μεταξύ του κεντρικού μέρους και των ακριανών μερών καθώς με μεγαλύτερες γωνίες το Δs μειώνεται. Αυτό βέβαια δεν συμφέρει καθώς προκαλεί τη γιγάντωση του κουτιού πράγμα ασύμφορο και παρά πολύ άβολο σε πρακτικές, εργαστηριακές εφαρμογές. Όπως θα δούμε παρακάτω το πρόβλημα αυτό αποφεύγεται στο GTEM cell του οποίου ο σχεδιασμός προβλέπει ίσο μήκος για τους δυο αγωγούς (τον εσωτερικό και τον εξωτερικό) και έτσι μπορούμε να φτάσουμε σε πολύ μεγαλύτερες συχνότητες.



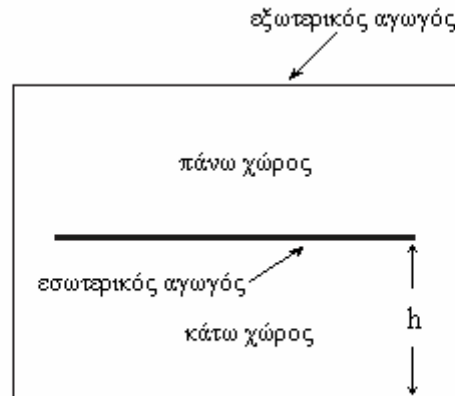
Σχήμα 2.1.2: Κατανόηση του μεγέθους Δs

Το σύνηθες είναι η μια από τις δυο επαφές να τερματίζεται με φορτίο 50Ω ενώ η άλλη να συνδέεται με:

α) Πηγή όταν θέλουμε να ελέγξουμε την ευαισθησία κάποιας συσκευής.

β) Δέκτη στην περίπτωση που θέλουμε να ελέγξουμε τις εκπομπές μιας συσκευής.

Στο σχήμα 2.1.3 βλέπουμε την τομή του TEM cell στο κέντρο του. Από ό,τι βλέπουμε το TEM cell δημιουργεί το πεδίο του ανάμεσα στον εσωτερικό και τον εξωτερικό αγωγό. Έτσι έχουμε ότι για τις μετρήσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κατά επιλογή μας είτε το χώρο που βρίσκεται πάνω είτε αυτόν που βρίσκεται κάτω από εσωτερικό αγωγό.



Εχθήμα 2.1.3: Τομή του TEM cell

Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι ενώ στο σχήμα μας ο εσωτερικός αγωγός έχει τοποθετηθεί στη μέση ακριβώς ανάμεσα στον πάνω εξωτερικό αγωγό και τον κάτω εξωτερικό αγωγό αυτό δεν είναι πάντα απαραίτητο παρόλο που αποτελεί την πιο συνηθισμένη περίπτωση. Ο εσωτερικός αγωγός μπορεί να έχει μια κατακόρυφη μετατόπιση έτσι ώστε να παρέχει μεγαλύτερο χώρο για τις μετρήσεις που θέλουμε να κάνουμε.

Ωστόσο, παρόλα τα προτερήματα που μας εξασφαλίζει η χρήση του TEM cell υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί στις δυνατότητες του. Το εύρος συχνοτήτων το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε εκτείνεται από 0 έως μια μέγιστη συχνότητα πέρα από την οποία το πεδίο παύει να έχει την επιθυμητή μορφή. Πιο συγκεκριμένα, ο όγκος στον οποίο το πεδίο μέσα στο TEM cell έχει ομοιόμορφη συμπεριφορά είναι αντιστρόφως ανάλογος τις μέγιστης αυτής συχνότητας.

Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας είναι ο όγκος του ίδιου του TEM cell. Αυτό συμβαίνει γιατί το cell φαίνεται να παρουσιάζει φαινόμενα συντονισμού σε συχνότητες των οποίων το μήκος κύματος είναι διπλάσιο των διαστάσεων του. Αυτό κάνει τα TEM cell να λειτουργούν μέχρι συχνότητες που συνήθως δεν ξεπερνούν τα 200 KHz. Για την καταπολέμηση αυτών των φαινομένων χρησιμοποιήθηκαν

απορροφητικά υλικά τα οποία τοποθετούνται στα τοιχώματα έτσι ώστε να μειωθούν οι ανακλάσεις και οι συντονισμοί όμως και πάλι στην πράξη αποδεικνύεται ότι η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας είναι αρκετά χαμηλότερη από το όριο του 1 GHz.

Όπως εξηγήσαμε παραπάνω η συχνότητα μέχρι την οποία λειτουργεί ικανοποιητικά το TEM είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του. Η συχνότητα αυτή ονομάζεται συχνότητα αποκοπής. Προκειμένου να ορίσουμε την συχνότητα αυτή αρκεί να θεωρήσουμε το ηλεκτρικό πεδίο E μέσα στο cell. Η δύναμη του πεδίου σε κάθε θέση μέσα στο cell καθορίζεται από την οριζόντια, την εγκάρσια και την κατακόρυφη διεύθυνση. Το ηλεκτρικό πεδίο E είναι στη ουσία κατακόρυφα πολωμένο στην περιοχή γύρω από το κέντρο του cell και βαθμιαία γίνεται οριζόντια πολωμένο όσο πλησιάζουμε στα άκρα του cell. Σε κάθε σημείο του cell το E βρίσκεται από το διανυσματικό άθροισμα της κατακόρυφης και της οριζόντιας συνιστώσας δηλαδή [4]:

$$E = (E_v^2 + E_h^2)^{1/2}$$

όπου E_v είναι η κατακόρυφη συνιστώσα και E_h είναι η οριζόντια συνιστώσα.

Στην περιοχή υπό εξέταση το ηλεκτρικό πεδίο είναι κατακόρυφα πολωμένο $E_v \gg E_h$. Η κατανομή του πεδίου είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του πεδίου εξέτασης και από την συχνότητα όσο αυτή είναι μικρότερη από την συχνότητα αποκοπής του ρυθμού πρώτης τάξης (TE_{10}). Η συχνότητα αυτή δίνεται από τον τύπο:

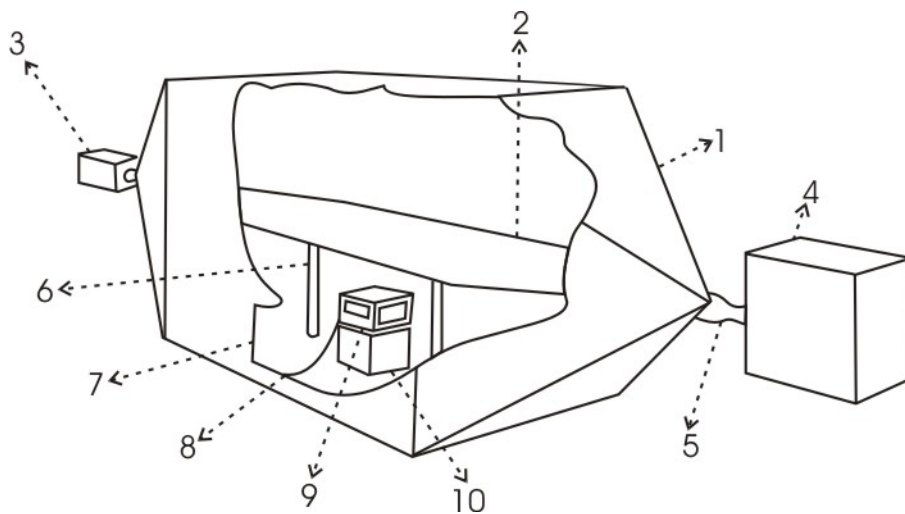
$$f_c(10) = \frac{c}{2w}$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και όπου w το πλάτος του cell.

Στην περίπτωση που έχουμε ρυθμούς υψηλότερης τάξης η ισότητα για τον προσδιορισμό της συχνότητας αποκοπής είναι :

$$f_c(m,n) = \frac{c(b^2m^2 + w^2n^2)}{2bw}$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, w το πλάτος του cell και b το ύψος του.



Σχήμα 2.1.4: Τα μέρη του TEM cell

Στο σχήμα 2.1.4 έχουμε μια πιο αναλυτική εικόνα ενός τυπικού TEM cell. Συγκεκριμένα διακρίνονται τα παρακάτω σύμφωνα με την αρίθμηση:

1. εξωτερικός αγωγός
2. εσωτερικός αγωγός
3. ομοαξονικό φορτίο
4. πηγή ή δέκτης (ανάλογα με τη χρήση)
5. ομοαξονικές επαφές (υπάρχουν και στις δυο άκρες)
6. διηλεκτρικά στηρίγματα του αγωγού
7. πόρτα πρόσβασης
8. επαφές εισόδου/ εξόδου/ τροφοδοσίας
9. συσκευή υπό μέτρηση (EUT)
10. διηλεκτρικό στήριγμα συσκευής

Κατά την κατασκευή ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον τρόπο που θα σχεδιαστούν και θα πραγματοποιηθούν η πόρτα πρόσβασης (7) και οι επαφές εισόδου, εξόδου και τροφοδοσίας (8). Αυτό γιατί τα σημεία αυτά είναι που παρουσιάζουν ανομοιομορφία στην επιφάνεια του TEM cell και αυτό μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρομαγνητική διαρροή ικανή να βλάψει την θωράκιση του και έτσι αλλοίωση των αποτελεσμάτων της μέτρησης. Ειδικότερα για τις επαφές τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται φίλτρα τα οποία επιλέγονται με προσοχή καθώς δεν θέλουμε να επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων αλλά και να αποτρέπουν την διαρροή προς τα μέσα.

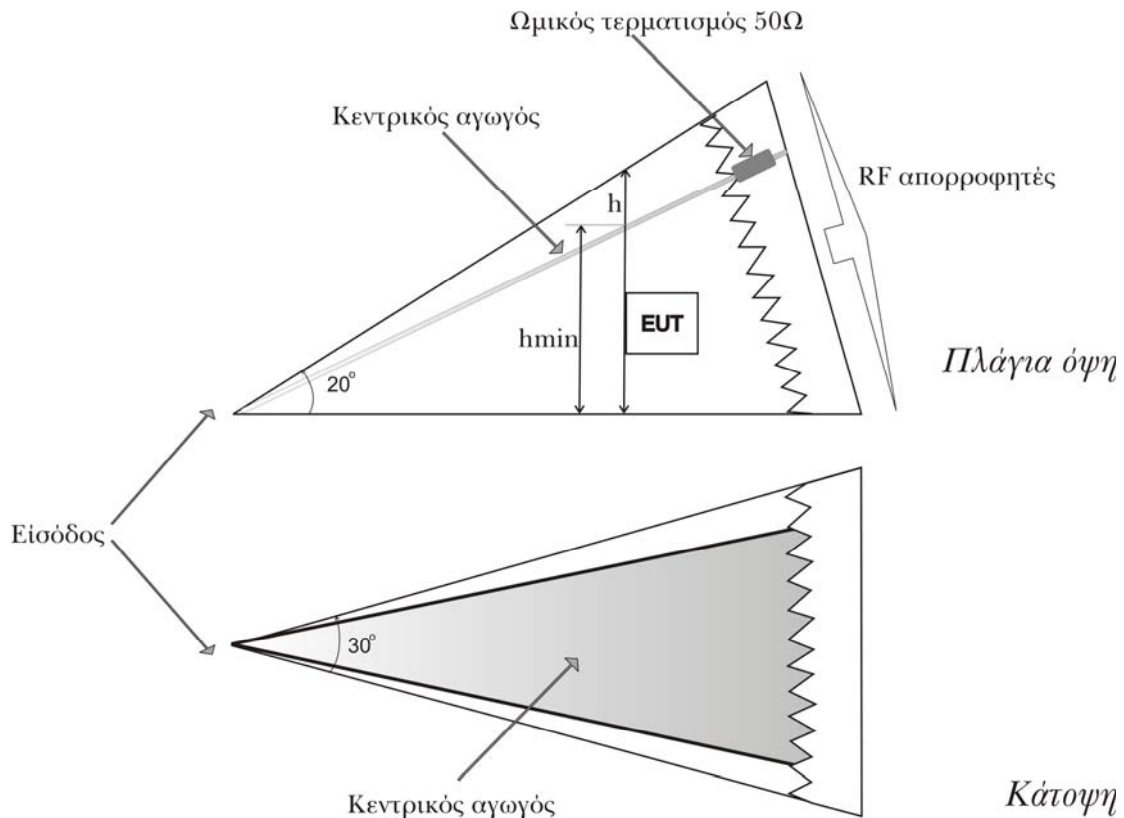
Στο σχήμα μας η συσκευή υπό μέτρηση (9 - EUT) παρατηρούμε ότι έχει τοποθετηθεί στο μέσο του χώρου με τη βοήθεια διηλεκτρικού στηρίγματος (10) ώστε να ισαπέχει από τον εξωτερικό και τον εσωτερικό αγωγό. Ωστόσο αυτό δεν είναι ένας κανόνας που ακολουθείται πάντα. Και αυτό γιατί με αυτόν τον τρόπο τα καλώδια εισόδου, εξόδου και τροφοδοσίας βρίσκονται στο πεδίο σε μεγάλο μήκος και άρα επηρεάζονται από αυτό σε μεγάλο βαθμό. Ένας άλλος πολύ συνηθισμένος τρόπος για την τοποθέτηση κατά την ώρα της μέτρησης είναι να τοποθετηθεί η συσκευή (EUT) κοντά στον κάτω εξωτερικό αγωγό (μιλώντας πάντα για την περίπτωση που το TEM cell είναι κατασκευασμένο όπως αυτό του σχήματος, δηλαδή με τον κάτω χώρο να χρησιμοποιείται για τη μέτρηση) κάτι που επιτυγχάνεται πάλι με τη βοήθεια διηλεκτρικού το οποίο όμως έχει πάχος, αυτή τη φορά, περίπου 2 cm. Με αυτόν τον τρόπο το μήκος των καλωδίων που βρίσκεται μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από TEM cell γίνεται ελάχιστο. Η λήψη και των δυο μετρήσεων και η σύγκριση μεταξύ τους μας δίνει μια πιο σαφή εικόνα για τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται η συσκευή μας. Ακόμα θα ήταν χρήσιμο να

αναφέρουμε ότι αυτές οι μετρήσεις γίνονται με τη συσκευή προσανατολισμένη μέσα στο TEM cell όπως είναι σχεδιασμένη για να είναι σε χρήση. Παρόλα αυτά η ανάλυση είναι πιο ολοκληρωμένη όταν το αντικείμενο περιστραφεί γύρω από τους άξονες του και με λήψη νέων μετρήσεων καθώς η συμπεριφορά του μπορεί να διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την πόλωση του πεδίου που το περιβάλλει.

2.2 Το GTEM cell

Το πρόβλημα του περιορισμένου εύρους συχνοτήτων που παρουσιάζει το TEM cell ξεπεράστηκε γύρω στο 1987 [6] οπότε και δημιουργήθηκε το GTEM cell. Με το GTEM ήταν πλέον δυνατή η πραγματοποίηση EMC μετρήσεων σε συχνότητες από dc μέχρι και τουλάχιστον το 1GHz.

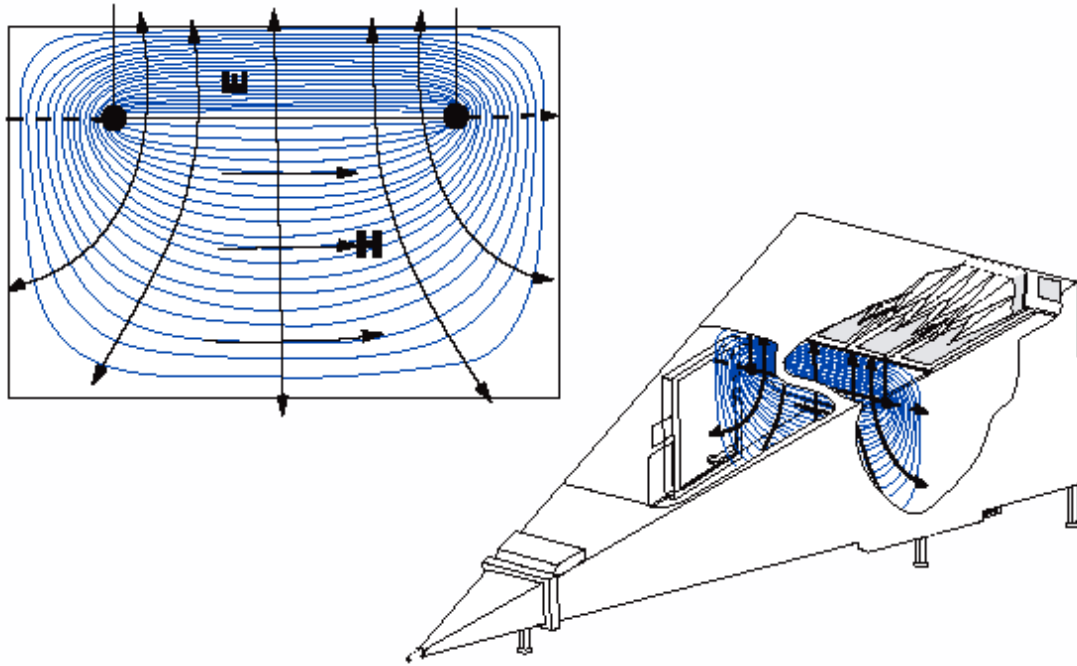
Ο λόγος που ξεπεράστηκε το όριο των περίπου 500MHz οφείλεται αρχικά στην εξάλειψη της διαφοράς του μήκους των δυο αγωγών Δs που όπως προαναφέρθηκε υπάρχει λόγω της κατασκευαστικής γεωμετρίας του TEM cell. Πλέον, τα μήκη εξωτερικού και εσωτερικού αγωγού είναι ίσα πράγμα που σημαίνει ότι ο χρόνος ταξιδιού κατά μήκος και των δύο αγωγών είναι ο ίδιος. Αυτό είναι ιδιαίτέρως σημαντικό στην περίπτωση πραγματοποίησης μετρήσεων με παλμούς καθώς ελαχιστοποιείται η διασπορά του παλμού. Ένας άλλος λόγος είναι ο δύο ζωνών συχνοτήτων πλέον τερματισμός του cell που περιλαμβάνει και τους RF απορροφητές. Ένα γενικό γεωμετρικό σχέδιο του GTEM cell φαίνεται στο σχήμα 2.2.1.



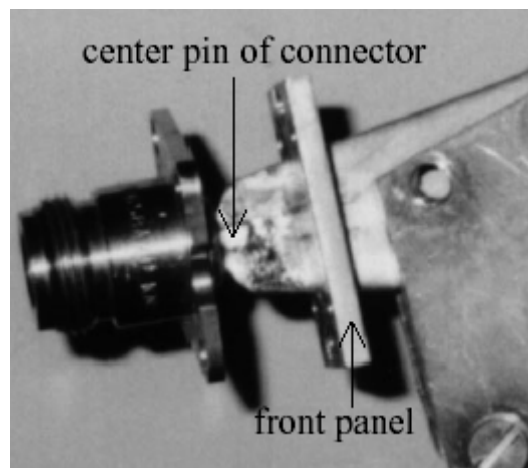
Σχήμα 2.2.1: Το γεωμετρικό σχέδιο του GTEM cell. Αποτελείται κυρίως από μια ορθογωνική γραμμή μεταφοράς που αποτελεί τον κεντρικό αγωγό και ονομάζεται διαφορετικά *septum*.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, το GTEM είναι μια πυραμιδικά ελαττούμενη γραμμή μεταφοράς που είναι διπλά (υβριδικά, όπως θα αναλυθεί παρακάτω) τερματισμένη και θωρακισμένη από έναν εξωτερικό αγωγό. Το *septum* είναι ένας επίπεδος και ευρύς αγωγός ο οποίος μπορεί και δημιουργεί σε μια περιοχή από κάτω του, σχετικά μέτριων διαστάσεων, μια σταθερή διανομή ηλεκτρικού πεδίου εφόσον του εφαρμοστεί ένα σήμα από γεννήτρια. Η μορφή των πεδίων που δημιουργούνται μέσα στο GTEM cell φαίνεται στο σχήμα 2.2.2. Η γεννήτρια θα συνδεθεί με το GTEM μέσω της μοναδικής εισόδου του και μιας ομοαξονικής γραμμής των 50Ω. Η σύνδεση μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και της ορθογωνικής γραμμής μετάδοσης πραγματοποιείται μέσω ενός αποσυνδεδεμένου τμήματος που ονομάζεται *apex* (σχήμα 2.2.3) και η λειτουργία του θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Η

κατασκευή αυτού του τμήματος βασίζεται σε μια πιο λεπτομερή και προσεκτική εφαρμογή των ίδιων συνθηκών με αυτές που πρέπει να ικανοποιούνται στο σύνολο του GTEM.



Σχήμα 2.2.2: Η μορφή των πεδίων που σχηματίζονται μέσα στο cell όπως φαίνονται από την είσοδο του GTEM cell.



Σχήμα 2.2.3: Το άρξεν ενός GTEMcell.

Η γωνία ανοίγματος του GTEM στο κάθετο επίπεδο (όπως το βλέπουμε στην πλάγια όψη δηλαδή) είναι 20° ενώ στο

οριζόντιο (κάτοψη αντιστοίχως) 30° . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση ο λόγος των κάθετων μεταξύ τους διαστάσεων να πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση :

$$\frac{\text{υψος}}{\text{πλάτος}} = \frac{2}{3}$$

Ο κεντρικός αγωγός δεν είναι τοποθετημένος στο κέντρο της γωνίας ανοίγματος των 20° αλλά κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε σημείο κατά μήκος του cell το ύψος του septum από τον κάτω εξωτερικό αγωγό να είναι ίσο με τα τρία τέταρτα του συνολικού ύψους του cell στο ίδιο σημείο. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, βλέποντας την πλάγια όψη του σχήματος 2.2.1 και ειδικότερα στο σημείο όπου αρχίζει η περιοχή εξέτασης θα πρέπει :

$$h_{\min} = \frac{3}{4}h$$

Η τυχόν ασυμμετρία που μπορεί να προκύπτει στη σταθερότητα του πεδίου λόγω αυτής της επιλογής για την τοποθέτηση του κεντρικού αγωγού θεωρείται αμελητέα αν λάβει κανείς υπ' όψιν του το γεγονός ότι έτσι εξοικονομείται χώρος για την δυνατή περιοχή εξέτασης.

Η επίτευξη χαρακτηριστικής αντίστασης των 50Ω απαιτεί την ισχύ της ακόλουθης σχέσης σύμφωνα με το [12]:

$$\frac{\text{πλάτος_κεντρικό_αγωγού}}{\text{πλάτος_εξωτερικό_αγωγού}} = 0,636$$

Ο ακριβής υπολογισμός της Z_0 πραγματοποιείται με τη χρήση δύο συγκεκριμένων αριθμητικών μεθόδων που θα περιγραφούν στη συνέχεια. Η αντίσταση μιας τέτοιας γεωμετρίας δεν δύναται να υπολογιστεί με εξισώσεις κλειστού τύπου.

Η περιοχή εξέτασης όπου επιτρέπεται να τοποθετηθεί το «υπό εξέταση αντικείμενο» (EUT: Equipment Under Test) καθορίζεται από την σταθερότητα του πεδίου που

επιτυγχάνεται ή αλλιώς από τα επιτρεπτά όρια μεταβολής και απόκλισης της πεδιακής έντασης. Στόχος είναι η εξασφάλιση της αξιοπιστίας καθώς και της επαναληψιμότητας. Το χαμηλό επίπεδο ανακλάσεων, ή αλλιώς ο υψηλός βαθμός απορρόφησης, από το πίσω τείχος του GTEM είναι αυτό που εξασφαλίζει τη σταθερότητα του πεδίου. Αυτό υλοποιείται με έναν ευρύ ταιριασμένο υβριδικό τερματισμό που τοποθετείται στο πίσω άκρο και απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που φτάνει εκεί. Ο τερματισμός αυτός αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

Αναφερόμενοι στην ένταση στο κέντρο της περιοχής εξέτασης εννοούμε την ονομαστική πεδιακή ένταση που μια προσέγγιση της προκύπτει από τη σχέση:

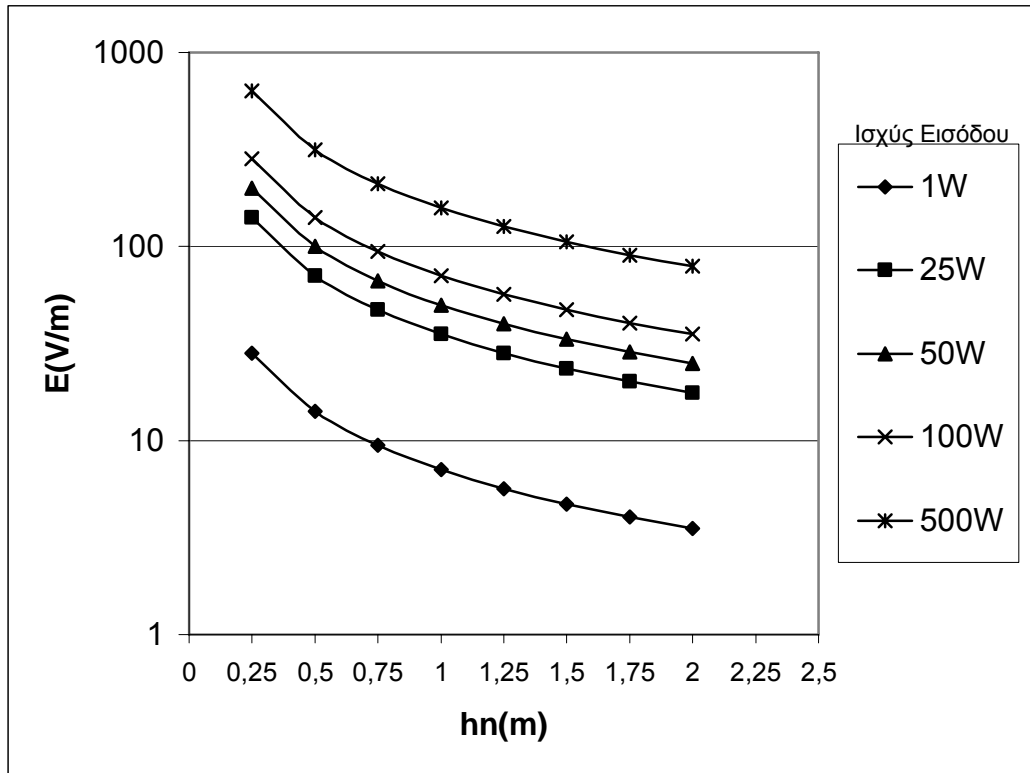
$$E_n = \frac{V_{\varepsilon\sigma\omega\tau} - V_{\varepsilon\xi\omega\tau}}{h_n}$$

όπου η διαφορά « $U=V_{\varepsilon\sigma\omega\tau}-V_{\varepsilon\xi\omega\tau}$ » αποτελεί την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ εσωτερικού και κάτω εξωτερικού αγωγού ενώ το ύψος h_n αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ των δύο αγωγών. Γνωρίζουμε όμως ότι:

$$P = \frac{U^2}{Z} \rightarrow P = \frac{(Eh_n)^2}{Z} \rightarrow$$

$$E = \frac{\sqrt{PZ}}{h_n}$$

Η τελευταία αυτή σχέση μας δείχνει ότι η επιθυμητή από εμάς τιμή έντασης στην περιοχή εξέτασης εξαρτάται από την ισχύ που θα δώσουμε στην είσοδο καθώς και από το ύψος του spectrum από τον εξωτερικό αγωγό στο σημείο αυτό. Το σχήμα 2.2.4 δείχνει πιο καθαρά την εξάρτηση αυτή.



Εχήμα 2.2.4: Γραφική παράσταση της εξάρτησης των μεγεθών E , h_n και P όπου η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής είναι $Z=50\Omega$

Κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων ευαισθησίας το EUT τοποθετείται μέσα στην περιοχή εξέτασης ενώ μία γεννήτρια τοποθετείται στην είσοδο του GTEM. Ο ρυθμός διάδοσης είναι TEM ωστόσο το μέτωπο του διαδιδόμενου κύματος είναι σφαιρικό. Παρόλα αυτά, θεωρούμε ότι έχουμε μια πολύ καλή προσέγγιση ενός επίπεδου κύματος ελεύθερου χώρου λόγω της μικρής γωνίας ανοίγματος. (Το χαρακτηριστικό αυτό ενισχύει τη συσχέτιση των μετρήσεων που υλοποιούνται με το GTEM και με τους ανηχοϊκούς θαλάμους.) Οι περισσότερες μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας απαιτούν την επίτευξη μέσα στο cell τιμή ονομαστικής έντασης γύρω στα 10V/m. Αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστεί να δώσουμε ισχύ εισόδου περίπου 0,5W για ένα σχετικά μικρό cell που έχει $h_n=50\text{cm}$. Ακόμα και για μεγαλύτερα cell, η τιμή αυτή θα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ισχύ που θα καταναλωνόταν σε έναν ανηχοϊκό θάλαμο.

Κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων εκπομπής τοποθετείται και πάλι το EUT στην περιοχή εξέτασης αλλά αυτή τη φορά στην είσοδο του cell συνδέεται μια συσκευή που έργο της είναι να μετράει το εκπεμπόμενο πεδίο από το υπό εξέταση αντικείμενο. Συνήθως, αυτή η συσκευή είναι ένας spectrum analyzer. Θεωρούμε ότι το πεδίο που μετράει ο analyzer οφείλεται αποκλειστικά στο απευθείας κύμα που φτάνει στην είσοδο και προέρχεται από το αντικείμενο. Τα κύματα κάθε άλλης κατεύθυνσης τερματίζονται από το σύστημα τερματισμού δύο ζωνών συχνοτήτων στο πίσω μέρος του cell.

2.2.1 Χαρακτηριστική αντίσταση

Το GTEM cell είναι μια εκτεταμένη γραμμή μεταφοράς που λειτουργεί σε εγκάρσια ηλεκτρομαγνητική μορφή όπως άλλωστε έχουμε ήδη αναφέρει. Είναι λοιπόν απαραίτητο να εισαχθεί χαρακτηριστική αντίσταση των 50Ω προκειμένου να αποφευχθούν οι ανακλάσεις οι οποίες θα προκαλέσουν την εμφάνιση και υψηλότερων ρυθμών εκτός από τον TEM ρυθμό. Προκειμένου να γίνει ο σχεδιασμός του cell θα πρέπει να είναι γνωστός ο τρόπος σύμφωνα με τον οποίο εξαρτάται η χαρακτηριστική αντίσταση από τις γεωμετρικές διαστάσεις. Έτσι λοιπόν, επειδή δεν υπάρχουν συγκεκριμένες εξισώσεις κλειστού τύπου για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής αντίστασης σε μια ασύμμετρη ορθογώνια γραμμή μεταφοράς, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι.

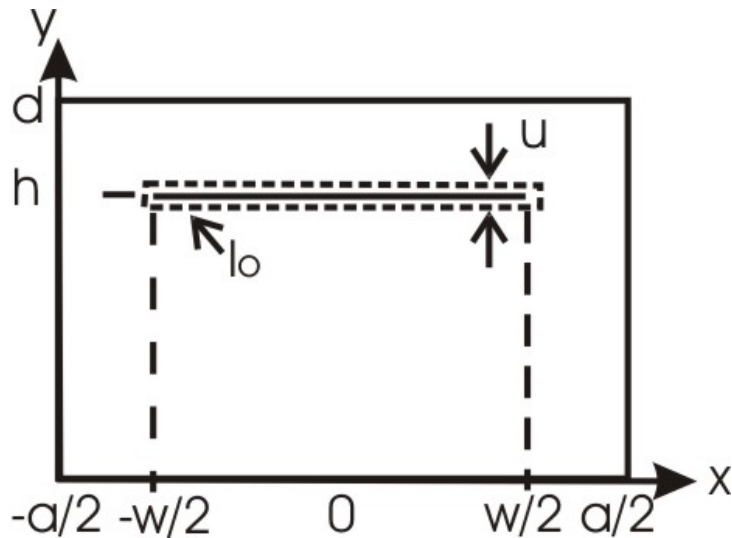
Όπως αναφέραμε και παραπάνω η χαρακτηριστική αντίσταση έχει άμεση σύνδεση με την γεωμετρία του GTEM για αυτό και θα περιγράψουμε τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η χαρακτηριστική αντίσταση από τις αλλαγές που μπορεί να γίνουν στην γεωμετρία μιας τέτοιας γραμμής μεταφοράς.

Σε αυτή την παράγραφο αναφέρονται δύο αριθμητικές μέθοδοι με την βοήθεια των οποίων είναι δυνατόν να γίνει

μια προσέγγιση της χαρακτηριστικής αντίστασης μιας ορθογώνιας γραμμής μεταφοράς. Οι αριθμητικές αυτές μέθοδοι που θα χρησιμοποιήσουμε για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής αντίστασης είναι δυνατόν να επιβεβαιώσουν την γεωμετρία του cell.

Στις δύο αυτές μεθόδους εκτός από τις προσεγγίσεις που από μόνες τους εισάγουν, χρησιμοποιείται και μία επιπλέον προσέγγιση αφού η μικρή γωνία στην αρχή του GTEM αγνοείται. Η τελευταία αυτή προσέγγιση γίνεται προκειμένου να μπορεί να θεωρηθεί ότι η διάδοση μέσα στο GTEM ακολουθεί τον ιδανικό εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό ρυθμό και ταυτόχρονα το πεδίο ακολουθεί τα χαρακτηριστικά του ηλεκτροστατικού πεδίου. Έτσι λοιπόν η προσέγγιση της χαρακτηριστικής αντίστασης του GTEM cell θα γίνει μέσω ενός ηλεκτροστατικού πεδίου σε μία ομοαξονική ορθογώνια γραμμή μεταφοράς (με βάση το [1]).

Η πρώτη μέθοδος η οποία αναφέρεται στο [13] χρησιμοποιεί την αρχή της απόκλισης για την προσέγγιση της χωρητικότητας μιας ορθογώνιας ομοαξονικής γραμμής μεταφοράς με ένα άπειρα λεπτό και κατακόρυφα offset κεντρικό αγωγό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.1.1.



Σχήμα 2.2.1.1: Κάθετη τομή στο μήκος του cell

Η ισότητα Poisson περιγράφει την σχέση ανάμεσα στην κατανομή του δυναμικού ϕ στην εγκάρσια τομή και στην κατανομή του φορτίου $\rho(x,y)$. Η σχέση αυτή φαίνεται παρακάτω:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\phi(x,y) = \frac{1}{E}\rho(x,y) \quad (1)$$

Παρακάτω φαίνονται οι οριακές συνθήκες όσον αφορά την κατανομή του δυναμικού λόγω του εξωτερικού αγωγού.

$$\begin{aligned} \phi\left(-\frac{1}{2}a, y\right) &= 0 \\ \phi\left(\frac{1}{2}a, y\right) &= 0 \\ \phi(x, 0) &= 0 \\ \phi(x, d) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Η συνθήκη συνέχειας εξαιτίας του κεντρικού αγωγού στο ύψος $y=h$, ο οποίος έχει θεωρηθεί άπειρα λεπτός ($u \rightarrow 0$) είναι:

$$\frac{\partial}{\partial y}\phi(x, h-0) = \frac{\partial}{\partial y}\phi(x, h+0) - \rho(x, h) \quad (3)$$

Στην εξίσωση αυτή τα $h+0$ και $h-0$ υποδεικνύουν ένα άπειρα μικρό διάστημα πάνω και κάτω από τον κεντρικό αγωγό αντίστοιχα. Επιπλέον το $\rho(x,h)$ αποτελεί την πυκνότητα του φορτίου στον αγωγό αυτό.

Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση Green η οποία δίνει στη θέση (x,y) το δυναμικό που προκαλείται από μία μονάδα φορτίου τοποθετημένη στην θέση (x_0,y_0) . Συνεπώς πρόκειται για μια λύση σε ένα πρόβλημα παρόμοιο με αυτό της σχέσης (1) αυτού του κεφαλαίου.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)G(x,y|x_0,y_0) = \frac{1}{E}\delta(x-x_0)\delta(y-y_0) \quad (4)$$

Όταν η συνάρτηση Green βρεθεί τότε το δυναμικό εξαιτίας της κατανομής του φορτίου στην επιφάνεια του αγωγού δίνεται από τον τύπο (5). Το l_0 υποδεικνύει το μονοπάτι ενσωμάτωσης κατά μήκος της επιφάνειας του κεντρικού αγωγού.

$$\phi(x,y) = \int G(x,y|x_0,y_0)\rho(x_0,y_0)dl_0 \quad (5)$$

Όταν το σύνορο της εγκάρσιας τομής προσδιορίζεται από το l_1 η χωρητικότητα για κάθε μονάδα μήκους για μια γραμμή μεταφοράς δίνεται από τον τύπο:

$$C = \frac{\left[\int \rho(x,y)dl_1\right]^2}{\iint \rho(x,y)G(x,y|x_0,y_0)\rho(x_0,y_0)dl_0dl_1} \quad (6)$$

από τον οποίο φαίνεται ότι η χωρητικότητα μεγιστοποιείται με κατάλληλη επιλογή μιας δοκιμαστικής συνάρτησης για την πυκνότητα ρεύματος. Αυτή η διαδικασία του υπολογισμού αποκαλείται αρχή της απόκλισης.

Σαν δοκιμαστική συνάρτηση για την πυκνότητα ρεύματος στον κεντρικό αγωγό έχει επιλεγεί μια συνάρτησης η οποία δίνει υψηλές τιμές στα άκρα σε σχέση με το κέντρο του εσωτερικού αγωγού.

$$\rho_{trial}(x) = 1 + K \left| \frac{2x}{w} \right|^3 \quad (7)$$

Η συνάρτηση Green στην σχέση (6) επεκτείνεται σε μια σειρά Fourier προκειμένου τελικά να μετατραπεί σε μια σειρά από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις. Αυτές λύνονται με τον γραμμικό συνδυασμό των ημιτονοειδών και των υπερβολικών ημιτονοειδών συναρτήσεων.

Αυτή η διαδικασία οδηγεί τελικά στην προσέγγιση της χωρητικότητας της γραμμής μεταφοράς ανά μονάδα μήκους με τον παρακάτω τύπο:

$$C = \frac{2\varepsilon_0 \left(1 + \frac{1}{K}\right)^2}{\frac{a^2}{w^2} \sum_{n=1}^{\infty} (V_{1n} - KV_{2n})^2 g_n} \quad (8)$$

όπου K, V_{1n}, V_{2n} και g_n υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$K = - \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (4V_{2n} - V_{1n})V_{1n}g_n}{\sum_{n=1}^{\infty} (4V_{2n} - V_{1n})V_{2n}g_n} \quad (9)$$

$$V_{1n} = \frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi w}{2a}\right) \quad (10)$$

$$V_{2n} = \frac{2w}{a} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \left(\frac{\sin\left(\frac{n\pi w}{2a}\right)}{\left(\frac{n\pi w}{2a}\right)} + \frac{3}{\left(\frac{n\pi w}{2a}\right)^2} \left[\cos\left(\frac{n\pi w}{2a}\right) - \frac{2\sin\left(\frac{n\pi w}{2a}\right)}{\left(\frac{n\pi w}{2a}\right)} + \frac{\sin^2\left(\frac{n\pi w}{2a}\right)}{\left(\frac{n\pi w}{2a}\right)^2} \right] \right) \quad (11)$$

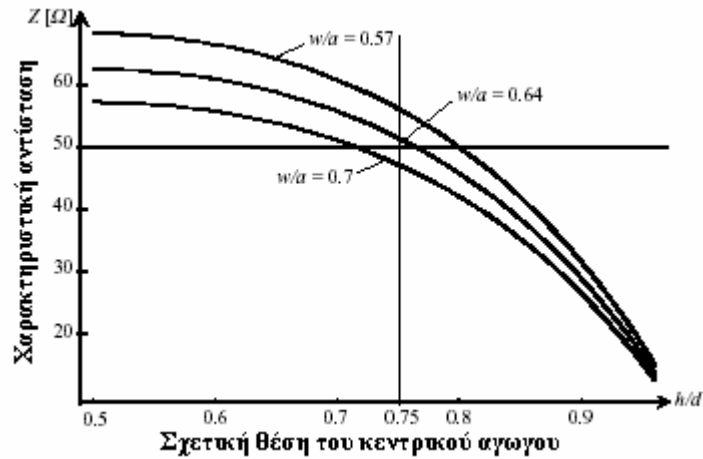
$$g_n = \frac{\sinh\left(\frac{n\pi h}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi(d-h)}{a}\right)}{n\pi \sinh\left(\frac{n\pi h}{a} + \frac{n\pi(d-h)}{a}\right)} \quad (12)$$

Η χαρακτηριστική αντίσταση είναι τότε αντιστρόφως ανάλογη με την χωρητικότητα:

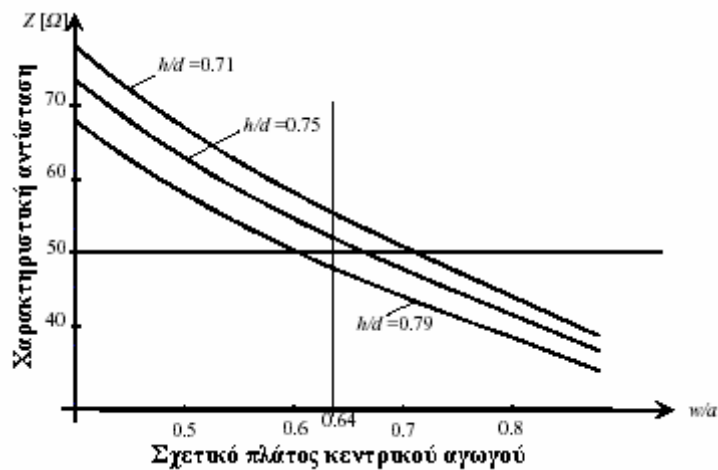
$$Z = \frac{1}{c_0 C} \quad (13)$$

όπου το c_0 είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Στην συνέχεια παρατίθενται κάποια στοιχεία από την χρησιμοποίηση του προγράμματος Mathematica προκειμένου να γίνει η εκτίμηση της χαρακτηριστικής αντίστασης σύμφωνα πάντα με τις ισότητες που δόθηκαν παραπάνω. Παρακάτω φαίνονται κάποιες γραφικές παραστάσεις (σχήματα 2.2.1.2 και 2.2.1.3) οι οποίες σκιαγραφούν την επίδραση τόσο της κατακόρυφης θέσης του κεντρικού αγωγού όσο και του πλάτους αυτού στην χαρακτηριστική αντίσταση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αθροίσματα υπολογίστηκαν μόνο μέχρι το $n=100$ κι αυτό γιατί πάνω από αυτό το όριο τα αποτελέσματα των αθροισμάτων δεν άλλαζαν σημαντικά.



Σχήμα 2.2.1.2: Η χαρακτηριστική αντίσταση σε σχέση με την κατακόρυφη θέση του κεντρικού αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές του πλάτους του



Σχήμα 2.2.1.3: Η χαρακτηριστική αντίσταση σε σχέση με το πλάτος του κεντρικού αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης θέσης του

Για αναλογία πλάτους $w/a = 0.636$ αριθμητική προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα μία αντίσταση των 52 Ω. Σε σύγκριση με την ονομαστική αντίσταση των 50 Ω έχουμε μία διαφορά της τάξης των 2Ω η οποία είναι αρκετά μικρή έτσι ώστε να μας δίνεται η δυνατότητα να θεωρήσουμε ότι η παραπάνω μαθηματική μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε μας δίνει μια ιδέα

για την συμπεριφορά της χαρακτηριστικής αντίστασης σε συνάρτησης με την γεωμετρία.

Επιπροσθέτως, αναφέρεται και η χρησιμοποίηση μίας μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζεται Quickfield και υπολογίζει ηλεκτροστατικά πεδία σε δομές δύο διαστάσεων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε ως εναλλακτική της μεθόδου απόκλισης στο [1]. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι και σε αυτήν την μέθοδο, όπως και στην προηγούμενη, θεωρείται προσεγγιστικά ότι έχουμε ηλεκτροστατικό πεδίο μέσα στο cell.

Με την χρήση της μεθόδου αυτής υπολογίστηκε μια χαρακτηριστική αντίσταση των 50Ω . Αυτό το αποτέλεσμα αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της ονομαστικής χαρακτηριστικής αντίστασης των 50Ω . Επίσης με την μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να δημιουργηθούν πολύ χρήσιμα σχήματα όπως για παράδειγμα οι καμπύλες της δύναμης της πεδίου κατά μήκος μιας επιφάνειας ή η εγκάρσια τομή ενός πεδίου κτλ. Συνεπώς είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αυτή για διάφορους υπολογισμούς κατά την διάρκεια του σχεδιασμού ενός cell.

Τέλος θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στις περιπτώσεις που πρέπει να υπολογίσουμε την χαρακτηριστική αντίσταση είναι ευκολότερο να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της απόκλισης που περιγράφηκε παραπάνω καθώς οι αλλαγές στην γεωμετρία μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν σε μεταβλητές της μεθόδου.

2.2.2 Σύστημα τερματισμού δύο ζωνών συχνοτήτων

Λόγω της διαφοράς στην κεντρική ιδέα μεταξύ του TEM cell και του GTEM cell το πίσω μέρος του κουτιού θα πρέπει να τερματιστεί με ένα διαφορετικό σύστημα τερματισμού. Όπως είδαμε παραπάνω στο TEM cell μόνο τα

ρεύματα που διανέμονται στο μήκος του κεντρικού αγωγού είναι αναγκαίο να τερματίζονται κάτι που γίνεται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό με το να συνδέσουμε ένα φορτίο 50Ω στη μια από τις δυο άκρες του. Στο GTEM από την άλλη ο τερματισμός πρέπει να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνεται ένα συμβατό φορτίο ευρείας ζώνης το οποίο να λειτουργεί για όλο το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων. Η συμβατότητα αυτή παρόλα αυτά δεν μπορεί να είναι τέλεια.

Το ζητούμενο στην περίπτωση αυτή λοιπόν είναι να πετύχουμε μια χαμηλή τιμή για τον συντελεστή ανάκλασης έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε το φαινόμενο των στάσιμων κυμάτων τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την ομοιομορφία του πεδίου μέσα στο χώρο που τοποθετούμε τη συσκευή υπό μέτρηση.

Για συχνότητες μέχρι λίγα MHz ο τερματισμός αυτός θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ικανοποιητικότερα με μια και μοναδική αντίσταση η οποία θα ένωνε τον εσωτερικό αγωγό με το πίσω κάλυμμα του GTEM. Σε μεγαλύτερες συχνότητες ωστόσο το πλάτος του αγωγού δημιουργεί ανεπιθύμητα χωρητικά και επαγωγικά φαινόμενα τα οποία προκαλούν με τη σειρά τους ανακλάσεις στη σύνδεση με το πίσω μέρος. Αυτό καταπολεμείται με τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού παράλληλων αντιστάσεων οι οποίες συνδέουν το πίσω μέρος με τον κεντρικό αγωγό.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι σε συχνότητες που το $\lambda/2$ είναι μικρότερο από τις διαστάσεις εγκάρσιας τομής του cell έχουμε διάδοση μέσα σ' αυτό των ρυθμών υψηλότερης στάθμης. Το γεγονός αυτό δημιουργεί πρόβλημα γιατί η λειτουργία σε ρυθμούς υψηλότερης τάξης δεν μπορεί να τερματιστεί από αντιστάσεις καθώς πρόκειται για λειτουργία κυματοδηγού. Για να τερματιστεί αυτή η λειτουργία χρησιμοποιούμε ένα σύνολο από κατάλληλους πυραμιδοειδείς απορροφητές ραδιοφωνικών (RF) συχνοτήτων

οι οποίοι τοποθετούνται στο πίσω μέρος του GTEM cell. Οι απορροφητές αυτοί θα πρέπει να έχουν ικανοποιητική απώλεια επιστροφής σε αρκετά χαμηλές συχνότητες της τάξης των 500 MHz ή ακόμα και 200 MHz.

Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια συγκεκριμένη συχνότητα στην οποία έχουμε ένα πέρασμα από την εγκάρσια διάδοση στη διάδοση κυματοδηγού και έτσι θα πρέπει να υπάρχει απαραίτητα και ένα πέρασμα από τον τερματισμό ρεύματος σε τερματισμό κύματος. Σε αυτό το ενδιαμέσο εύρος συχνοτήτων το καθένα από τα δυο μέρη δεν είναι τελείως αποτελεσματικό και μόνο ο συνδυασμός των δυο ειδών τερματισμού δίνει έναν αποδεκτό συντελεστή ανάκλασης. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψη κατά το σχεδιασμό του GTEM cell.

2.2.2.1 Ωμικός Τερματισμός

Στόχος του τερματισμού ρεύματος είναι η επίτευξη ενός υψηλού βαθμού απορρόφησης για συχνότητες μέχρι και τουλάχιστον τα 200MHz. Ο σχεδιασμός αυτού του ωμικού τερματισμού εξαρτάται από δύο συγκεκριμένους παράγοντες:

α) Η άνιση διανομή ρεύματος κατά μήκος του septum λαμβάνεται υπ' όψιν προσαρμόζοντας κατάλληλα τις τιμές των αντιστάσεων που συνδέονται στο τέλος του κεντρικού αγωγού. Επιπλέον, ο αριθμός αυτών των παράλληλων αντιστάσεων έχει επίδραση στην ποιότητα του τερματισμού που επιτυγχάνεται. Και εδώ, η κατανομή του ρεύματος προσεγγίζεται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων.

β) Οι απορροφητές που υλοποιούν τον τερματισμό κύματος χαρακτηρίζονται από υψηλή αγωγιμότητα. Καθώς αυξάνεται η περιοχή που καταλαμβάνουν, κατευθυνόμενοι προς το πίσω μέρος του cell, αυξάνεται η διανεμόμενη χωρητικότητα της γραμμής μετάδοσης και άρα έχουμε μείωση της

χαρακτηριστικής αντίστασης προς το πίσω τείχος του cell. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με έναν πρόσθετο σχηματισμό αντιστάσεων στο τμήμα τερματισμού που οδηγεί στη διατήρηση της Z_0 σε μια σταθερή τιμή γύρω από τα 50Ω .

Η θεωρητική αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος βασίζεται στη χρήση του 3^{ου} νόμου του Maxwell σύμφωνα με τον οποίο το φορτίο Q σε έναν όγκο V δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \int_V \epsilon_0 \epsilon_c E dV$$

Η επιτρεπτικότητα ϵ_c είναι ένας σύνθετος αριθμός και αυτό οφείλεται στο ότι οι απορροφητές αποτελούνται από ένα υλικό που προκαλεί απώλεια ενέργειας:

$$\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 \epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega}$$

Το πρόβλημα σε αυτήν τη σχέση είναι ότι είναι δύσκολος ο καθορισμός της σχετικής επιτρεπτικότητας ϵ_r και της αγωγιμότητας σ αν δεν δίνονται από τον κατασκευαστή. Επίσης, και ο προσδιορισμός της διανομής του πεδίου $E(x, y)$ είναι δύσκολος. Παρακάτω, θα δοθεί μια απλή προσέγγιση που μοντελοποιεί ικανοποιητικά την επίδραση των απορροφητών στη Z_0 .

Γενικά, υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αποτελεσματικού τερματισμού ρεύματος για συχνότητες μέχρι και τα 200MHz ή και τα 500MHz :

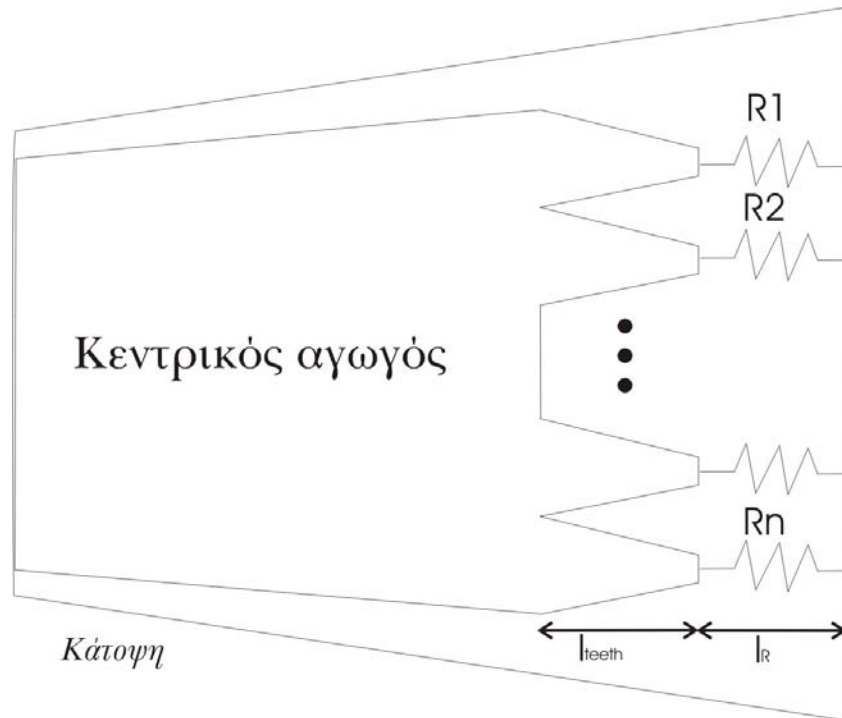
α) Το δισδιάστατο δίκτυο αντιστάσεων. Στη διαμήκη διεύθυνση ένα αυξανόμενο επίπεδο αντίστασης

αντισταθμίζει την επίσης αυξανόμενη διανεμόμενη χωρητικότητα της γραμμής ενώ, στην οριζόντια διεύθυνση η ωμική κατανομή προσαρμόζεται στη διανομή του ρεύματος στον κεντρικό αγωγό. Η συνολική αντίσταση του δικτύου είναι 50Ω . Το κόστος αυτού του δικτύου είναι σχετικά υψηλό εξαιτίας του μεγάλου αριθμού αντιστάσεων.

β) Σταδιακή μείωση του κεντρικού αγωγού κατά μήκος του πίσω τοίχου όπου και τοποθετούνται οι απορροφητές. Εδώ, η επίδραση των απορροφητών στη Z_0 αντισταθμίζεται με τη μείωση του πλάτους του κεντρικού αγωγού. Η σύνδεση του πίσω τοίχου και του septum μέσω μόνο μιας αντίστασης των 50Ω προκαλεί τα ίδια προβλήματα με αυτά που προκύπτουν από τη χρήση μονής αντίστασης λόγω γεωμετρίας. Για αυτό το λόγο, προς το τμήμα τερματισμού ο κεντρικός αγωγός χωρίζεται σε αρκετές προεξοχές που έχουν κλίση τέτοια ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ανακλάσεις που προκαλούνται από την αλλαγή της γεωμετρίας του κεντρικού αγωγού.

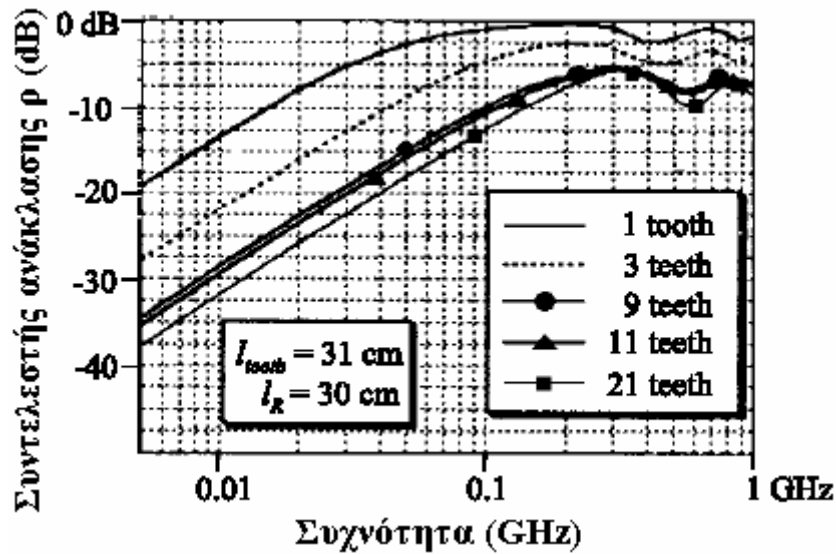
Με βάση το [12] ο τερματισμός του ρεύματος του GTEM cell αποτελείται από τρεις ίσες και παράλληλες αντιστάσεις που συνδέουν τον κεντρικό αγωγό με τον πίσω τοίχο ενώ, ο κεντρικός αγωγός εμφανίζει συγχρόνως σταδιακή μείωση του πλάτους του καθώς πλησιάζει προς την κατεύθυνση που είναι τοποθετημένοι οι RF απορροφητές. Στο «τελικό» αυτό σημείο, ο κεντρικός αγωγός χωρίζεται σε τρία δόντια-προεξοχές τα οποία μικραίνουν σταδιακά προς τον πίσω τοίχο όπου και συναντιόνται με τις αντιστάσεις. Το αρχικό πλάτος (και το μεγαλύτερο εφόσον μετά ελαττώνεται συνεχώς) των δοντιών προκύπτει από τον τρόπο με τον οποίο διανέμεται το ρεύμα στον κεντρικό αγωγό. Η μείωση του πλάτους ελαχιστοποιεί την επίδραση των RF απορροφητών στη Z_0 . Τελικά, τα δόντια συνδέονται στον πίσω τοίχο μέσω ίσων αντιστάσεων που προκαλούν μια παράλληλη αντίσταση των 50Ω .

Με βάση τα [16] και [17] μπορούμε να έχουμε τερματισμό με ένα μεγάλο αριθμό δοντιών ίδιου πλάτους που συνδέονται στον πίσω τοίχο μέσω ξεχωριστών αντιστάσεων όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.2.1.1 .



Σχήμα 2.2.2.1.1: Ο τερματισμός ρεύματος στον πίσω τοίχο του cell

Η απόδοση αυτής της προσέγγισης μπορεί να γίνει αντιληπτή παρατηρώντας το διάγραμμα του σχήματος 2.2.2.1.2 που προέρχεται από το [16].



Σχήμα 2.2.2.1.2: Ο συντελεστής ανάκλασης ως συνάρτηση της συχνότητας για διαφορετικούς αριθμούς δοντιών και αντιστάσεων, απουσία RF απορροφητών

Βλέπουμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των δοντιών-προεξοχών έχουμε και βελτίωση του τερματισμού ρεύματος που επιτυγχάνεται αφού προκαλείται όλο και χαμηλότερος συντελεστής ανάκλασης. Ωστόσο, από τα εννέα δόντια και μετά οι μεταβολές που συντελούνται με την αύξηση του αριθμού των δοντιών είναι αμελητέες. Καταλήγουμε δηλαδή στο ότι ένας αριθμός εννέα προεξοχών είναι αρκούντως ικανοποιητικός για την επίτευξη του ζητούμενου τερματισμού ρεύματος.

2.2.2.2 Τερματισμός πεδίου

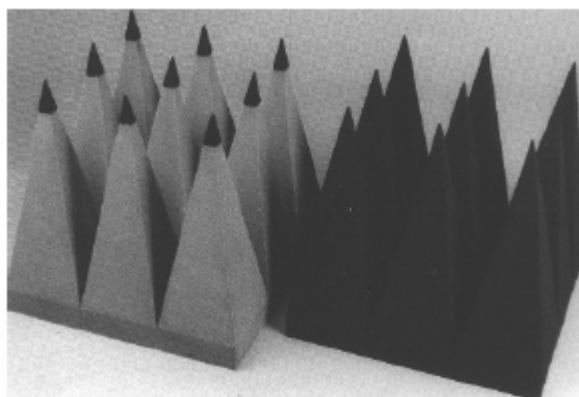
Οι RF απορροφητές που χρησιμοποιούνται για τον τερματισμό του GTEM cell αποτελούνται συνήθως από υλικό που έχει την ιδιότητα να απορροφάει την ενέργεια του κύματος με το οποίο έρχεται αντιμέτωπο. Συνήθως έχουν πυραμιδικό σχήμα και αυτό επιδιώκεται γιατί αυτή η γεωμετρία παρουσιάζει χαμηλό συντελεστή ανάκλασης.

Επιπλέον, η γεωμετρία αυτή παρουσιάζει τις εξής ιδιότητες:

-Η μυτερή τους άκρη δείχνει προς το εισερχόμενο κύμα και αυτό κάνει την αλλαγή στην εμπέδηση να είναι συνεχής και ομαλή.

-Η εμπέδηση μεγαλώνει συνεχώς καθώς το κύμα διαδίδεται μέσα στην περιοχή των απορροφητών και αυτό οφείλεται στο ότι ο όγκος του απορροφητικού υλικού αυξάνεται όσο το κύμα πλησιάζει στο πίσω τοίχωμα του GTEM cell.

-Οι κατοπτρικές ανακλάσεις από την επιφάνεια των απορροφητών κατευθύνονται περισσότερο προς το εσωτερικό της απορροφητικής δομής που αυτοί σχηματίζουν παρά πίσω προς το περιβάλλον.

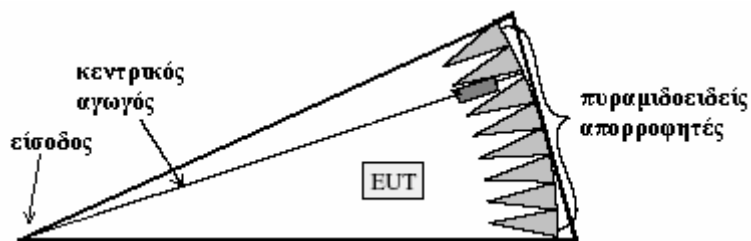


Σχήμα 2.2.2.2.1: Απορροφητές πυραμιδοειδούς σχήματος

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τη μορφή που παρουσιάζουν οι απορροφητές που περιγράφουμε. Ένα πολύ σημαντικό σημείο που πρέπει να σταθούμε είναι το ύψος των απορροφητικών πυραμίδων και αυτό γιατί το ύψος αυτό είναι που καθορίζει την χαμηλότερη συχνότητα μέχρι την οποία οι απορροφητές παρουσιάζουν ικανοποιητική επιστροφή απωλειών. Ένας γενικός κανόνας τον οποίο ακολουθούμε κατά

τη σχεδίαση είναι ότι η χαμηλότερη αυτή συχνότητα έχει διπλάσιο μήκος κύματος από το ύψος της κάθε πυραμίδας [1]. Για παράδειγμα αν το ύψος των απορροφητών είναι 60cm τότε παίρνουμε ως χαμηλότερη συχνότητα αυτή των 250MHz, όπως προκύπτει παρακάτω:

$$f = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{c}{2 * h_{RF}} = \frac{3 * 10^9 \text{ m/s}}{2 * 0,6\text{m}} = 250\text{MHz}$$



Σχήμα 2.2.2.2.2: Πλάγια όψη του GTEM cell

Στο GTEM οι απορροφητές έχουν τοποθετηθεί σε μια σφαιρική επιφάνεια στο πίσω μέρος του cell όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.2.2.2.2. Λόγω της σφαιρικής διάταξης η αντίσταση είναι ίση για το σύνολο του κυματομετώπου του σφαιρικού κύματος που προσπίπτει στους απορροφητές. Για αυτό το λόγο έχουμε ακόμα περισσότερο μειωμένες ανακλάσεις.

Κεφάλαιο 3

Κεφάλαιο 3

Βασική μελέτη – ανάλυση των γεωμετρικών διαστάσεων του GTEM cell

3.1 Προδιαγραφές

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει ως στόχο την υλοποίηση ενός GTEM cell ισάξιου αυτών που κυκλοφορούν στην αγορά. Επιδίωξη μας είναι η δυνατότητα ελέγχου των EMC (ElectroMagnetic Compatibility) ιδιοτήτων μιας ηλεκτρονικής συσκευής με μέγεθος τουλάχιστον όσο ένα κινητό τηλέφωνο και σε ένα εύρος συχνοτήτων από τα 30MHz μέχρι το λιγότερο το 1GHz, όπως επιβάλλεται από τα διεθνή στάνταρ για τις EMC μετρήσεις.

Σύμφωνα με το IEC 1000-4-3 [8] στο κάθετο επίπεδο ως προς το εισερχόμενο κύμα και ακριβώς μπροστά στην περιοχή εξέτασης θα πρέπει να επιτυγχάνεται μια σταθερότητα πεδίου της τάξης των $\pm 3dB$. Η σταθερότητα αυτή θα πρέπει βέβαια να επιτυγχάνεται και σε όλο τον όγκο της περιοχής που τοποθετείται το EUT. Επιπλέον, υπάρχει και η $1/r$ εξάρτηση της πεδιακής έντασης ως συνάρτηση της διαμήκους

απόστασης. Τέλος, ένας τρίτος κρίσιμος παράγοντας είναι ο λόγος στάσιμου κύματος. Για την επίτευξη μιας τιμής των $\pm 0,9dB=1,23$ θα πρέπει να έχουμε συντελεστή ανάκλασης καλύτερο από $\frac{1,23-1}{1,23+1}=0,1 \approx 20dB$. Το σύνολο των αποκλίσεων είναι τότε $\pm 3dB$.

Για μεταβολές της συχνότητας από τα dc μέχρι και τουλάχιστον το 1GHz δεν θα πρέπει να μεταβάλλεται η πεδιακή ένταση μέσα στην περιοχή εξέτασης περισσότερο από $\pm 3dB$.

Ο τερματισμός θα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η ισχύς στην είσοδο του cell να προκαλεί μια ονομαστική πεδιακή ένταση μέσα στην περιοχή εξέτασης ίση με 10V/m τουλάχιστον.

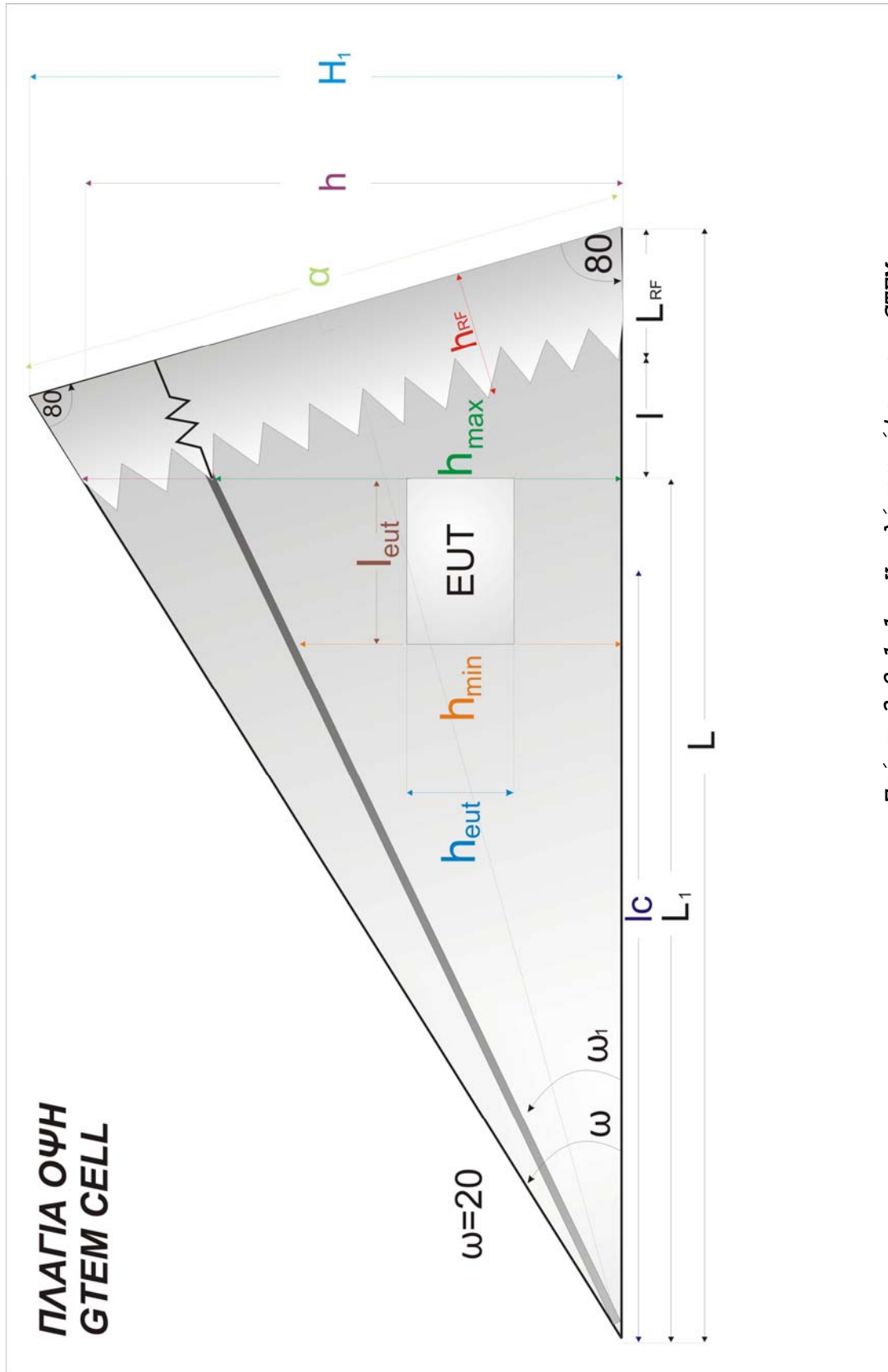
3.2 Οι Διαστάσεις του GTEM cell

Το μέγεθος των GTEM cell που χρησιμοποιούνται συνήθως για βιομηχανικούς EMC ελέγχους μπορεί να έχει μήκος που ξεπερνά τα 9m ενώ χωράει αντικείμενα με όγκο περίπου ίσο με $1m^3$.

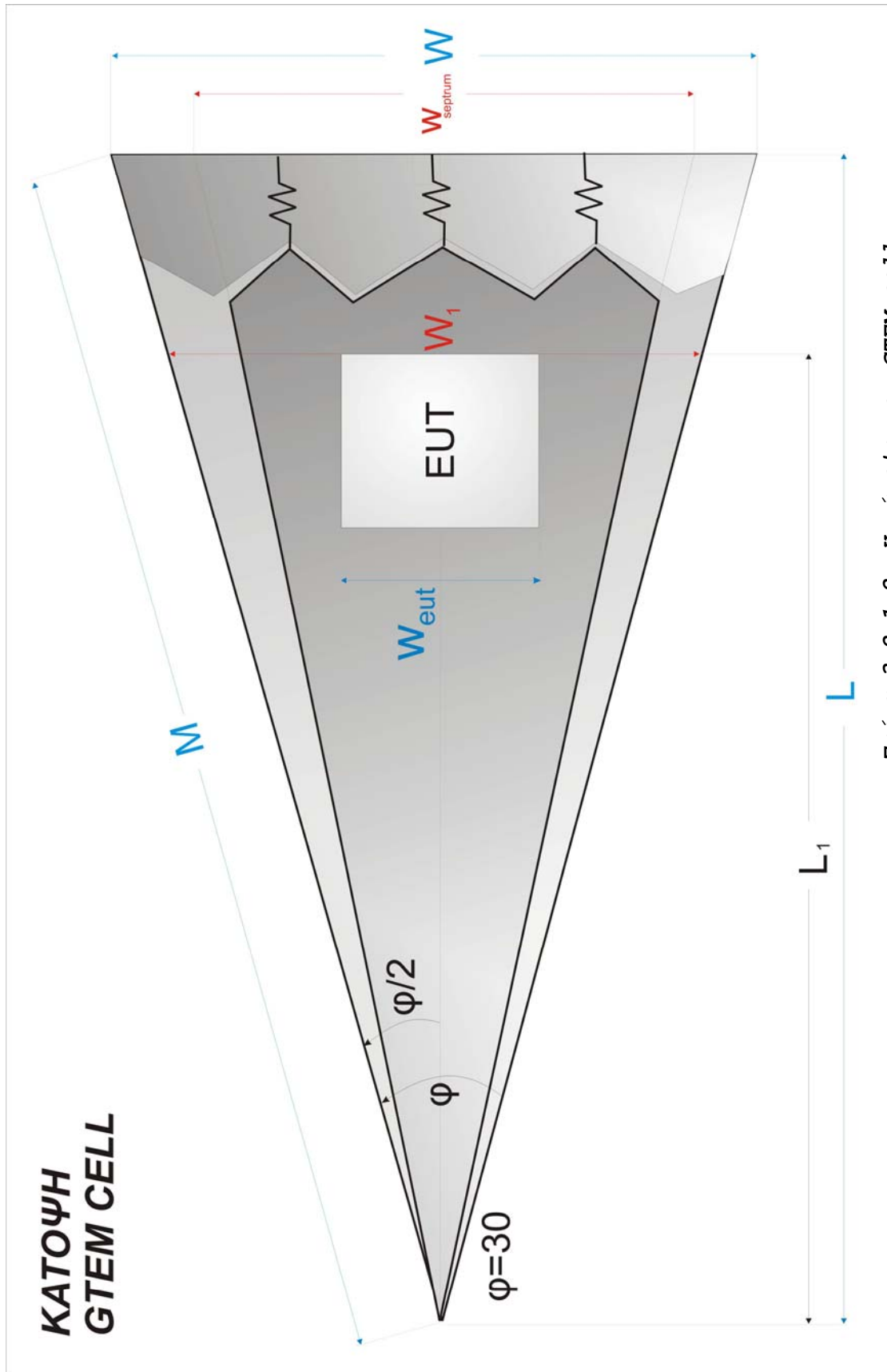
Το cell που πρόκειται να υλοποιηθεί με αυτήν την εργασία είναι δυνατόν να έχει μήκος μεταξύ 3,5 και 5m και αυτό οφείλεται τόσο σε χωρικούς όσο και σε οικονομικούς περιορισμούς. Σε κάθε περίπτωση όμως, ένα τέτοιας τάξης μήκος δίνει τη δυνατότητα εξέτασης αντικειμένων ικανοποιητικού ύψους όπως θα φανεί και στην ανάλυση που ακολουθεί. Κατά την ανάλυση αυτή θα παρουσιάζονται παράλληλα δύο πιθανά αριθμητικά μοντέλα για την κατασκευή του GTEM cell τόσο για να αιτιολογηθεί πιο εύκολα η τελική μας επιλογή όσο και για να έχουμε μια πιο σφαιρική και ρεαλιστική εικόνα των αρχών που διέπουν το cell.

3.2.1 Οι Εξωτερικές Διαστάσεις

Τα σχήματα 3.2.1.1 και 3.2.1.2 που ακολουθούν παρουσιάζουν την πλάγια όψη καθώς και την κάτοψη του GTEM cell αντιστοίχως, μαζί με όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά μεγέθη που πρόκειται να αναφερθούν κατά την παρουσίαση της ανάλυσης για την εύρεση των εξωτερικών διαστάσεων.



Σχήμα 3.2.1.1.1: Η πλάγια όψη του GTEM cell



Σχήμα 3.2.1.1.2: Η κάτοψη του GTEM cell

Εξετάζουμε τις περιπτώσεις όπου επιδιώκουμε ύψος του υπό εξέταση αντικειμένου να είναι ίσο με:

0,22m , 0,25m και 0,30m

3.2.1.1 $h_{eut} = 0,22m$

Θα πρέπει $h_{min}=3*h_{eut}=0,66m$. Για να επιτύχουμε στο σημείο όπου βρίσκεται το h_{min} πεδίο έντασης των 10V/m θα πρέπει να έχουμε ισχύ στην είσοδο που δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{V^2}{Z_o} = \frac{(E * h_{min})^2}{Z_o} = \frac{(10 * h_{min})^2}{50} \quad \text{και αντικαθιστώντας το } h_{min}$$

έχουμε ότι $P=0,871W$. Το τέλος της περιοχής εξέτασης κατά μήκος του cell τοποθετείται σε εκείνο το σημείο όπου η ένταση του πεδίου έχει ελαττωθεί το πολύ κατά 3dB δηλαδή κατά 1,995V/m. Η ένταση του πεδίου στο σημείο αυτό θα πρέπει να είναι τουλάχιστον $10-1,995=8,005V/m$ και κάνοντας χρήση πάλι της παραπάνω σχέσης υπολογίζεται το h_{max} :

$$h_{max} = \frac{\sqrt{Z_o * P}}{E} = \frac{\sqrt{50 * P}}{8,005} \quad \text{και για την υπολογισμένη τιμή του } P$$

έχουμε ότι $h_{max}=0,825m$.

Υπάρχουν οι παρακάτω αρχές (από το [1]) που είναι γνωστό ότι διέπουν την κατασκευαστική θεωρία του GTEM cell:

1. $\varphi=30^\circ$
2. $\omega=20^\circ$
3. $h_{septum} = \frac{3}{4} h_{cell}$

Από την πλάγια όψη του GTEM (σχήμα 3.2.1.1) :

1. $h = \frac{4}{3} h_{max}$

$$2. \tan \omega = \frac{h}{L_1} \rightarrow L_1 = \frac{h}{\tan 20^\circ} \rightarrow L_1 = 2,75 * h \rightarrow L_1 = 3,02m$$

$$3. \sin 80^\circ = \frac{h_{RF}}{L_{RF}} \rightarrow L_{RF} = \frac{h_{RF}}{\sin 80^\circ} \rightarrow L_{RF} = 1,015 * h_{RF}$$

Επιλέγοντας ένα ύψος απορροφητών $h_{RF} = 0,61m$ έχουμε $L_{RF} = 0,619m$

$$4. \tan 80^\circ = \frac{h_{max}}{l} \rightarrow l = \frac{h_{max}}{\tan 80^\circ} \rightarrow l = 0,176 * h_{max} \rightarrow l = 0,145m$$

5. Το συνολικό L δίνεται από τη σχέση:

$$L = L_1 + L_{RF} + l \quad \text{και είναι} \quad \mathbf{L = 3,785m}$$

$$6. \cos 80^\circ = \frac{a/2}{L} \rightarrow a = 0,347 * L$$

$$\text{Όμως,} \quad \sin 80^\circ = \frac{H_1}{a} \rightarrow H_1 = a * \sin 80^\circ \rightarrow$$

$$\text{άρα} \quad H_1 = 0,342 * L \rightarrow \mathbf{H_1 = 1,295m}$$

Από την κάτοψη (σχήμα2) :

$$7. \tan \frac{\varphi}{2} = \frac{W/2}{L} \rightarrow W = 2 * L * \tan 15^\circ \rightarrow$$

$$W = 0,536 * L \rightarrow \mathbf{W = 2,029m}$$

$$8. \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{L}{M} \rightarrow M = L * \cos 15^\circ \rightarrow$$

$$W = 1,035 * L \rightarrow \mathbf{M = 3,919m}$$

9. Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι για να επιτύχουμε χαρακτηριστική αντίσταση όσο το δυνατό πιο κοντινή στα 50Ω θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

$w_{septrum} = 0,636 * W$ και άρα στο τέλος του cell το πλάτος του septrum θα είναι:

$w_{\text{septrum}} = 1,29\text{m}$ ενώ το συνολικό του μήκος θα είναι το ίδιο φυσικά με αυτό του cell δηλαδή:

$$l_{\text{septrum}} = 3,785\text{m}$$

3.2.1.2 $h_{\text{eut}} = 0,25\text{m}$

Θα πρέπει $h_{\text{min}} = 3 * h_{\text{eut}} = 0,75\text{m}$. Για να επιτύχουμε στο σημείο όπου βρίσκεται το h_{min} πεδίο έντασης των 10V/m θα πρέπει να έχουμε ισχύ στην είσοδο που δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{V^2}{Z_o} = \frac{(E * h_{\text{min}})^2}{Z_o} = \frac{(10 * h_{\text{min}})^2}{50} \quad \text{και αντικαθιστώντας το } h_{\text{min}}$$

έχουμε ότι $P = 1,125\text{W}$. Το τέλος της περιοχής εξέτασης κατά μήκος του cell τοποθετείται σε εκείνο το σημείο όπου η ένταση του πεδίου έχει ελαττωθεί το πολύ κατά 3dB δηλαδή κατά $1,995\text{V/m}$. Η ένταση του πεδίου στο σημείο αυτό θα πρέπει να είναι τουλάχιστον $10 - 1,995 = 8,005\text{V/m}$ και κάνοντας χρήση πάλι της παραπάνω σχέσης υπολογίζεται το h_{max} :

$$h_{\text{max}} = \frac{\sqrt{Z_o * P}}{E} = \frac{\sqrt{50 * P}}{8,005} \quad \text{και για την υπολογισμένη τιμή του } P$$

έχουμε ότι $h_{\text{max}} = 0,937\text{m}$.

Υπάρχουν οι παρακάτω αρχές (από το [1]) που είναι γνωστό ότι διέπουν την κατασκευαστική θεωρία του GTEM cell:

1. $\varphi = 30^\circ$
2. $\omega = 20^\circ$
3. $h_{\text{septrum}} = \frac{3}{4} h_{\text{cell}}$

Από την πλάγια όψη του GTEM (σχήμα 3.2.1.1) :

$$4. \quad h = \frac{4}{3} h_{\text{max}}$$

$$\tan \omega = \frac{h}{L_1} \rightarrow L_1 = \frac{h}{\tan 20^\circ} \rightarrow L_1 = 2,75 * h \rightarrow L_1 = 3,432\text{m}$$

$$\sin 80^\circ = \frac{h_{RF}}{L_{RF}} \rightarrow L_{RF} = \frac{h_{RF}}{\sin 80^\circ} \rightarrow L_{RF} = 1,015 * h_{RF}$$

Επιλέγοντας ένα ύψος απορροφητών $h_{RF} = 0,61\text{m}$ έχουμε
 $L_{RF} = 0,619\text{m}$

$$\tan 80^\circ = \frac{h_{\max}}{l} \rightarrow l = \frac{h_{\max}}{\tan 80^\circ} \rightarrow l = 0,176 * h_{\max} \rightarrow l = 0,165\text{m}$$

5. Το συνολικό L δίνεται από τη σχέση:

$$L = L_1 + L_{RF} + l \quad \text{και είναι} \quad \mathbf{L=4,217\text{m}}$$

$$6. \quad \cos 80^\circ = \frac{a/2}{L} \rightarrow a = 0,347 * L$$

$$\text{Όμως,} \quad \sin 80^\circ = \frac{H_1}{a} \rightarrow H_1 = a * \sin 80^\circ \rightarrow$$

$$\text{άρα} \quad H_1 = 0,342 * L \rightarrow \mathbf{H_1=1,442\text{m}}$$

Από την κάτοψη (σχήμα2) :

$$7. \quad \tan \frac{\varphi}{2} = \frac{W/2}{L} \rightarrow W = 2 * L * \tan 15^\circ \rightarrow$$

$$W = 0,536 * L \rightarrow \mathbf{W=2,26\text{m}}$$

$$8. \quad \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{L}{M} \rightarrow M = L * \cos 15^\circ \rightarrow$$

$$W = 1,035 * L \rightarrow \mathbf{M=4,366\text{m}}$$

9. Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι για να επιτύχουμε χαρακτηριστική αντίσταση όσο το δυνατό πιο κοντινή στα 50Ω θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

$w_{\text{septrum}} = 0,636 * W$ και άρα στο τέλος του cell το πλάτος του septrum θα είναι:

$\mathbf{w_{septrum} = 1,437\text{m}}$ ενώ το συνολικό του μήκος θα

είναι το ίδιο φυσικά με αυτό του cell δηλαδή:

$$l_{\text{septum}} = 4,217\text{m}$$

3.2.1.3 $h_{\text{eut}} = 0,30\text{m}$

Θα πρέπει $h_{\text{min}} = 3 * h_{\text{eut}} = 0,90\text{m}$. Για να επιτύχουμε στο σημείο όπου βρίσκεται το h_{min} πεδίο έντασης των 10V/m θα πρέπει να έχουμε ισχύ στην είσοδο που δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{V^2}{Z_o} = \frac{(E * h_{\text{min}})^2}{Z_o} = \frac{(10 * h_{\text{min}})^2}{50} \quad \text{και αντικαθιστώντας το } h_{\text{min}}$$

έχουμε ότι $P = 1,62\text{W}$. Το τέλος της περιοχής εξέτασης κατά μήκος του cell τοποθετείται σε εκείνο το σημείο όπου η ένταση του πεδίου έχει ελαττωθεί το πολύ κατά 3dB δηλαδή κατά $1,995\text{V/m}$. Η ένταση του πεδίου στο σημείο αυτό θα πρέπει να είναι τουλάχιστον $10 - 1,995 = 8,005\text{V/m}$ και κάνοντας χρήση πάλι της παραπάνω σχέσης υπολογίζεται το h_{max} :

$$h_{\text{max}} = \frac{\sqrt{Z_o * P}}{E} = \frac{\sqrt{50 * P}}{8,005} \quad \text{και για την υπολογισμένη τιμή του } P$$

έχουμε ότι $h_{\text{max}} = 1,124\text{m}$.

Υπάρχουν οι παρακάτω αρχές (από το [1]) που είναι γνωστό ότι διέπουν την κατασκευαστική θεωρία του GTEM cell:

1. $\varphi = 30^\circ$
2. $\omega = 20^\circ$
3. $h_{\text{septum}} = \frac{3}{4} h_{\text{cell}}$

Από την πλάγια όψη του GTEM (σχήμα 3.2.1.1) :

$$4. h = \frac{4}{3} h_{\text{max}}$$

$$\tan \omega = \frac{h}{L_1} \rightarrow L_1 = \frac{h}{\tan 20^\circ} \rightarrow L_1 = 2,75 * h \rightarrow L_1 = 4,119\text{m}$$

$$\sin 80^\circ = \frac{h_{RF}}{L_{RF}} \rightarrow L_{RF} = \frac{h_{RF}}{\sin 80^\circ} \rightarrow L_{RF} = 1,015 * h_{RF}$$

Επιλέγοντας ένα ύψος απορροφητών $h_{RF} = 0,61\text{m}$ έχουμε
 $L_{RF} = 0,619\text{m}$

$$\tan 80^\circ = \frac{h_{\max}}{l} \rightarrow l = \frac{h_{\max}}{\tan 80^\circ} \rightarrow l = 0,176 * h_{\max} \rightarrow l = 0,198\text{m}$$

5. Το συνολικό L δίνεται από τη σχέση:

$$L = L_1 + L_{RF} + l \quad \text{και είναι } \mathbf{L=4,936\text{m}}$$

$$6. \cos 80^\circ = \frac{a/2}{L} \rightarrow a = 0,347 * L$$

$$\text{Όμως, } \sin 80^\circ = \frac{H_1}{a} \rightarrow H_1 = a * \sin 80^\circ \rightarrow$$

$$\text{άρα } H_1 = 0,342 * L \rightarrow \mathbf{H_1=1,688\text{m}}$$

Από την κάτοψη (σχήμα2) :

$$7. \tan \frac{\varphi}{2} = \frac{W/2}{L} \rightarrow W = 2 * L * \tan 15^\circ \rightarrow$$

$$W = 0,536 * L \rightarrow \mathbf{W=2,646\text{m}}$$

$$8. \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{L}{M} \rightarrow M = L * \cos 15^\circ \rightarrow$$

$$W = 1,035 * L \rightarrow \mathbf{M=5,111\text{m}}$$

9. Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι για να επιτύχουμε χαρακτηριστική αντίσταση όσο το δυνατό πιο κοντινή στα 50Ω θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

$w_{\text{septrum}} = 0,636 * W$ και άρα στο τέλος του cell το πλάτος του septrum θα είναι:

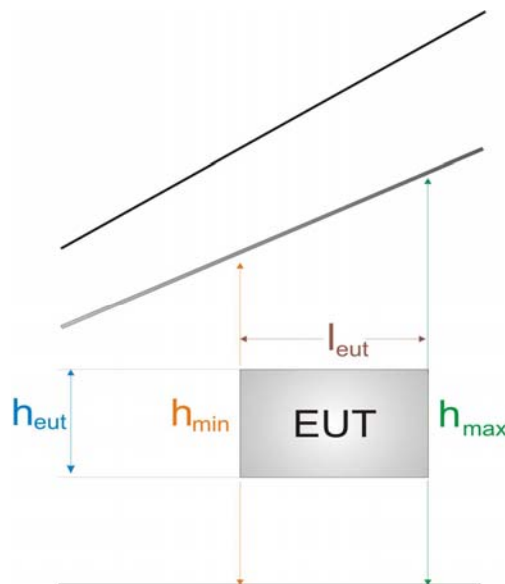
$\mathbf{w_{septrum} = 1,683\text{m}}$ ενώ το συνολικό του μήκος θα

είναι το ίδιο φυσικά με αυτό του cell δηλαδή:

$$l_{\text{septum}} = 4,936m$$

3.2.2 Η Περιοχή Εξέτασης

Η περιοχή εξέτασης τοποθετείται κάτω από τον κεντρικό αγωγό και ακριβώς μπροστά στις κορυφές-άκρες των RF απορροφητών. Στο σχήμα 3.2.2.1 παρουσιάζονται όλα τα χρήσιμα γεωμετρικά μεγέθη για τον καθορισμό της περιοχής εξέτασης.



Σχήμα 3.2.2.1: Η πλάγια όψη της περιοχής εξέτασης του GTEM cell

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κατακόρυφη διάσταση του cell περιορίζεται μόλις στο 1/3 της απόστασης h μεταξύ κάτω εξωτερικού και εσωτερικού αγωγού. Αυτό συμβαίνει για τους δύο παρακάτω λόγους:

α) Μόνο σε αυτήν την περιοχή μπορεί να επιτευχθεί η προαναφερθείσα απαιτούμενη σταθερότητα της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

β) Ένα υπό εξέταση αντικείμενο μεγαλύτερων διαστάσεων θα μετέβαλε την ένταση του πεδίου κάτι που θα εμπόδιζε την πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων.

3.2.2.1 $h_{eut} = 0,22m$

Από το σχήμα 3.2.1.1 προκύπτει ότι: $l_{eut} = \frac{h_{max} - h_{min}}{\tan \omega_1}$ όπου

$\omega_1 = \tan^{-1} \frac{h_{max}}{L_1}$ οπότε αντικαθιστώντας τις τιμές που έχουν υπολογιστεί για τα h_{max}, h_{min} και L_1 προκύπτει ότι **$l_{eut} = 0,603m$** .

Η τρίτη διάσταση της περιοχής εξέτασης (ορατή στο σχήμα 3.2.1.2), το πλάτος w_{eut} , περιορίζεται και αυτή στο 1/3 του συνολικού πλάτους w_1 του cell στο σημείο αυτό, σύμφωνα με το [1]. Ισχύει όμως ότι $\frac{L_1}{W_1} = \frac{L}{W} \rightarrow W_1 = W * \frac{L_1}{L}$ και με $w_{eut} = \frac{1}{3} * W_1$ έχουμε ότι **$w_{eut} = 0,54m$** .

3.2.2.2 $h_{eut} = 0,25m$

Από το σχήμα 3.2.1.1 προκύπτει ότι: $l_{eut} = \frac{h_{max} - h_{min}}{\tan \omega_1}$ όπου

$\omega_1 = \tan^{-1} \frac{h_{max}}{L_1}$ οπότε αντικαθιστώντας τις τιμές που έχουν υπολογιστεί για τα h_{max}, h_{min} και L_1 προκύπτει ότι **$l_{eut} = 0,685m$** .

Η τρίτη διάσταση της περιοχής εξέτασης (ορατή στο σχήμα 3.2.1.2), το πλάτος w_{eut} , περιορίζεται και αυτή στο 1/3 του συνολικού πλάτους w_1 του cell στο σημείο αυτό,

σύμφωνα με το [1]. Ισχύει όμως ότι $\frac{L_1}{W_1} = \frac{L}{W} \rightarrow W_1 = W * \frac{L_1}{L}$ και

με $w_{eut} = \frac{1}{3} * W_1$ έχουμε ότι **$w_{eut} = 0,613m$** .

3.2.2.3 $h_{eut} = 0,30m$

Από το σχήμα 3.2.1.1 προκύπτει ότι: $l_{eut} = \frac{h_{max} - h_{min}}{\tan \omega_1}$ όπου

$\omega_1 = \tan^{-1} \frac{h_{max}}{L_1}$ οπότε αντικαθιστώντας τις τιμές που έχουν υπολογιστεί για τα h_{max}, h_{min} και L_1 προκύπτει ότι **$l_{eut} = 0,822m$** .

Η τρίτη διάσταση της περιοχής εξέτασης (ορατή στο σχήμα 3.2.1.2), το πλάτος w_{eut} , περιορίζεται και αυτή στο 1/3 του συνολικού πλάτους w_1 του cell στο σημείο αυτό,

σύμφωνα με το [1]. Ισχύει όμως ότι $\frac{L_1}{W_1} = \frac{L}{W} \rightarrow W_1 = W * \frac{L_1}{L}$ και

με $w_{eut} = \frac{1}{3} * W_1$ έχουμε ότι **$w_{eut} = 0,736m$** .

Συνεπώς, οι μέγιστες συνολικές διαστάσεις της ηλεκτρικής συσκευής που μπορεί να εξεταστεί με τη χρήση του GTEM cell θα είναι:

EUT_{max}: 52cm x 60cm x 22cm ($h_{eut} = 0,22m$)

EUT_{max}: 61cm x 68cm x 25cm ($h_{eut} = 0,25m$)

EUT_{max}: 74cm x 82cm x 30cm ($h_{eut} = 0,30m$)

3.2.3 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων και σύγκριση

Για να έχουμε μια ακόμα πιο σφαιρική εικόνα ως προς το πώς διαμορφώνονται οι διαστάσεις του cell ανάλογα με το επιθυμητό h_{eut} παραθέτουμε τον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα αποτελεσμάτων 3.2.3.1.

Παρουσιάζεται στη συνέχεια ένας πίνακας αποτελεσμάτων (Πίνακας 3.2.3.2) όπου συγκρίνονται οι διαστάσεις του cell που υπολογίζονται με χρήση της μεθοδολογίας που αναφέρθηκε παραπάνω και οι διαστάσεις που έχουν τα μοντέλα GTEM cell της εταιρείας Schaffner. Ο αριθμός του κάθε μοντέλου αναφέρεται στο h_{max} που το χαρακτηρίζει. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο GTEM1000 έχει $h_{max}=1000\text{mm}$. Επίσης, το ύψος των απορροφητών επιλέχτηκε ίσο με 0,8m για όλους τους υπολογισμούς εκτός από το μοντέλο GTEM250 όπου χρησιμοποιήθηκε $h_{RF}=0,2\text{m}$.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 3.2.3.2 βλέπουμε ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προσεγγίζει ιδιαίτερα ικανοποιητικά τις αναλογίες των διαστάσεων των GTEM του εμπορίου.

h_{eut} (m)	h_{min} (m)	P (W)	h_{max} (m)	L_1 (m)	L_{cell} (m)	H_{cell} (m)	W_{cell} (m)	H_{eut} (m)	W_{eut} (m)	M (m)
0,1	0,3	0,18	0,374766	1,372881	2,058371	0,704004	1,103287	0,075059	0,245288	2,131039
0,08	0,24	0,1152	0,299813	1,098305	1,770578	0,605573	0,94903	0,060047	0,19623	1,833087
0,15	0,45	0,405	0,562149	2,059321	2,777852	0,950081	1,488929	0,112589	0,367932	2,875921
0,2	0,6	0,72	0,749532	2,745761	3,497333	1,196158	1,87457	0,150119	0,490576	3,620802
0,22	0,66	0,8712	0,824485	3,020337	3,785125	1,294589	2,028827	0,165131	0,539634	3,918755
0,25	0,75	1,125	0,936914	3,432202	4,216814	1,442235	2,260212	0,187648	0,61322	4,365684
0,3	0,9	1,62	1,124297	4,118642	4,936295	1,688312	2,645854	0,225178	0,735864	5,110565
0,35	1,05	2,205	1,31168	4,805082	5,655776	1,934388	3,031496	0,262708	0,858508	5,855447
0,4	1,2	2,88	1,499063	5,491523	6,375257	2,180465	3,417138	0,300237	0,981152	6,600328
0,45	1,35	3,645	1,686446	6,177963	7,094738	2,426542	3,802779	0,337767	1,103796	7,345209
0,5	1,5	4,5	1,873829	6,864403	7,814219	2,672619	4,188421	0,375297	1,22644	8,090091
0,55	1,65	5,445	2,061212	7,550844	8,5337	2,918696	4,574063	0,412826	1,349084	8,834972
0,6	1,8	6,48	2,248595	8,237284	9,253181	3,164773	4,959705	0,450356	1,471728	9,579854
0,65	1,95	7,605	2,435978	8,923724	9,972662	3,41085	5,345347	0,487886	1,594372	10,32474
0,7	2,1	8,82	2,62336	9,610165	10,69214	3,656927	5,730989	0,525415	1,717016	11,06962

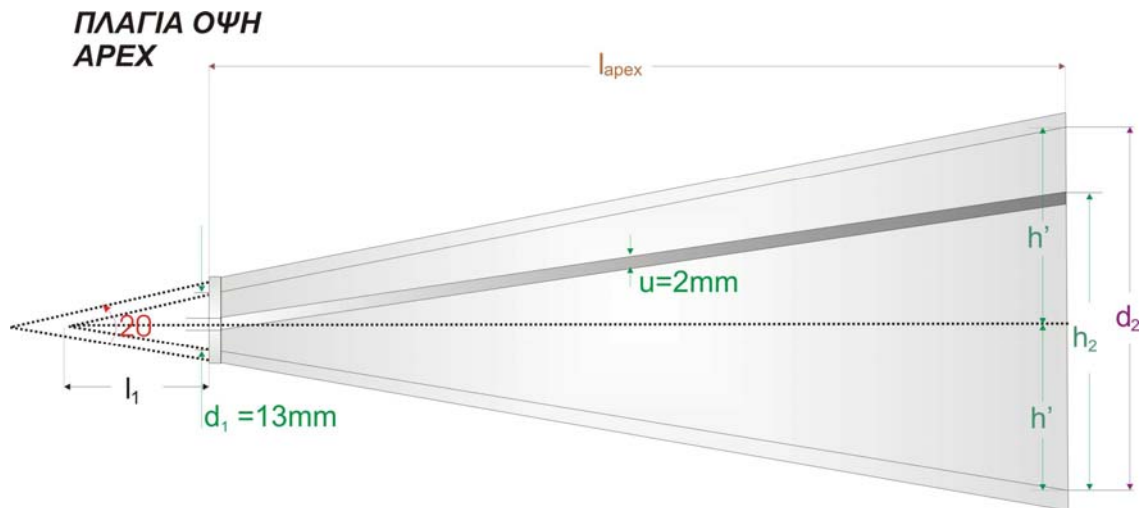
Πίνακας 3.2.3.1: Αναλυτική παρουσίαση των τιμών που προκύπτουν για όλα τα γεωμετρικά μεγέθη του cell για τις διαφορετικές απαιτούμενες τιμές h_{eut}

Μοντέλο	Διαστάσεις Εμπορίου				Υπολογισμένες Διαστάσεις		
	h_{eut} (m)	L_{cell} ' (m)	H_{cell} ' (m)	W_{cell} ' (m)	L_{cell} (m)	H_{cell} (m)	W_{cell} (m)
GTEM250	0,08	1,25	0,345	0,65	1,35425	0,4632	0,725745
GTEM500	0,15	2,95	1,04	1,48	2,97078	1,0161	1,592042
GTEM750	0,22	3,95	1,38	2,02	3,97806	1,3606	2,13184
GTEM1000	0,3	4,95	1,73	2,54	5,12923	1,7543	2,748752
GTEM1500	0,45	6,95	2,55	3,58	7,28767	2,4925	3,905462
GTEM1750	0,5	7,95	2,9	4,1	8,00715	2,7386	4,291031
GTEM2000	0,6	8,95	3,24	4,62	9,44611	3,2308	5,062171

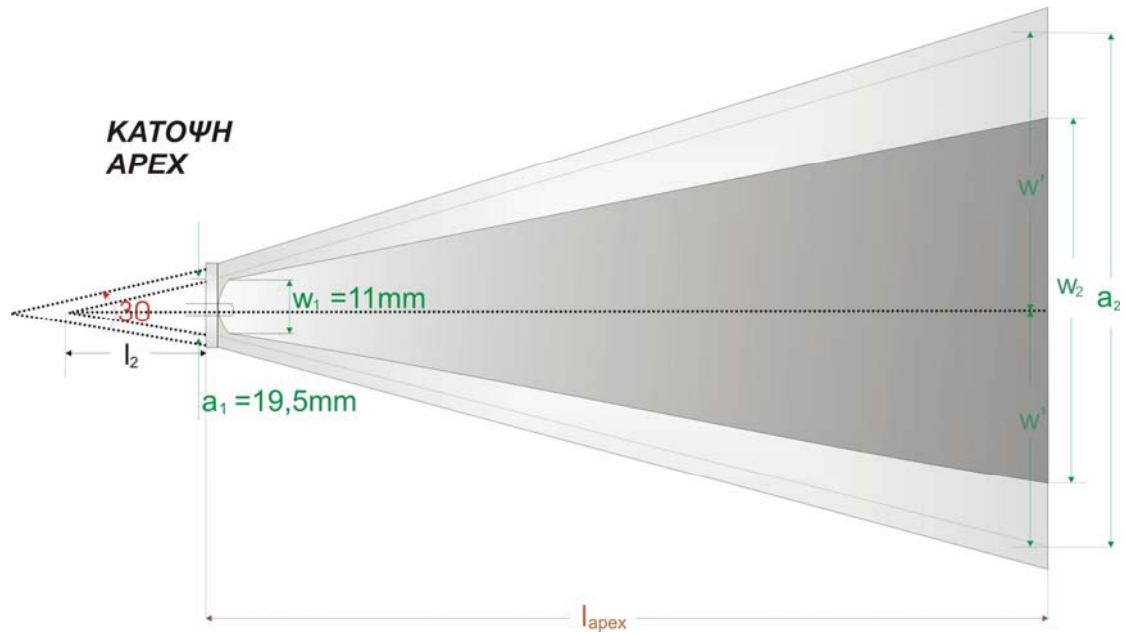
Πίνακας 3.2.3.2: Σύγκριση των αναλογιών του cell που υπολογίζονται με αυτές που θα συναντήσει κάποιος σήμερα αν αναζητήσει ένα GTEM cell στο εμπόριο

3.2.4 Το apex

Το apex αναφέρεται στο τμήμα αυτό του cell όπου πραγματοποιείται το πέρασμα από τον κεντρικό ορθογώνιο αγωγό στην υποδοχή όπου θα συνδέεται το ομοαξονικό καλώδιο μέσω του οποίου είτε θα τροφοδοτείται το cell είτε θα συνδέεται ένας αναλυτής φάσματος. Στα σχήματα 3.2.4.1 και 3.2.4.2 φαίνονται όλα τα μεγέθη που είναι απαραίτητα για να προσδιοριστεί πλήρως η γεωμετρία του apex.



Σχήμα 3.2.4.1: Η πλάγια όψη του apex, στην αρχή του GTEM cell



Σχήμα 3.2.4.2: Η κάτοψη του apex

Υπάρχουν οι παρακάτω αρχές (από το [1]) που είναι γνωστό ότι διέπουν το apex:

1. $\varphi=30^\circ$
2. $\omega=20^\circ$
3. $d_1=13\text{mm}$
4. $a_1=19,5\text{mm}$
5. $u=0,18*d_1$ άρα $u=2,3\text{mm}$
6. $w_1=0,56*a_1$
7. $w_2=0,64*a_2$
8. $l_{\text{apex}}=10\%*L$
9. Η σχετική θέση-ύψος του κεντρικού αγωγού μετακινούμενοι από την αρχή προς το τέλος του apex βασίζεται στη μεταβολή του λόγου $h:d$ από 1:2 σε 3:4 αντιστοίχως. (φαίνεται και στην πλάγια όψη του apex)

3.2.4.1 $h_{eut} = 0,22m$

Από την πλάγια όψη του GTEM (σχήμα 3.2.4.1) :

$$\tan 80^\circ = \frac{l_1}{h_1} \Rightarrow l_1 = 36,8633mm$$

$$\frac{h'}{h_1} = \frac{l_{apex} + l_1}{l_1} \Rightarrow h' = 6,5 \frac{378,5 + 36,8633}{36,8633} = 73,2398mm$$

$$d_2 = 2h' \Rightarrow d_2 = 146,4796mm$$

$$h_2 = \frac{3}{4}d_2 \Rightarrow h_2 = 109,8597mm$$

Από την κάτοψη του GTEM (σχήμα 3.4.2.2) :

$$w_1 = 0,56 \times a_1 \Rightarrow w_1 = 11mm$$

$$\tan 75^\circ = \frac{l_2}{a_1/2} \Rightarrow l_2 = 36,3875mm$$

$$\frac{w'}{a_1/2} = \frac{l_{apex} + l_2}{l_2} \Rightarrow w' = 9,75 \frac{378,5 + 36,3875}{36,3875} \Rightarrow w' = 111,1688mm$$

$$a_2 = 2w' \Rightarrow a_2 = 222,3375mm$$

$$w_2 = 0,64 \times a_2 \Rightarrow w_2 = 142,2960mm$$

Επίσης, το συνολικό μήκος του apex θα είναι
 $l_{apex} = 378,5mm$

3.2.4.2 $h_{eut} = 0,25m$

Από την πλάγια όψη του GTEM (σχήμα 3.2.4.1) :

$$\tan 80^\circ = \frac{l_1}{h_1} \Rightarrow l_1 = 36,8633mm$$

$$\frac{h'}{h_1} = \frac{l_{apex} + l_1}{l_1} \Rightarrow h' = 6,5 \frac{421,7 + 36,8633}{36,8633} = 80,857mm$$

$$d_2 = 2h' \Rightarrow d_2 = 161,714mm$$

$$h_2 = \frac{3}{4}d_2 \Rightarrow h_2 = 121,286mm$$

Από την κάτοψη του GTEM (σχήμα 3.2.4.2) :

$$w_1 = 0,56 \times a_1 \Rightarrow w_1 = 11mm$$

$$\tan 75^\circ = \frac{l_2}{a_1/2} \Rightarrow l_2 = 36,3875mm$$

$$\frac{w'}{a_1/2} = \frac{l_{apex} + l_2}{l_2} \Rightarrow w' = 9,75 \frac{421,7 + 36,3875}{36,3875} \Rightarrow w' = 122,744mm$$

$$a_2 = 2w' \Rightarrow a_2 = 245,488mm$$

$$w_2 = 0,64 \times a_2 \Rightarrow w_2 = 157,113mm$$

Επίσης, το συνολικό μήκος του apex θα είναι $l_{apex} = 421,7mm$

3.2.4.3 $h_{eut} = 0,30m$

Από την πλάγια όψη του GTEM (σχήμα 3.2.4.1) :

$$\tan 80^\circ = \frac{l_1}{h_1} \Rightarrow l_1 = 36,8633mm$$

$$\frac{h'}{h_1} = \frac{l_{apex} + l_1}{l_1} \Rightarrow h' = 6,5 \frac{493,6 + 36,8633}{36,8633} = 93,535mm$$

$$d_2 = 2h' \Rightarrow d_2 = 187,07mm$$

$$h_2 = \frac{3}{4}d_2 \Rightarrow h_2 = 140,303mm$$

Από την κάτοψη του GTEM (σχήμα 3.2.4.2) :

$$w_1 = 0,56 \times a_1 \Rightarrow w_1 = 11mm$$

$$\tan 75^\circ = \frac{l_2}{a_1/2} \Rightarrow l_2 = 36,3875mm$$

$$\frac{w'}{a_1/2} = \frac{l_{apex} + l_2}{l_2} \Rightarrow w' = 9,75 \frac{493,6 + 36,3875}{36,3875} \Rightarrow w' = 142,01mm$$

$$a_2 = 2w' \Rightarrow a_2 = 284,019mm$$

$$w_2 = 0,64 \times a_2 \Rightarrow w_2 = 181,772mm$$

Επίσης, το συνολικό μήκος του apex θα είναι

$$l_{apex} = 493,6mm$$

3.2.5 Συνολικές διαστάσεις

-Για $h_{\text{eut}}=0,22\text{m}$

Εξωτερικές διαστάσεις :

$$L= 3,785\text{m}$$

$$H1= 1,295\text{m}$$

$$W= 2,029\text{m}$$

Septum :

$$w_{\text{septum}} =1,29\text{m}$$

$$l_{\text{septum}}=3,785\text{m}$$

Apex:

$$l_{\text{apex}} = 378,5\text{mm}$$

$$d_2 = 146,4796\text{mm}$$

$$h_2 = 109,8597\text{mm}$$

$$a_2 = 222,3375\text{mm}$$

$$w_2 = 142,2960\text{mm}$$

-Για $h_{\text{eut}}=0,25\text{m}$

Εξωτερικές διαστάσεις:

$$L= 4,217\text{m}$$

$$H1= 1,442\text{m}$$

$$W= 2,26\text{m}$$

Septum :

$$w_{\text{septum}} =1,437\text{m}$$

$$l_{\text{septum}}=4,217\text{m}$$

Apex:

$$l_{\text{apex}} = 421,7\text{mm}$$

$$d_2 = 161,7143\text{mm}$$

$$h_2 = 121,2857\text{mm}$$

$$a_2 = 245,4883mm$$

$$w_2 = 157,1125mm$$

-Για $h_{eut}=0,30m$

Εξωτερικές διαστάσεις:

$$L = 4,936m$$

$$H1 = 1,688m$$

$$W = 2,646m$$

Septum :

$$w_{septum} = 1,683m$$

$$l_{septum} = 4,936m$$

Apex:

$$l_{apex} = 493,6mm$$

$$d_2 = 187,07mm$$

$$h_2 = 140,303mm$$

$$a_2 = 284,019mm$$

$$w_2 = 181,772mm$$

Κεφάλαιο 4

Κεφάλαιο 4

Επιμέρους τμήματα του GTEM cell

4.1 Τμήμα Ωμικού Φορτίου

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφηκαν δύο μέθοδοι για τον ωμικό τερματισμό, οι οποίες οδηγούν σε χαμηλό συντελεστή ανάκλασης σε συχνότητες μέχρι και τα 200MHz.

Στο συγκεκριμένο cell το οποίο θα κατασκευάσουμε επιλέγεται η προσέγγιση με την χρησιμοποίηση δοντιών που λεπταίνουν στο τελείωμα του κεντρικού αγωγού. Η μέθοδος αυτή προτιμάται λόγω της εύκολης κατανόησης της σε αντιδιαστολή με την πολύπλοκη μέθοδο του δικτύου αντιστάσεων. Σύμφωνα με την ευρεσιτεχνία του GTEM cell [12], όπως ήδη έχουμε αναφέρει στο πρώτο κεφάλαιο, ο αριθμός των δοντιών άρα και των ίσων, παράλληλων αντιστάσεων που συνδέουν τον κεντρικό αγωγό με τον πίσω τοίχο είναι τρία.

Προκειμένου να σχεδιαστεί η περιοχή τερματισμού πρέπει να είναι γνωστή η πυκνότητα φορτίου που κατανέμεται κατακόρυφα στον κεντρικό αγωγό έτσι ώστε να προσαρμοσθεί το πλάτος του κάθε δοντιού στην κατανομή ρεύματος του

κεντρικού αγωγού. Με τον τρόπο αυτό μέσα από κάθε δόντι, το οποίο τερματίζεται σε μια αντίσταση 150Ω , ρέει το ίδιο ρεύμα. Προκειμένου να βρεθεί η κατανομή του ρεύματος στον κεντρικό αγωγό εξετάζεται η κατανομή του πεδίου στην επιφάνεια του με την βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένου στοιχείου μέσω του προγράμματος Quickfield το οποίο έχουμε ήδη αναφέρει στο κεφάλαιο 1. Έχοντας βρει την κατανομή του πεδίου είναι δυνατόν απευθείας να εξαχθεί αποτέλεσμα για την κατανομή του φορτίου στη επιφάνεια του κεντρικού αγωγού, η οποία είναι ανάλογη της κατανομής ρεύματος στον κεντρικό αγωγό.

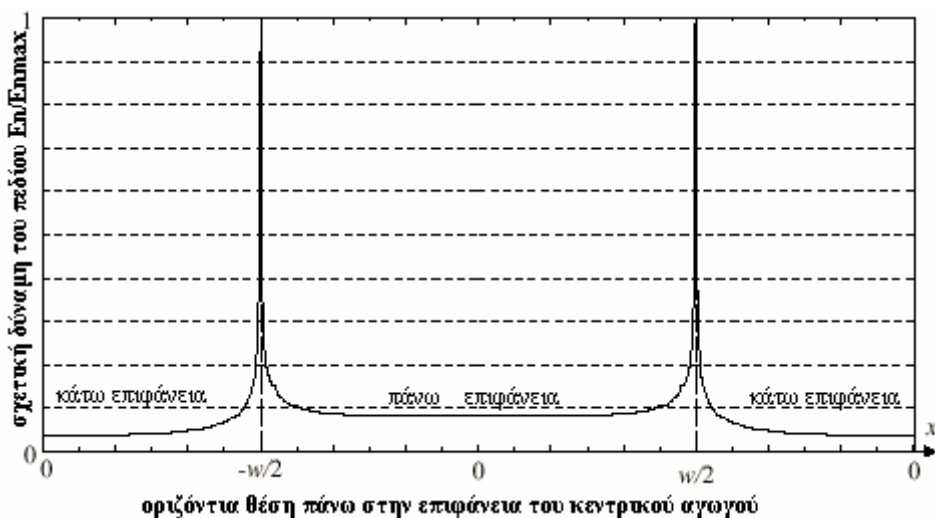
Τα αποτελέσματα που φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις 4.1.1 και 4.1.2 έχουν εξαχθεί από το πρόγραμμα Quickfield.[1] Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι η τάση στον κεντρικό αγωγό είναι 1V και η απόσταση ανάμεσα στον κεντρικό αγωγό και στον κάτω εξωτερικό αγωγό είναι $h=1m$. Αυτό οδηγεί σε ονομαστική δύναμη ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή εξέτασης $E_{nom}=1V/m$. Αυτή η τιμή αναφέρεται προσεγγιστικά στο κέντρο του όγκου του cell κάτω από τον κεντρικό αγωγό. Η συγκεκριμένη τιμή χρησιμοποιείται σαν τιμή αναφοράς ως προς τις τιμές που υπολογίζονται από το Quickfield.

Η μέγιστη τιμή της δύναμης του πεδίου βρίσκεται στα άκρα του κεντρικού αγωγού όπως φαίνεται άλλωστε και από τα σχήμα 4.1.1. Παρόλα αυτά η απόλυτη τιμή της δύναμης του πεδίου στα άκρα μπορεί να εξαχθεί από προσεγγίσεις μόνο πρόχειρα κι αυτό γιατί η αριθμητική προσέγγιση δεν είναι αρκετά ακριβής ούτε για τον υπολογισμό της απότομης κλίσης της δύναμης του πεδίου στα άκρα του κεντρικού αγωγού ούτε και για τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής των κορυφών.

Στο σχήμα 4.1.2 φαίνονται οι απόλυτες τιμές της δύναμης του πεδίου στην περιοχή γύρω από το κέντρο του εσωτερικού αγωγού. Η σχετική δύναμη του πεδίου στο κέντρο

της άνω επιφάνειας του εσωτερικού αγωγού είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την τιμή αναφοράς στο κέντρο της περιοχής κάτω από τον κεντρικό αγωγό, καθώς η απόσταση του κεντρικού από τον πάνω εξωτερικό αγωγό είναι το 1/3 της απόστασης h του ίδιου από τον κάτω εξωτερικό αγωγό. [1] Η σχετική δύναμη του πεδίου στο κέντρο της κάτω επιφάνειας του εσωτερικού αγωγού είναι περίπου 1.3 φορές μεγαλύτερη από την τιμή αναφοράς. [1]

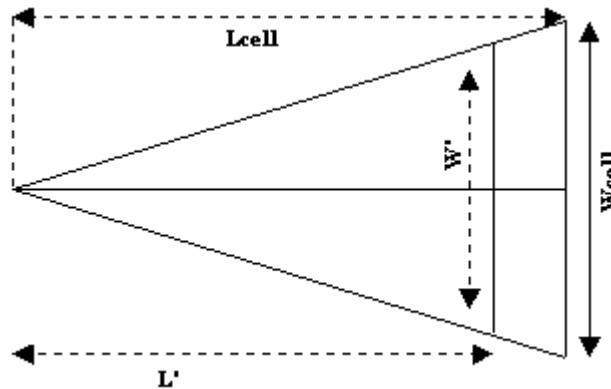
Με την βοήθεια του προγράμματος Quickfiel [1], ορίζονται τρία μέρη του κεντρικού αγωγού τα οποία μεταφέρουν ίσο φορτίο. Στην συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια να οριστεί το αρχικό πλάτος των τριών δοντιών ανάλογα με το ρεύμα που φτάνει σε αυτά. Το κεντρικό δόντι είναι πλατύτερο από τα δύο πλευρικά καθώς η πυκνότητα φορτίου είναι μεγαλύτερη στο κέντρο απ'ότι στα άκρα του αγωγού. Ο λόγος του πλάτους του κεντρικού δοντιού προς αυτό των πλευρικών μπορεί να οριστεί ως εξής: Προκειμένου να πετύχουμε ίσο φορτίο (και επομένως ίσο ρεύμα) σε κάθε δόντι ο λόγος ανάμεσα στο πλάτος του μεσαίου δοντιού προς αυτό των πλευρικών πρέπει να είναι 1,65.



Σχήμα 4.1.1: Η δύναμη του πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του εσωτερικού αγωγού σχετίζεται με την μέγιστη δύναμη πεδίου στα άκρα του αγωγού. Ο άξονας x τυλίγεται γύρω από τα άκρα του αγωγού, επομένως το 0 στα αριστερά δηλώνει την ίδια θέση (το κέντρο της κάτω επιφάνειας) με το 0 στα δεξιά. Ενώ το 0 στο

κέντρο δηλώνει το κέντρο της πάνω επιφάνειας του κεντρικού αγωγού.

Προκειμένου να βρούμε το πλάτος του κεντρικού αγωγού κοντά στις άκρες των απορροφητών ,οι οποίοι απέχουν 61cm από τον πίσω τοίχο, ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία :



Σχήμα 4.1.2: Κάτοψη του GTEM cell

Παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για τα τρία ύψη. Ο συμβολισμός που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτός που φαίνεται παρακάτω:

$$h_{eut}=0,22m \quad (h_{eut}=0,25m \ / \ h_{eut}=0,30m)$$

$$\text{Οπότε, } L_{cell}=3,785m \quad (L_{cell}=4,217m \ / \ L_{cell}=4,936m) \quad \text{όμως}$$

$$L' = L_{cell} - 0,61 = 3,175m \quad (3,607m \ / \ 4,326m)$$

και από τους τύπους που έχουμε αναφέρει ήδη στην προηγούμενη παράγραφο ισχύει:

$$W' = 0,536 * L' \Rightarrow$$

$$W' = 170cm \quad (193cm \ / \ 232cm)$$

Από τα στοιχεία που έχουμε ήδη αναφέρει εξάγονται δύο σχέσεις:

$$2W_{\text{πλευρ.}} + W_{\text{κεντρ.}} = 170\text{cm} \quad (193\text{cm} / 232\text{cm})$$

$$W_{\text{κεντρ.}} / W_{\text{πλευρ.}} = 1,65$$

Από τις δύο αυτές σχέσεις έχουμε:

$$W_{\text{πλευρ.}} = 46,58\text{cm} \quad (52,88\text{cm} / 63,56\text{cm})$$

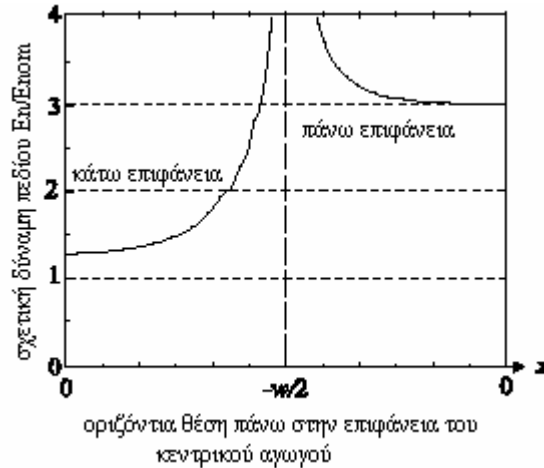
$$W_{\text{κεντρ.}} = 76,85\text{cm} \quad (87,25\text{cm} / 104,88\text{cm})$$

Όπως έχουμε ήδη δείξει η επίδραση των RF απορροφητών στην χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής είναι δυνατόν να οριστεί ακριβώς. Σε αυτήν την εργασία επιλέγεται μια προσέγγιση η οποία δεν υποδεικνύει την επίδραση των απορροφητών καθώς η σύνθετη αγωγιμότητα δεν είναι γνωστή για όλες τις συχνότητες.

Προκειμένου να οριστεί το σχήμα των δοντιών, ένα από αυτά καθορίζεται και στην συνέχεια διαιρείται σε τρία δόντια υπολογίζοντας τον λόγο πλάτους που έχουμε ήδη αναφέρει δηλαδή το 1.65. Μία μεταβλητή είναι το τελικό πλάτος των δοντιών προς την κατεύθυνση του πίσω τοίχου όπου οι απορροφητές συμπληρώνουν την εγκάρσια τομή ολοκληρωτικά. Εάν είναι γνωστή η επιτρεπτότητα του υλικού τότε και το τελικό πλάτος μπορεί να οριστεί. Παρόλα αυτά, η σωστή τιμή ίσως εξαρτάται από την συχνότητα και μπορεί επομένως να εκτιμηθεί για μια μικρή απόκλιση της συχνότητας, για παράδειγμα 0-300MHz.

Κατά την διάρκεια του σχεδιασμού των δοντιών η επιτρεπτότητα του απορροφητικού υλικού, η οποία δίνεται για δύο συχνότητες στο κεφάλαιο των απορροφητών παρακάτω, ήταν ακόμα άγνωστη. Έτσι το πλάτος στο τέλος του κεντρικού δοντιού και των πλευρικών δοντιών επιλέγεται στα 2,5mm και 1.5mm αντίστοιχα [1]. Αυτές οι τιμές

οδηγούν σε χαρακτηριστική αντίσταση 330Ω κοντά στον πίσω τοίχο όταν δεν υπάρχουν καθόλου απορροφητές στο cell.



Σχήμα 4.1.3: Η δύναμη πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του κεντρικού αγωγού. Σχετίζεται με την δύναμη του πεδίου στο κέντρο του χώρου κάτω από τον κεντρικό αγωγό.

Αφού έχουμε ορίσει το αρχικό και το τελικό πλάτος των δοντιών, είναι απαραίτητη μία προσέγγιση που θα αλλάζει την χαρακτηριστική αντίσταση του cell στην περιοχή του πίσω τοίχου. Η μέθοδος της κωνικής μετάβασης για τις γραμμές μετάδοσης εφαρμόζεται σε αυτό το πρόβλημα.

Από το [16] παίρνουμε μία μέθοδο για εκθετική ελάττωση της μετάβασης. Αυτό σημαίνει ότι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής αλλάζει εκθετικά σε διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με τον τύπο:

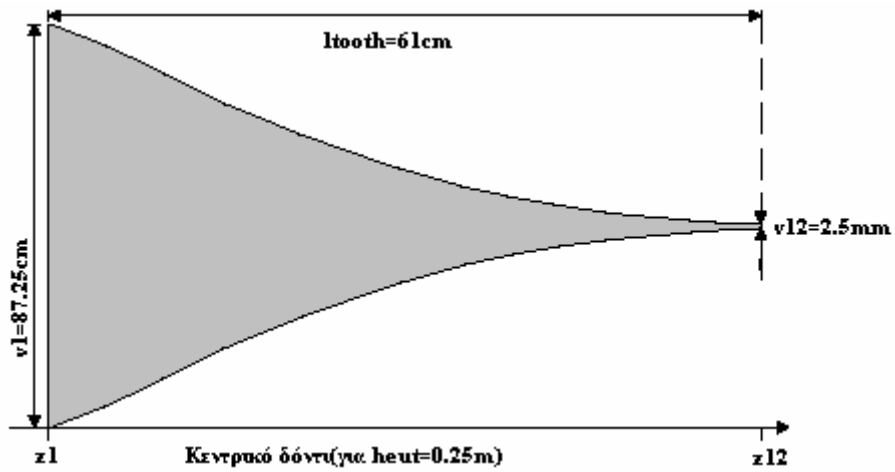
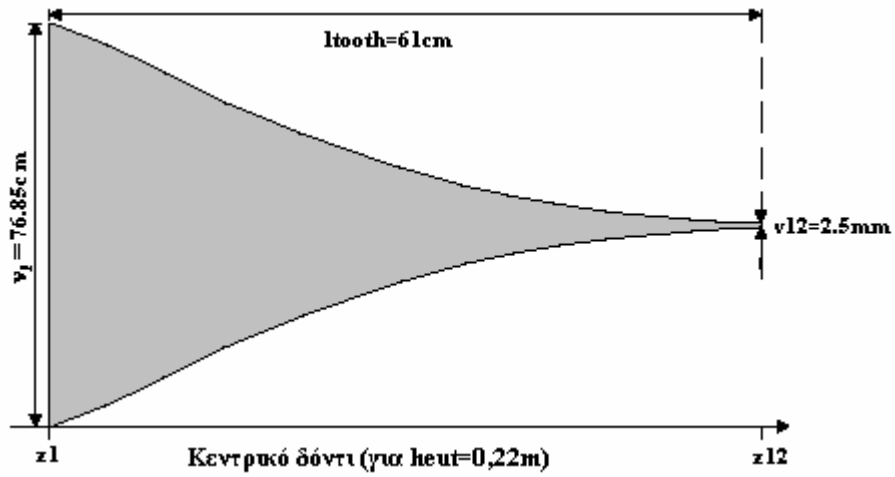
$$Z = e^{(z/l) \ln Z_L} \quad (1)$$

όπου το l δηλώνει το μήκος της μετάβασης και το Z_L την τελική χαρακτηριστική αντίσταση η οποία είναι στην περίπτωση αυτή $Z_L = 330\Omega$. Το z δηλώνει την διαμήκη θέση.

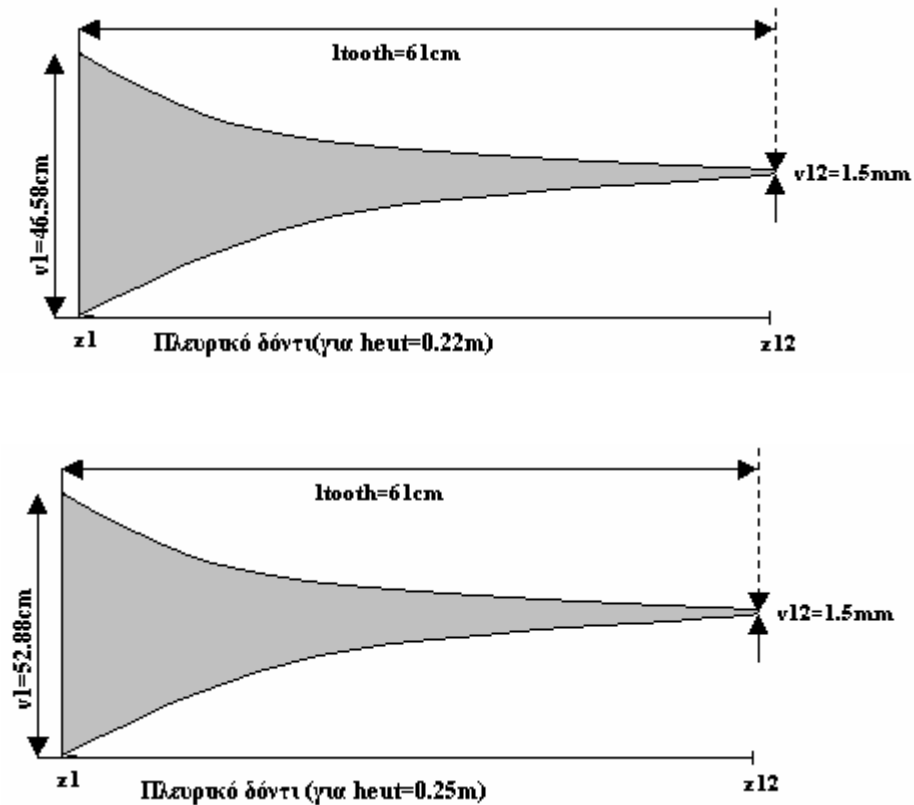
Για να οριστεί το σχήμα των δοντιών είναι χρήσιμη μία απευθείας μέθοδος, αφού δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη εξίσωση η οποία να συσχετίζει το πλάτος του κεντρικού αγωγού με την αντίσταση της γραμμής μετάδοσης. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν $i=12$ τιμές για το πλάτος του ενός κωνικού δοντιού ξεκινώντας από την τιμή $w=170\text{cm} / 193\text{cm}$ (δηλαδή οι υπολογισμοί θα γίνουν για $h_{\text{cut}}=0,22\text{m}$ και $h_{\text{cut}}=0,25\text{m}$ αντίστοιχα) στην θέση κοντά στις άκρες των απορροφητών και στην συνέχεια μειώνεται συνεχώς μέχρι την τελική τιμή του $w_{12}=0,55\text{cm}$ ($w_{12}=1,5+1,5+2,5=5,5\text{mm}$) στον πίσω τοίχο του cell. Έτσι οι αντιστάσεις Z_i που αντιστοιχούν σε κάθε πλάτος w_i υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Mathematica [1] και την αριθμητική μέθοδο που ήδη έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 2. Στην συνέχεια λύνουμε την σχέση (1) ως προς z προκειμένου να οριστεί η διαμήκη θέση που σχετίζεται με το πλάτος w_i .

$$z_i = l_{\text{tooth}} * (\ln Z_i / \ln Z_L) \quad (2)$$

Οι τιμές του πλάτους πρέπει να προσαρμόζονται στην αυξανόμενη κατά την εγκάρσια τομή περιοχή της γραμμής μετάδοσης. Το πλάτος σαν συνάρτηση του z βρίσκεται από την γραμμική διαταξινόμηση ανάμεσα στις 12 θέσεις z_i . Στην συνέχεια το πλάτος των τριών δοντιών ορίζεται από την αναλογία πλάτους του 1.65, που έχουμε ήδη αναφέρει. Δηλαδή σε κάθε σημείο το πλάτος του κεντρικού δοντιού δίνεται από τον τύπο $v_i = w_i * (1,65/3,65)$ ενώ το πλάτος καθενός από τα πλευρικά δόντια δίνεται από τον τύπο $v_i = w_i * (1/3,65)$. Παρακάτω φαίνονται τα σχήματα του κεντρικού δοντιού για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4.1.4: Το σχήμα του κεντρικού δοντιού προκειμένου ο ωμικός τερματισμός να ανταποκρίνεται στην εκθετική ελάττωση από τα 50 στα 330Ω



Σχήμα 4.1.5: Πλευρικά δόντια και στις δύο περιπτώσεις

Επιπροσθέτως οι απαραίτητες τρεις αντιστάσεις των 150Ω μπορούν εύκολα να συγκολληθούν σε μία πλακέτα στο τέλος των δοντιών. Οι πλακέτες τοποθετούνται στον πίσω τοίχο του cell. Προκειμένου να πετύχουμε ακριβές φορτίο 150Ω για κάθε δόντι χρησιμοποιούμε τρεις παράλληλες αντιστάσεις επίστρωσης άνθρακα με τιμές 392Ω , 464Ω και 511Ω . Κάθε μία από τις αντιστάσεις έχει ονομαστική μέγιστη ισχύ κατανάλωσης 400mW οπότε η συνολική μέγιστη ισχύ κατανάλωσης είναι περίπου $P_{\max}=3\text{W}$. Σύμφωνα με το [1] με μια ισχύ εισόδου γύρω στα 3W στις μετρήσεις ευαισθησίας μπορεί να δημιουργηθεί πεδίο στην περιοχή εξέτασης με ονομαστική δύναμη $E_{\max}=33\text{V/m}$. Η τιμή αυτή είναι επαρκής για την χρήση του συγκεκριμένου cell.

Η συναρμολόγηση του τερματισμού γίνεται στον πίσω τοίχο με τρόπο τέτοιο που είναι δυνατόν να απομακρυνθεί και αντικατασταθεί από άλλη κατασκευή, εφόσον αυτό είναι

απαραίτητα προκειμένου να βελτιωθούν οι δυνατότητες του cell.

4.2 RF απορροφητές

Οι απορροφητές RF τερματίζουν τα κύματα σε ένα εύρος ζώνης το οποίο έχει ως κάτω άκρο μία συχνότητα η οποία εξαρτάται κυρίως από το μήκος της πυραμίδας. Για αυτή τη συχνότητα παίρνουμε ως γενικό κανόνα για να την υπολογίσουμε ότι το ύψος των απορροφητικών πυραμίδων πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μισό του μήκος κύματος της. Όπως αναφέραμε και παραπάνω για ύψος πυραμίδων 60 cm έχουμε ότι το μήκος κύματος της συχνότητας αυτής είναι, κατά προσέγγιση, 250MHz.

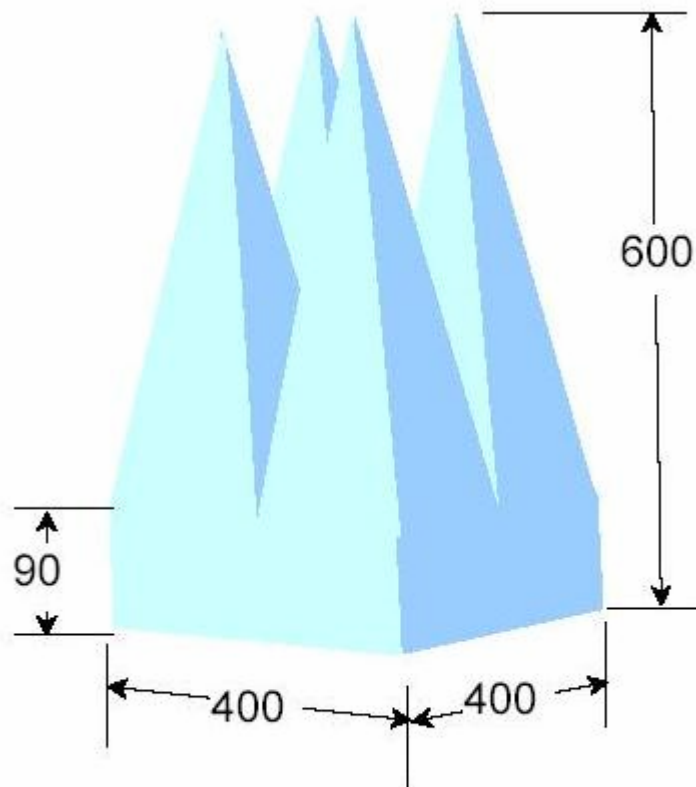
Οι απορροφητές τοποθετούνται στο πίσω τοίχωμα του GTEM cell σε μία σφαιρική επιφάνεια έτσι ώστε το εισερχόμενο κύμα να επηρεάζεται όσο πιο ομοιόμορφα γίνεται. Επίσης θα πρέπει να αφήσουμε ένα κενό 2 με 3cm για να τοποθετηθούν οι αντιστάσεις του τερματισμού ρεύματος καθώς οι απορροφητές έχουν μεγαλύτερη επιρροή στη χαρακτηριστική αντίσταση όσο πιο κοντά βρίσκονται στον κεντρικό αγωγό.

Έχοντας κρίνει ότι τα 250MHz είναι το κατάλληλο κάτω άκρο για το εύρος ζώνης του τερματισμού με απορροφητές RF αναζητήσαμε στο διαδίκτυο εταιρίες που κατασκευάζουν πυραμιδοειδείς απορροφητές με ύψος 60cm ή 24inc (Πολλοί κατασκευαστές δίνουν το ύψος σε ίντσες. Οι 24 ίντσες ισούνται με 61 εκατοστά το οποίο είναι μια προσέγγιση που δεν διαφοροποιεί σχεδόν καθόλου το αποτέλεσμα που θέλουμε να πάρουμε). Παρακάτω παραθέτουμε κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στα data sheets.

Η εταιρία RFI κατασκευάζει το μοντέλο EBB-600 το οποίο διατίθεται σε κομμάτια των τεσσάρων πυραμίδων. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 4.2.1 το συνολικό ύψος του απορροφητή είναι 60cm με 51cm να είναι οι πυραμίδες και 9cm να είναι η βάση που τις στηρίζει. Η βάση της κάθε πυραμίδας είναι 20*20cm και έτσι έχουμε ότι το κάθε κομμάτι έχει βάση 40*40cm. Η εταιρία επίσης μας πληροφορεί ότι το προϊόν της έχει δοκιμαστεί και μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες μέχρι και 90°C ενώ η ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που μπορεί να δεχτεί είναι 750W/m². Στον παρακάτω πίνακα 4.2.1 φαίνεται η μέγιστη απορρόφηση για διάφορες συχνότητες όπως μας δίνονται στα data sheets:

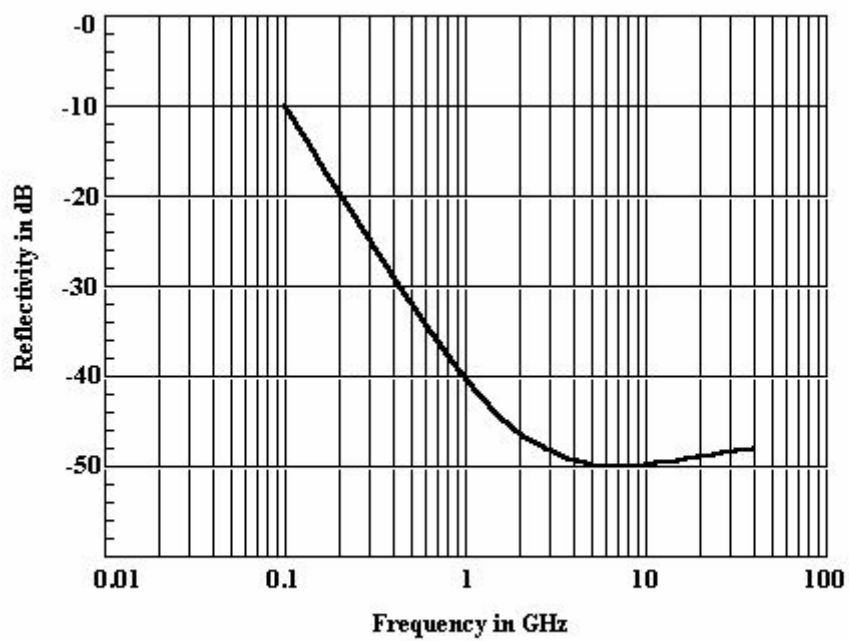
Πίνακας 4.2.1: Απορρόφηση του EBB-600

Συχνότητα (GHz)	Μέγιστη απορρόφηση (dB)
0,1	10
0,25	25
0,5	30
1	40
3	50
6	50
10	50
18	50
40	45



Σχήμα 4.2.1: Το EBB-600

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το γράφημα της απορρόφησης του EBB-600 σε σχέση με τη συχνότητα.



Σχήμα 4.2.2: Γράφημα της απορρόφησης του EBB-600

Το αντίστοιχο μοντέλο της εταιρίας Cuming Microwave είναι το C-RAM SFC 24. Το προϊόν αυτό διατίθεται πάλι σε κομμάτια αυτή τη φορά όμως των 9 πυραμίδων ανά κομμάτι. Το C-RAM SFC 24 διαφέρει και στο ύψος καθώς κατασκευάζεται σε ίντσες και έτσι το συνολικό του ύψος είναι 61cm. Αυτή τη φορά η κατασκευάστρια εταιρία μας πληροφορεί και για το βάρος του κάθε κομματιού το οποίο είναι σε αυτή την περίπτωση 7,7Kg. Τέλος, η ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που μπορεί να δεχτεί είναι 2kW/m^2 . Ο αντίστοιχος πίνακας για τη μέγιστη απορρόφηση σε διάφορες συχνότητες φαίνεται παρακάτω:

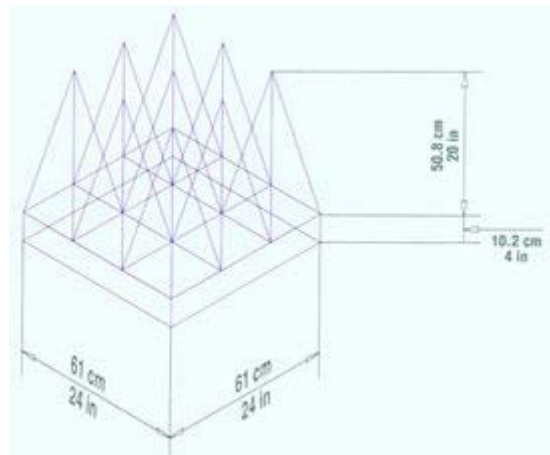
Πίνακας 4.2.2: Απορρόφηση του SFC 24

Συχνότητα (GHz)	Μέγιστη απορρόφηση (dB)
0,3	30
0,5	35
1	40
3	45
6	50
10	50
18	50
36	50
50	45

Να σημειώσουμε ότι η εταιρία αναφέρει ότι οι δυο τελευταίες μετρήσεις (36 και 50GHz) δεν ελέγχονται σε κάθε κομμάτι και είναι περισσότερο ενδεικτικές.

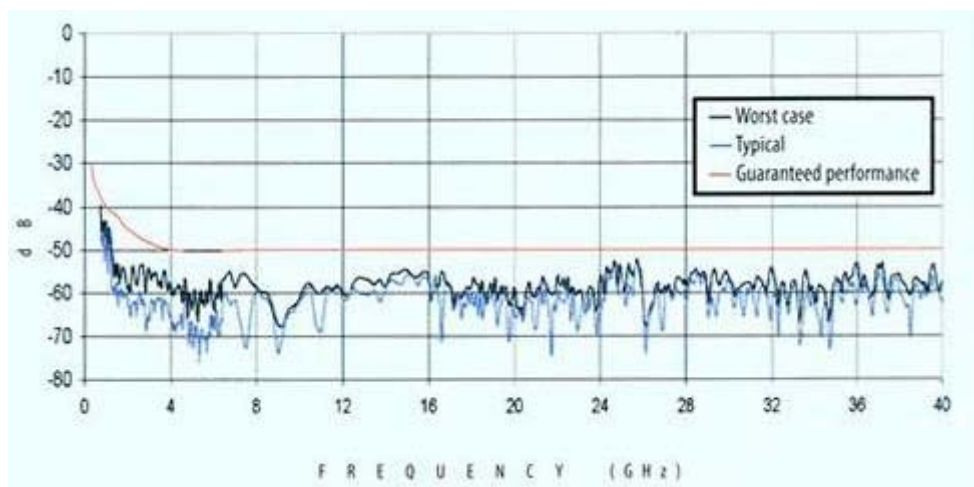
Η εταιρία ETS-LINDGREN σε αυτή την κατηγορία έχει διαθέσει δυο διαφορετικά μοντέλα το EHP-24 και το FS-600. Το EHP-24 φαίνεται να υπερέχει καθώς μπορεί να δεχτεί την ίδια ηλεκτρομαγνητική ισχύ αλλά με μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Σημαντικό πλεονέκτημα επίσης είναι η μεγάλη

διαφορά που έχουν στο βάρος. Το ύψος του EHP-24 είναι 61cm με 50.8cm να είναι η πυραμίδα και 10.2cm η βάση της. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σχεδιάγραμμα ενός κομματιού του EHP-24.



Σχήμα 4.2.3: Το EHP-24

Όπως παρατηρούμε το κάθε κομμάτι αποτελείται από 9 πυραμίδες που η κάθε μια έχει διαστάσεις βάσης 20,3*20,3cm. Το κάθε κομμάτι ζυγίζει 6,1kg. Η απόκριση της απορρόφησης του EHP-24 φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



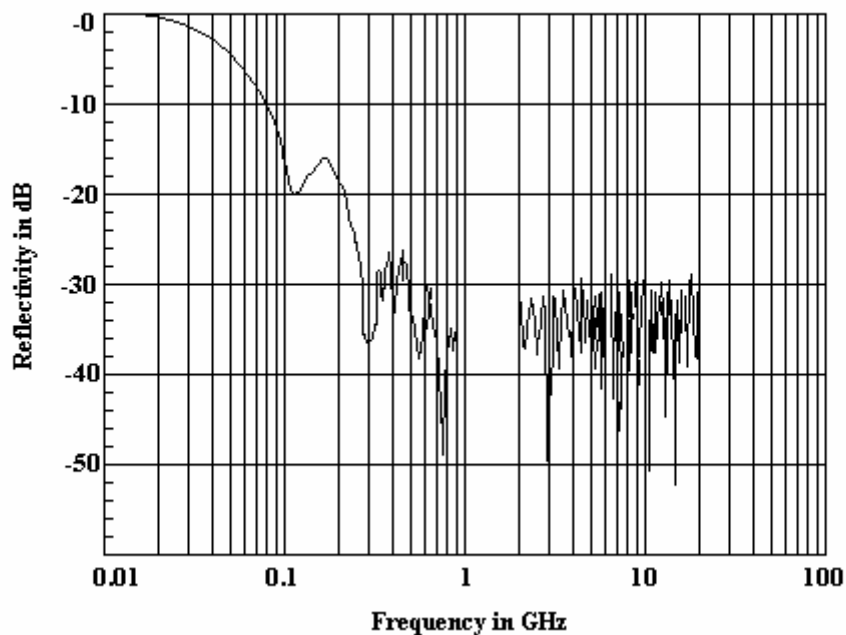
Σχήμα 4.2.3: Απόκριση της απορρόφησης του EHP-24 σε dB

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται η εγγυημένη (κόκκινη γραμμή), η τυπική (μπλε γραμμή) και η χειρότερη (μαύρη γραμμή) περίπτωση απόδοσης του EHP-24. Κάποιες τιμές για την τυπική και την εγγυημένη απορρόφηση σε σχέση με τη συχνότητα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.2.3: Απορρόφηση του EHP-24

Frequency/Band	Typical Reflectivity	Guaranteed Reflectivity (dB)
300 MHz	-32 dB	-30 dB
500 MHz	-37 dB	-35 dB
1-2 GHz L Band	-43 dB	-40 dB
2-4 GHz S Band	<-55 dB	-45 dB
4-8 GHz C Band	<-55 dB	-50 dB
8-12 GHz X Band	<-55 dB	-50 dB
12-18 GHz Ku Band	<-55 dB	-50 dB
18-40 GHz K-Band	<-50 dB	-50 dB

Ένας ακόμα απορροφητής είναι το FRANKO_{Sorb} P600 της εταιρίας FRANKONIA. Μια βασική διαφορά με τους προηγούμενους είναι ότι δεν διατίθεται σε κομμάτια αλλά κατασκευάζεται κατά παραγγελία στις διαστάσεις που ορίζονται από τον πελάτη. Το μέγεθος ωστόσο της κάθε πυραμίδας είναι 60cm στο ύψος και 20*20cm στη βάση. Η εταιρία μας δίνει ως τιμή για την ισχύ το 1kW/m². Παρακάτω φαίνεται το γράφημα που μας δίνει η εταιρία για την απορρόφηση σε σχέση με τη συχνότητα.



Σχήμα 4.2.4: Απόκριση της απορρόφησης του $FRANKO_{Sorb}$ P600 σε dB

Ωστόσο αν το συγκρίνουμε με το αντίστοιχο που είδαμε παραπάνω για το EHP-24 θα παρατηρήσουμε ότι το $FRANKO_{Sorb}$ P600 υστερεί σημαντικά ακόμα και για τη χειρότερη περίπτωση του πρώτου (όπως αυτό σημειώνεται με την κόκκινη γραμμή στο σχήμα 4.2.3).

4.3 Συμπληρωματικά τεχνικά στοιχεία

Οι εξωτερικοί αγωγοί καθώς και ο εσωτερικός είναι φτιαγμένοι από φύλλο αλουμινίου πάχους $u=2\text{mm}$ περίπου. Ο πλάγιος τοίχος θα έχει μια πόρτα η οποία θα είναι θωρακισμένη για την αποφυγή διαρροών ή παρεμβολών από εξωτερικά πεδία. Ο κεντρικός αγωγός είναι τοποθετημένος μέσω nylon rods που τον συνδέουν με τον πάνω εξωτερικό αγωγό.

Το πίσω μέρος του cell αποτελείται από ένα άκαμπτο πλαίσιο και ένα φύλλο αλουμινίου που είναι κυρτό σε σφαιρικό σχήμα για να υποστηρίξει τη σφαιρική διάταξη που πρέπει να έχουν οι RF απορροφητές.

Κεφάλαιο 5

Κεφάλαιο 5

Η προσομοίωση του GTEM cell

5.1 Το πρόγραμμα προσομοίωσης Super NEC

5.1.1 Εισαγωγή

Το Super NEC (Super Numerical Electromagnetic Code) είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κεραιών ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Επιτρέπει την προσομοίωση και την εκτίμηση της ηλεκτρομαγνητικής επίδοσης απλών κεραιών, καθώς και κεραιών που βρίσκονται τοποθετημένες πάνω σε πολύπλοκες κατασκευές, σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Η ανάπτυξη και εξέλιξη του Super NEC ξεκίνησε πριν από 12 χρόνια. Το σημείο εκκίνησης αποτέλεσε ο πολύ γνωστός αριθμητικός ηλεκτρομαγνητικός κώδικας (Numerical Electromagnetic Code) NEC 2, ο οποίος αναπτύχθηκε από το αμερικάνικο ναυτικό σε συνεργασία με τα εργαστήρια Lawrence Livermore, το 1982. Το 1987 ο Derek Nitch δημιούργησε μια παράλληλη έκδοση του NEC2, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα FORTRAN. Ο κώδικας που

προέκυψε με τον τρόπο αυτό ήταν πολύ δύσκολο να διαμορφωθεί και ο Derek Nitch ξανασχεδίασε το πρόγραμμα ξεκινώντας από την θεμελιώδη θεωρία χρησιμοποιώντας αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Το νέο πρόγραμμα, το οποίο ήταν γραμμένο σε C++, ήταν πιο γρήγορο, χρησιμοποιούσε πιο δυναμικές δομές δεδομένων και το σημαντικότερο, ήταν πολύ πιο εύκολο να επεκταθεί και να διαφοροποιηθεί. Το νέο πρόγραμμα ήταν διαμορφωμένο έτσι ώστε να εκτελείται παράλληλα σε διαφορετικούς υπολογιστές που είναι συνδεδεμένοι σε τοπικό δίκτυο. Μια μέθοδος λύσης για προβλήματα υψηλών συχνοτήτων, η γεωμετρική μέθοδος της περίθλασης (Uniform geometrical Theory of Diffraction, UTD), προστέθηκε στην ήδη υπάρχουσα μέθοδο των ροπών (Method of Moments, MOM) που χρησιμοποιούσαν οι πρώτες εκδόσεις του Super NEC, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα υβριδικό μοντέλο. Επίσης, προστέθηκαν μερικοί νέοι αλγόριθμοι για γρήγορες λύσεις των ολοκληρωτικών εξισώσεων. Μια καινοτομία στο Super NEC είναι και το γραφικό περιβάλλον που βασίζεται στο Matlab, τόσο για τα αρχεία εισόδου όσο και για τα αρχεία εξόδου. Το γεγονός αυτό έκανε το πρόγραμμα πολύ πιο εύχρηστο σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση του NEC2.

Το NEC2 εκτελούσε τις προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών (Method of Moments, MOM). Στη μέθοδο αυτή γίνεται διακριτοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιώντας μικρά αγωγίμα τμήματα (wire segments), συχνά στην μορφή δικτυώματος, όταν μοντελοποιούνται επιφάνειες. Προκειμένου η παραπάνω μέθοδος να παρέχει σωστά αποτελέσματα πρέπει τα μικρά αγωγίμα τμήματα να έχουν μέγεθος περίπου ίσο με το $1/10$ του μήκους κύματος. Ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος στον υπολογιστή είναι ανάλογος του N^3 , ενώ η μνήμη που

απαιτείται είναι ανάλογη του N^2 , όπου N είναι ο αριθμός των αγνώστων.

Η γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (UTD) είναι μια ηλεκτρομαγνητική μέθοδος που αφορά υψηλές συχνότητες, όπου το μέγεθος των στοιχείων που αποτελούν το πρόβλημα, είναι πολύ μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος. Η μέθοδος UTD συμπλήρωσε την μέθοδο των ροπών, έτσι ώστε τα υψηλής συχνότητας προβλήματα να μπορούν να επιλύονται με τη μέθοδο UTD, ενώ τα χαμηλότερης συχνότητας προβλήματα επιλύονται με την μέθοδο των ροπών.

Στην προσπάθεια να γεφυρωθεί το χάσμα ανάμεσα στο ηλεκτρικό μέγεθος των προβλημάτων που επιλύονται μόνο με την μέθοδο των ροπών και σε αυτά που επιλύονται με τη μέθοδο UTD, δημιουργήθηκε ένα νέο υβριδικό μοντέλο που αποτελείται και από τις δύο αυτές μεθόδους. Ο νέος αυτός υβριδικός κώδικας μπορεί να αναλύσει προβλήματα, στα οποία μικρά αγωγιμα τμήματα, διηλεκτρικές πλάκες, κύλινδροι, σφαίρες κτλ. μπορούν να συνυπάρχουν στο ίδιο πρόβλημα. Συνδυάζοντας τις δύο μεθόδους, έχει αυξηθεί το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο μπορούν να επιλυθούν διάφορα προβλήματα. Το πρόγραμμα έχει μετατραπεί έτσι ώστε να μπορεί να εκτελείται παράλληλα σε διαφορετικούς υπολογιστές, συνδεδεμένους σε τοπικό δίκτυο με την βοήθεια του πακέτου PVM (Parallel Virtual Machine). Το όφελος από αυτή την προσαρμογή του προγράμματος είναι πολύ σημαντικό, γιατί διαφορετικοί υπολογιστές μπορούν να συνδεθούν για να λύσουν μεγάλα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα.

5.1.2 Θεωρία του προγράμματος προσομοίωσης Super NEC

Η υβριδική τεχνική που χρησιμοποιείται στο Super NEC παρουσιάζεται στη συνέχεια:

Η εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών είναι η ακόλουθη:

$$L(J) = E \quad (1)$$

όπου L είναι ένας γραμμικός τελεστής. Ο γραμμικός τελεστής που χρησιμοποιείται στο Super NEC είναι η εξίσωση του Rocklington, η οποία σχετίζει το παρατηρούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με την πυκνότητα ρεύματος. Στη μέθοδο των ροπών η πυκνότητα του ρεύματος J , στην διάταξη που μας ενδιαφέρει, αναπτύσσεται στην ακόλουθη σειρά με την βοήθεια των συναρτήσεων βάσης J_1, J_2, J_3, \dots

$$J = \sum_{n=1}^N a_n J_n \quad (2)$$

όπου N είναι ο αριθμός των συναρτήσεων βάσης που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν το ρεύμα και a_n είναι ένας άγνωστος μιγαδικός συντελεστής. Χρησιμοποιώντας μια σειρά συναρτήσεων βάρους, W_1, W_2, W_3, \dots , η εξίσωση (1) μετατρέπεται στην ακόλουθη μορφή:

$$\sum_{n=1}^N a_n \langle W_m, L(J_n) \rangle = \langle W_m, E_m^i \rangle \quad (3)$$

όπου E_m^i αναπαριστά το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η συνάρτηση βάρους που χρησιμοποιεί το Super NEC είναι η συνάρτηση δέλτα.

Η εξίσωση (3) αποτελεί μια μόνο γραμμή στον πίνακα της μεθόδου των ροπών. Η εξίσωση, σχετίζει όλα τα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, λόγω των πηγών του ρεύματος, με το m -στο σημείο παρατήρησης στο χώρο. Για $m=1, 2, \dots, n$ σημεία παρατήρησης η εξίσωση (3) μπορεί να εκφραστεί στη μορφή:

$$[Z_{mn}][a_n]=[V_m] \quad (4)$$

όπου

$$Z_{mn}=\langle W_m, L(J_n) \rangle \quad (5)$$

Το εσωτερικό γινόμενο ορίζεται έτσι ώστε να ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

$$\langle (aJ_1 + \beta J_2), E \rangle = a\langle J_1, E \rangle + b\langle J_2, E \rangle \quad (6)$$

όπου a, β είναι σταθερές.

$$\langle J, E \rangle = \langle E, J \rangle \quad (7)$$

$$\langle J^*, J \rangle > 0$$

$$\text{αλλά } \langle J^*, J \rangle = 0 \text{ αν } J=0 \quad (8)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6) και (7) μπορεί ναδειχθεί ότι:

$$\langle J, (aE_1 + bE_2) \rangle = a\langle J, E_1 \rangle + b\langle J, E_2 \rangle \quad (9)$$

όπου a και b είναι μιγαδικοί συντελεστές.

Τα στοιχεία του πίνακα αλληλεπίδρασης μπορούν να θεωρηθούν ως:

$$Z'_{mn} = \langle W_m, [L(J_n)] + bL[J_n] \rangle \quad (10)$$

όπου $L(J_n)$ είναι ο κλασικός υπολογισμός που γίνεται στον υπολογισμό της μεθόδου των ροπών, και $bL(J_n)$ είναι παριστάνει μια πρόσθετη συνεισφορά στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο συγκεκριμένο σημείο παρατήρησης, η οποία οφείλεται στο ρεύμα J_n και στην αλληλεπίδραση του πεδίου με κάποιο εμπόδιο που περιγράφεται από τη θεωρία UTD. Η εξίσωση (10) με τη βοήθεια της εξίσωσης (9) γράφεται στη μορφή:

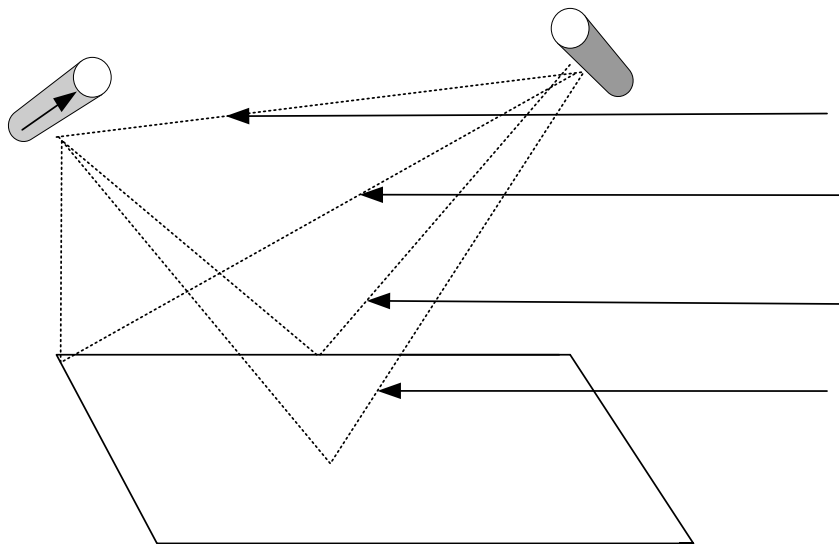
$$Z'_{mn} = \langle W_m, [L(J_n)] \rangle + \langle W_m, bL[J_n] \rangle \quad (11)$$

ή

$$Z'_{mn} = Z_{mn} + Z_{mn}^{UTD} \quad (12)$$

Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα, ότι τα στοιχεία του πίνακα της μεθόδου των ροπών προστίθενται με αυτά που προκύπτουν από τα επιπρόσθετα πεδία, τα οποία προκύπτουν από διαθλάσεις ή ανακλάσεις πάνω σε

αντικείμενα που περιγράφονται με το μοντέλο UTD. Το σχήμα 5.1.2.1 δείχνει τους διαφορετικούς συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη σε ένα μόνο στοιχείο του πίνακα επίλυσης του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος. Ο όρος Z_{mn} προκύπτει από το πεδίο που παρατηρείται σε δεδομένο σημείο και προέρχεται από απευθείας μετάδοση οπτικής επαφής, ενώ ο όρος Z_{mn}^{UTD} είναι το άθροισμα των κυμάτων που προέρχονται από ανάκλαση και περίθλαση, λόγω ακμών και γωνιών ενός εμποδίου, είτε αυτό είναι διηλεκτρική πλάκα ή κύλινδρος ή κάποια άλλη γεωμετρική διάταξη.



Σχήμα 5.1.2.1: Οι διαφορετικοί συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη όταν συμπληρώνεται ο πίνακας αλληλεπιδράσεων της μεθόδου των ροπών

$I(s)$

Απευθείας πεδίο

Πηγή

Πεδίο από περιθλαση σε κ...

Πεδίο από περίθλαση σε κ...

5.1.3 Η εξίσωση του Pocklington

Η εξίσωση του Pocklington είναι η βάση της λύσης της μεθόδου των ροπών που χρησιμοποιεί το Super NEC. Η μορφή της εξίσωσης είναι τέτοια ώστε το κάθε στοιχειώδες αγώγιμο τμήμα θεωρείται ότι έχει ένα στοιχειώδες ηλεκτρικό ρεύμα. Η εξίσωση είναι της ακόλουθης μορφής:

$$E_{obs} = \frac{\mu}{j4\pi\omega\epsilon} \int_{length} \hat{I}(\omega^2\epsilon + \nabla_0\nabla\cdot) \frac{e^{-jkr}}{r} dl \quad (13)$$

όπου

- E_{obs} είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο παρατήρησης

- \hat{I} είναι η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει το ρεύμα σε ένα στοιχειώδες αγώγιμο τμήμα της πηγής.

- μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα

- ϵ είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα

- ω είναι η κυκλική συχνότητα

- k είναι ο κυματαριθμός

- r είναι η απόσταση μεταξύ της πηγής και του σημείου παρατήρησης

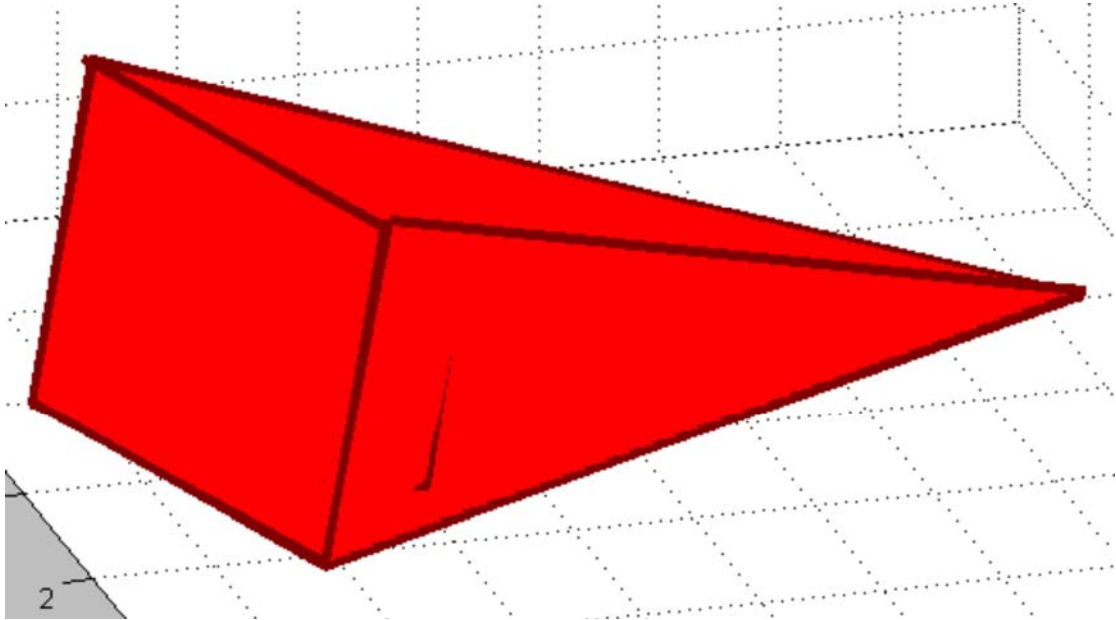
Ο τελεστής $\nabla_0\nabla$ αναπαριστά τον τελεστή ∇^2 , όπου το πρώτο διαφορικό εφαρμόζεται στην πηγή και το δεύτερο στο σημείο παρατήρησης.

5.2 Η προσομοίωση του GTEM cell με τη χρήση του Super NEC

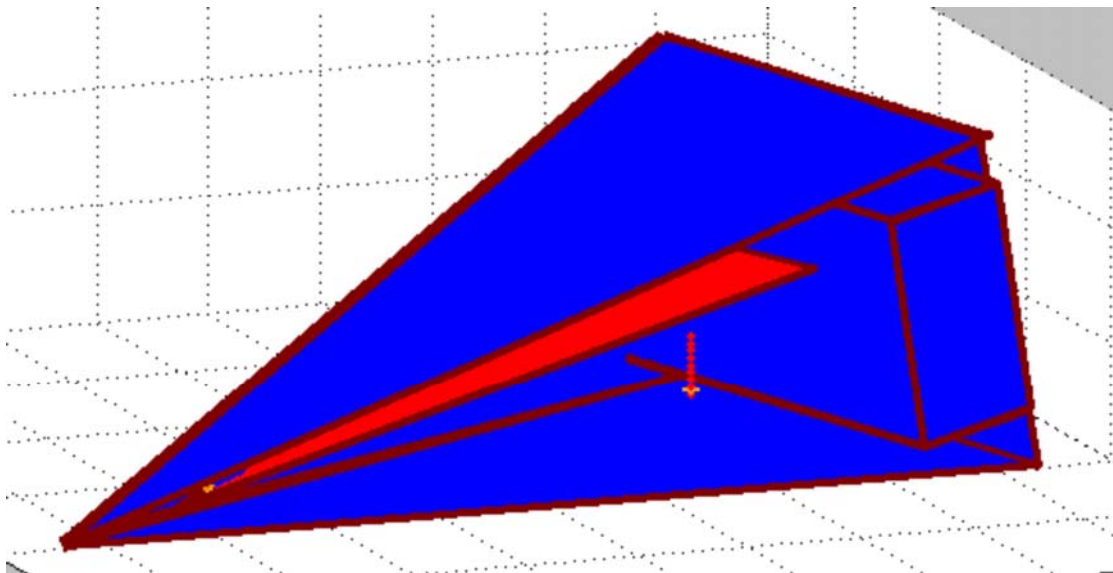
Το GTEM cell αποτελεί μια ιδιαίτερα σύνθετη κατασκευή τόσο λόγω της γεωμετρίας του όσο και λόγω των υλικών από τα οποία αποτελείται. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση πολλών παραδοχών και προσεγγίσεων κατά την υλοποίηση της προσομοίωσης του με τη χρήση του Super NEC. Επιλέχθηκε να προσομοιωθεί το αριθμητικό μοντέλο για ύψος αντικειμένου 0,25m. Η δομή που σχεδιάστηκε έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μη ακριβής αλλά προσεγγιστική τοποθέτηση του septum στα $2/3$ της απόστασης μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αγωγού.
- Υλοποίηση του ωμικού τερματισμού στο τέλος του septum με χρήση μιας μόνο αντίστασης των 50Ω και όχι με μια παραλληλία αντιστάσεων συνολικής αντίστασης 50Ω .
- Υλοποίηση των κωνικών απορροφητών του τερματισμού κύματος με παραλληλόγραμμα τρισδιάστατα κενά αντικείμενα με κατάλληλες τιμές ειδικής αγωγιμότητας και επιτρεπτότητας. Τα παραλληλόγραμμα αντικείμενα τοποθετήθηκαν το ένα μέσα στο άλλο με στόχο την προσομοίωση με το μέγιστο δυνατό τρόπο της συμπαγούς δομής των απορροφητών.
- Το απαραίτητο πορτάκι για την εισαγωγή των αντικειμένων υπό εξέταση δεν υλοποιήθηκε για λόγους ευκολίας και καθώς η σχεδιαστική του απουσία δεν επιδρά αρνητικά στη λειτουργία του GTEM cell.

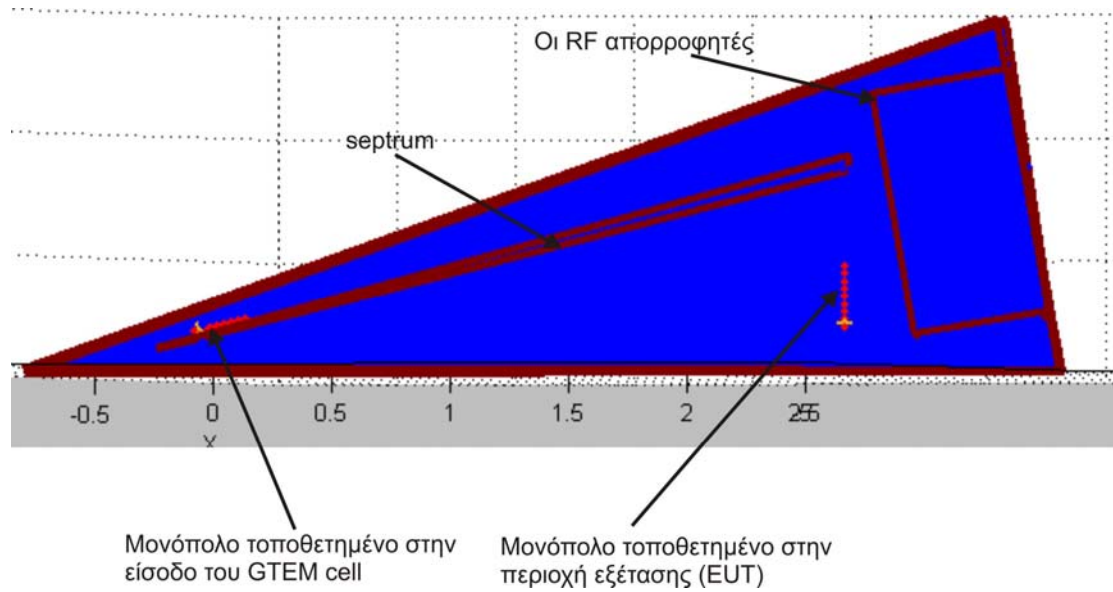
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η δομή προσομοίωσης του GTEM cell που υλοποιήθηκε από διάφορες οπτικές γωνίες και σε ορισμένες περιπτώσεις απουσία μιας πλευράς ώστε να γίνεται ορατό το εσωτερικό της δομής.



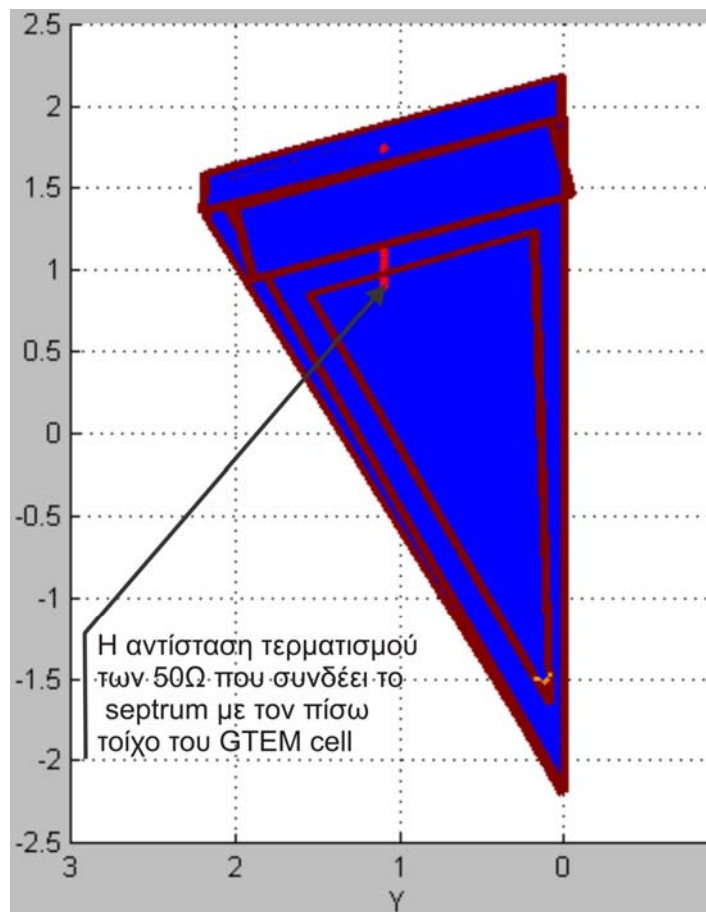
Σχήμα 5.2.1: Η πίσω όψη της προσομοιωμένης δομής του GTEM cell



Σχήμα 5.2.2: Μια τρισδιάστατη άποψη του GTEM cell χωρίς το ένα πλάγιο φύλλο του. Η κόκκινη επιφάνεια αποτελεί το septum



Σχήμα 5.2.3: Δισδιάστατη όψη του GTEM cell όπου υποδεικνύονται κάποια στοιχεία του καθώς και οι θέσεις των μονοπόλων που συμμετέχουν στην προσομοίωση



Σχήμα 5.2.4: Η κάτοψη του GTEM cell έχοντας αφαιρέσει το πάνω φύλλο

Στόχος της προσομοίωσης αυτής είναι ο έλεγχος της γραμμικότητας που χαρακτηρίζει τη συσκευή για το όλο το φάσμα συχνοτήτων για το οποίο προορίζεται να υλοποιεί μετρήσεις. Για τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν ορίζουμε τη θέση της εισόδου του GTEM, δηλαδή την αρχή του septum, ως θέση 1. Αντίστοιχα, η περιοχή όπου τοποθετείται το υπό εξέταση αντικείμενο, δηλαδή η περιοχή στο τέλος και κάτω από το septum, θα αποτελεί τη θέση 2. Κάτω από αυτό το πρίσμα, προσομοιώνονται οι παρακάτω διατάξεις.

5.2.1 Μονόπολο-Δέκτης στη θέση 2

Η ηλεκτρονική συσκευή τοποθετείται στην περιοχή εξέτασης και εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία διαφόρων συχνοτήτων. Προκειμένου να προσομοιωθεί η συγκεκριμένη διάταξη τοποθετήθηκε στην θέση 1 μονόπολο συνολικού μήκους 0,25cm και στην θέση 2 τοποθετήθηκε μονόπολο συνολικού μήκους 0,21cm και αντίστασης 50Ω. Το μονόπολο της πρώτης θέσης τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να συνδέεται στην αρχή του septum χωρίς να έρχεται σε επαφή με τις εξωτερικές πλάκες του GTEM. Με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά της διάταξης πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για συχνότητες από 400MHz έως και 1100MHz. Σε κάθε μία από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν το κύριο στοιχείο που χρησιμοποιήσαμε ήταν οι πίνακες του ρεύματος για όλα τα σημεία του cell. Στους πίνακες των αρχείων εξόδου που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις δίνεται το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του ρεύματος I για κάθε segment. Βέβαια πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι τα segments που κυρίως μας ενδιαφέρουν είναι αυτά που αποτελούν το μονόπολο που βρίσκεται στην θέση 2, καθώς σε αυτή τη θέση θέλουμε να δούμε την τιμή της

ισχύος που λαμβάνεται εξαιτίας της εκπομπής του μονοπόλου της θέσης 1. Για κάθε ένα από τα segments υπολογίσαμε την RMS τιμή του ρεύματος:

$$I_{rms} = \sqrt{(I_r)^2 + (I_{im})^2}$$

όπου I_r είναι το πραγματικό μέρος του ρεύματος και I_{im} το φανταστικό μέρος του ρεύματος.

Στην συνέχεια υπολογίσαμε την τελική ισχύ σε κάθε segment P_2 με βάση τον ακόλουθο τύπο :

$$P_2 = (I_{rms})^2 \times R$$

όπου $R=50\Omega$.

Την παραπάνω ισχύ που μετριέται σε Watt την μετατρέψαμε σε dBW με βάση τον γνωστό τύπο προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα να προβούμε σε συγκρίσεις με την εισερχόμενη ισχύ.

$$P_2(dBW) = 10 \times \log_{10} P_2(W)$$

Την πληροφορία για την εισερχόμενη ισχύ του συστήματος την αντλήσαμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και την μετατρέψαμε κατά τον ίδιο τρόπο σε dBW. Στην συνέχεια υπολογίσαμε την διαφορά της τελικής από την αρχική ισχύ για κάθε segment ξεχωριστά. Για τους υπολογισμούς όμως που θα ακολουθήσουν χρησιμοποιούνται οι τιμές των ρευμάτων μόνο του τελευταίου segment του μονοπόλου. Οι υπολογισμοί γίνονται για βήμα συχνότητας ίσο με 100MHz.

5.2.1.1 f=400MHz

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 1 είναι ίση με:

$$P_1 = 19,257 \mu W \text{ ή σε dB, } P_1 = -47,154 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 1 προκαλεί στην κεραία της θέσης 2 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_2 = (0,00006057 + j0,0004133) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_2| = 0,000418 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 2 θα είναι ίση με: $P_2 = |I_2|^2 * R = 8,724 \mu W$ με $R = 50 \Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_2 = -50,927 \text{ dBw .}$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 400MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_1 - P_2$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{400} = 3,44 \text{ dB}$$

5.2.1.2 f=500MHz

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 1 είναι ίση με:

$$P_1 = 40,558 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_1 = -43,919 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 1 προκαλεί στην κεραία της θέσης 2 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_2 = (0,00008891 + j0,0005465) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_2| = 0,000554 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 2 θα είναι ίση με: $P_2 = |I_2|^2 * R = 15,328 \mu\text{W}$ με $R = 50 \Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_2 = -48,145 \text{ dBw .}$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 500MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_1 - P_2$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{500} = 4,226 \text{ dB}$$

5.2.1.3 f=600MHz

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 1 είναι ίση με:

$$P_1 = 29,104 \mu W \text{ ή σε dB, } P_1 = -45,361 \text{dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 1 προκαλεί στην κεραία της θέσης 2 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_2 = (0,0005719 + j0,0008465) A .$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_2| = 0,0010216 A .$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 2 θα είναι ίση με: $P_2 = |I_2|^2 * R = 52,183 \mu W$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_2 = -42,825 \text{dBw} .$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 600MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_1 - P_2$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{600} = 2,536 \text{ dB}$$

5.2.1.4 f=700MHz

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 1 είναι ίση με:

$$P_1 = 4,94 \times 10^{-4} \text{ W} \text{ ή σε dB, } P_1 = -33,063 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 1 προκαλεί στην κεραία της θέσης 2 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_2 = (0,0008785 - j0,001096) \text{ A} .$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_2| = 0,001405 \text{ A} .$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 2 θα είναι ίση με: $P_2 = |I_2|^2 * R = 98,649 \mu\text{W}$ με $R = 50 \Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_2 = -40,059 \text{ dBw} .$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 700MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_1 - P_2$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{700} = 6,996 \text{ dB}$$

5.2.1.5 $f=800\text{MHz}$

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 1 είναι ίση με:

$$P_1 = 46,019 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_1 = -43,371 \text{dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 1 προκαλεί στην κεραία της θέσης 2 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_2 = (0,0000533 - j0,00054) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_2| = 0,000547 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 2 θα είναι ίση με: $P_2 = |I_2|^2 * R = 14,939 \mu\text{W}$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_2 = -48,257 \text{dBw .}$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 800MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_1 - P_2$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{800} = 4,886 \text{dB}$$

5.2.1.6 f=900MHz

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 1 είναι ίση με:

$$P_1 = 58,77 \mu W \text{ ή σε dB, } P_1 = -42,308 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 1 προκαλεί στην κεραία της θέσης 2 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_2 = (-0,00002905 - j0,00055) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_2| = 0,000549 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 2 θα είναι ίση με: $P_2 = |I_2|^2 * R = 15,074 \mu W$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_2 = -48,218 \text{ dBw .}$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 900MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_1 - P_2$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{900} = 5,909 \text{ dB}$$

5.2.1.7 $f=1000\text{MHz}$

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 1 είναι ίση με:

$$P_1 = 132,94 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_1 = -38,763 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 1 προκαλεί στην κεραία της θέσης 2 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_2 = (-0,0002409 - j0,00072) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_2| = 0,000758 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 2 θα είναι ίση με: $P_2 = |I_2|^2 * R = 28,756881 \mu\text{W}$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_2 = -45,413 \text{ dBw .}$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 1000MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_1 - P_2$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{1000} = 6,649 \text{ dB}$$

5.2.1.8 $f=1100\text{MHz}$

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 1 είναι ίση με:

$$P_1 = 506,88 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_1 = -32,951 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 1 προκαλεί στην κεραία της θέσης 2 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_2 = (-0,001053 - j0,00066) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_2| = 0,001241 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 2 θα είναι ίση με: $P_2 = |I_2|^2 * R = 77,056 \mu\text{W}$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_2 = -41,132 \text{ dBw .}$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 1100MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_1 - P_2$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{1100} = 8,181 \text{ dB}$$

5.2.2 Μονόπολο-Δέκτης στη θέση 1

Η ηλεκτρονική συσκευή τοποθετείται στην περιοχή εξέτασης και ακολουθεί διεξαγωγή μετρήσεων προκειμένου να εξετασθεί η εκπομπή της και κατά πόσο ακτινοβολούνται ανεπιθύμητα σήματα. Η διαδικασία αυτή ταυτίζεται με την πραγματοποίηση μετρήσεων εκπομπής με χρήση του GTEM cell. Προκειμένου να προσομοιωθεί η συγκεκριμένη διάταξη τοποθετήθηκε στην θέση 1 μονόπολο συνολικού μήκους 0,25cm

και αντίστασης 50Ω και στην θέση 2 τοποθετήθηκε μονόπολο συνολικού μήκους $0,21\text{cm}$. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για συχνότητες από 400MHz έως και 1100MHz . Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην προηγούμενη περίπτωση ισχύει και για αυτή, με την διαφορά ότι η ισχύς εκπέμπεται αυτή τη φορά από την θέση 2 και μας ενδιαφέρει το ρεύμα του μονοπόλου στην θέση 1. Έτσι σε αυτή την περίπτωση η εισερχόμενη ισχύς είναι αυτή της θέσης 2 (P_2) ενώ η τελική ισχύς είναι αυτή της θέσης 1 (P_1).

$$P_1 = (I_{rms})^2 \times R \quad (R=50\Omega)$$

Όπως και παραπάνω παίρνουμε τις μετρήσεις από το τελευταίο segment του μονοπόλου που βρίσκεται στη θέση 1. Παρακάτω ακολουθούν οι υπολογισμοί για όλες τις συχνότητες.

5.2.2.1 f=400MHz

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 2 είναι ίση με:

$$P_2 = 19,242 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_2 = -47,1575 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 2 προκαλεί στην κεραία της θέσης 1 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_1 = (0,000002598 - j0,0004204) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_1| = 0,00042 \text{ A}$.

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 1 θα είναι ίση με: $P_1 = |I_1|^2 * R = 8,837 \mu\text{W}$ με $R = 50 \Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_1 = -50,537 \text{ dBw}$.

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 400MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_2 - P_1$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{400} = 3,379 \text{ dB}$$

5.2.2.2 $f=500\text{MHz}$

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 2 είναι ίση με:

$$P_2 = 40,555 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_2 = -43,9196 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 2 προκαλεί στην κεραία της θέσης 1 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_1 = (-0,00002699 + j0,0001638) \text{ A} .$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_1| = 0,000166 \text{ A} .$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 1 θα είναι ίση με: $P_1 = |I_1|^2 * R = 1,378 \mu\text{W}$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_1 = -58,6077 \text{ dBw} .$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 500MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_2 - P_1$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{500} = 14,688 \text{ dB}$$

5.2.2.3 f=600MHz

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 2 είναι ίση με:

$$P_2 = 29,62 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_2 = -45,2841 \text{dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 2 προκαλεί στην κεραία της θέσης 1 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_1 = (-0,001421 + j0,00117) \text{ A} .$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_1| = 0,001841 \text{ A} .$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 1 θα είναι ίση με: $P_1 = |I_1|^2 * R = 169,407 \mu\text{W}$ με $R = 50 \Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_1 = -37,7107 \text{dBw} .$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 600MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_2 - P_1$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{600} = -7,573 \text{ dB}$$

5.2.2.4 $f=700\text{MHz}$

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 2 είναι ίση με:

$$P_2 = 388,75 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_2 = -34,1033 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 2 προκαλεί στην κεραία της θέσης 1 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_1 = (0,0004624 - j0,0003491) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_1| = 0,000579 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 1 θα είναι ίση με: $P_1 = |I_1|^2 * R = 16,784 \mu\text{W}$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_1 = -47,751 \text{ dBw .}$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 700MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_2 - P_1$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{700} = 13,648 \text{ dB}$$

5.2.2.5 f=800MHz

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 2 είναι ίση με:

$$P_2 = 46,018 \mu W \text{ ή σε dB, } P_2 = -43,371 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 2 προκαλεί στην κεραία της θέσης 1 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_1 = (-0,0003 - j0,00107) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_1| = 0,001114 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 1 θα είναι ίση με: $P_1 = |I_1|^2 * R = 62,097 \mu W$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_1 = -42,069 \text{ dBw .}$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 800MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_2 - P_1$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{800} = -1,301 \text{ dB}$$

5.2.2.6 $f=900\text{MHz}$

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 2 είναι ίση με:

$$P_2 = 58,732 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_2 = -42,311\text{dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 2 προκαλεί στην κεραία της θέσης 1 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_1 = (-0,00000261 - j0,00045) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_1| = 0,000449 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 1 θα είναι ίση με: $P_1 = |I_1|^2 * R = 10,071 \mu\text{W}$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_1 = -49,969\text{dBw}$.

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 900MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_2 - P_1$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{900} = 7,658 \text{ dB}$$

5.2.2.7 $f=1000\text{MHz}$

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 2 είναι ίση με:

$$P_2 = 132,94 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_2 = -38,763 \text{ dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 2 προκαλεί στην κεραία της θέσης 1 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_1 = (0,000047 - j0,00003634) \text{ A} .$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_1| = 0,0000594104 \text{ A} .$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 1 θα είναι ίση με: $P_1 = |I_1|^2 * R = 0,1765 \mu\text{W}$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_1 = -67,533 \text{ dBw} .$

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 1000MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_2 - P_1$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{1000} = 28,76961 \text{ dB}$$

5.2.2.8 $f=1100\text{MHz}$

Από το output file της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς από τη θέση 2 είναι ίση με:

$$P_2 = 506,88 \mu\text{W} \text{ ή σε dB, } P_2 = -32,951 \text{dBw}$$

Η εκπομπή της κεραίας που βρίσκεται στη θέση 2 προκαλεί στην κεραία της θέσης 1 ροή ρεύματος με τα παρακάτω πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$I_1 = (0,0002041 + j0,00003322) \text{ A .}$$

Αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα έντασης $|I_1| = 0,000206786 \text{ A .}$

Συνεπώς, η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία της θέσης 1 θα είναι ίση με: $P_1 = |I_1|^2 * R = 2,138 \mu\text{W}$ με $R=50\Omega$.

Οπότε έχουμε πλέον σε dB ότι $P_1 = -56,7 \text{dBw}$.

Τελικά, οι απώλειες σε dB για συχνότητα εκπομπής τα 1100MHz δίνονται από τη σχέση $\Delta P = P_2 - P_1$ και θα είναι ίσες με:

$$\Delta P_{1100} = 23,749 \text{dB}$$

5.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στους δυο πίνακες (5.2.3.1 και 5.2.3.2) που ακολουθούν συνοψίζονται όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα τόσο για την περίπτωση που έχουμε δέκτη στη θέση 2 όσο και για την περίπτωση που έχουμε δέκτη στη θέση 1.

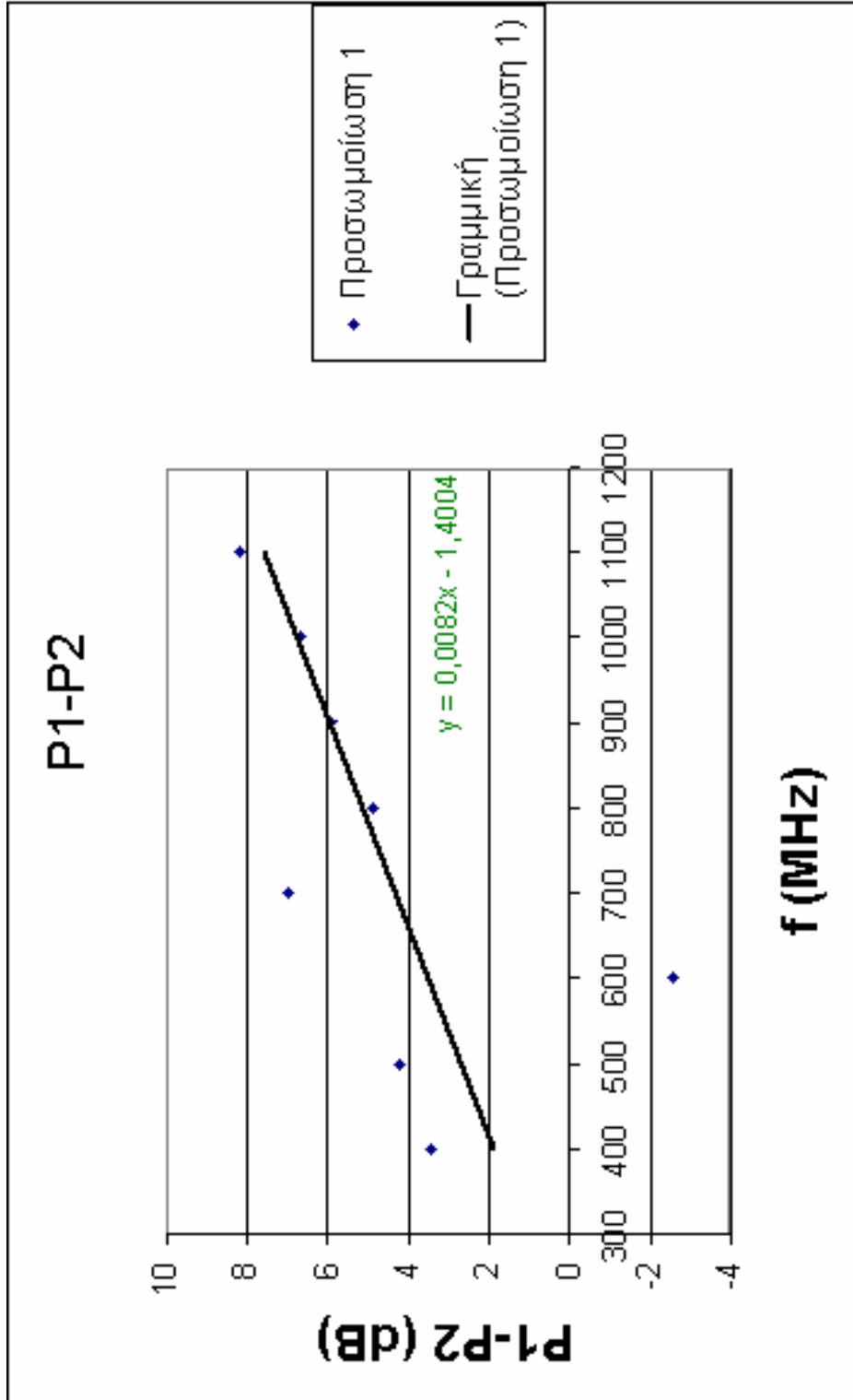
Ακολουθως, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις (σχήματα 5.2.3.1 και 5.2.3.2) των διαφορών της ισχύος (σε dB) συναρτήσει της συχνότητας f (σε MHz).

Πίνακας 5.2.3.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης 1

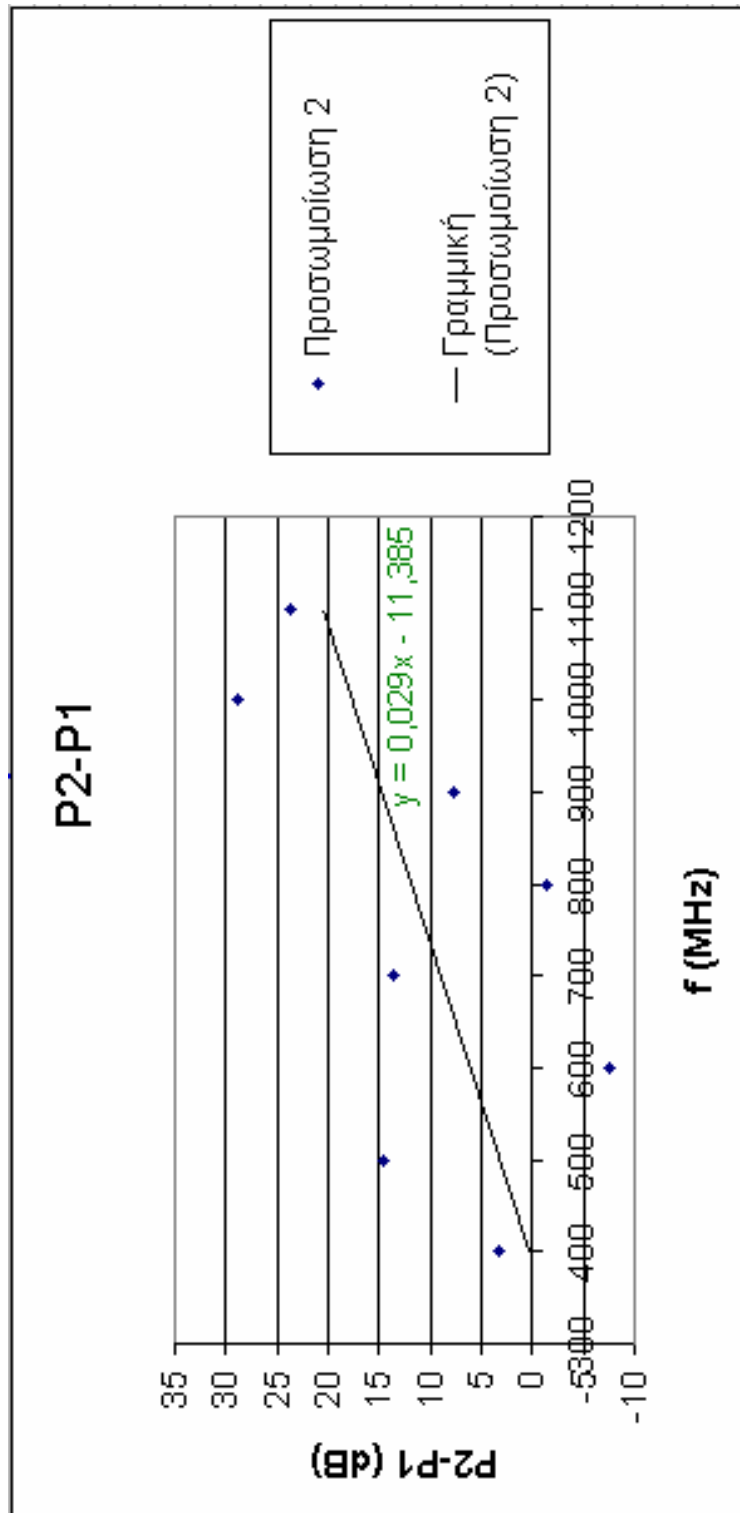
f (MHz)	REAL	IMAG.	PHASE	I (A)	P2 (W)	P2 (dBW)	P1 (W)	P1 (dBW)	P1-P2 (dB)
400	6.06E-05	4.13E-04	81.663	0.000418	8.724E-06	-50.593	1.926E-05	-47.154	3.439
500	8.89E-05	5.47E-04	80.759	0.000554	1.533E-05	-48.145	4.056E-05	-43.919	4.226
600	5.72E-04	8.47E-04	55.958	0.001022	5.218E-05	-42.825	2.910E-05	-45.360	-2.536
700	8.79E-04	-1.10E-03	-51.28	0.001405	9.865E-05	-40.059	4.940E-04	-33.063	6.996
800	0.0000533	-0.000544	-84.4	0.000547	1.494E-05	-48.257	4.602E-05	-43.371	4.886
900	-0.00002905	-0.0005483	-93.03	0.000549	1.507E-05	-48.218	5.877E-05	-42.308	5.909
1000	-0.0002409	-0.0007191	-108.5	0.000758	2.876E-05	-45.413	1.329E-04	-38.763	6.649
1100	-0.001053	-0.0006575	-148	0.001241	7.706E-05	-41.132	5.069E-04	-32.951	8.181

Πίνακας 5.2.3.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης 2

f (MHz)	REAL	IMAG.	PHASE	I (A)	P1 (W)	P1 (dBW)	P2 (W)	P2 (dBW)	P2-P1 (dB)
400	2.60E-06	-4.20E-04	-89.65	0.00042	8.837E-06	-50.537	1.924E-05	-47.157	3.379
500	-2.70E-05	1.64E-04	99.356	0.000166	1.378E-06	-58.608	4.056E-05	-43.920	14.688
600	-1.42E-03	1.17E-03	140.54	0.001841	1.694E-04	-37.711	2.962E-05	-45.284	-7.573
700	4.62E-04	-3.49E-04	-37.06	0.000579	1.678E-05	-47.751	3.888E-04	-34.103	13.648
800	-0.000301	-0.001073	-105.7	0.001114	6.210E-05	-42.069	4.602E-05	-43.371	-1.301
900	-0.0000261	-0.0004488	-90.33	0.000449	1.007E-05	-49.969	5.873E-05	-42.311	7.658
1000	4.70E-05	-3.63E-05	-37.71	5.94E-05	1.765E-07	-67.533	1.329E-04	-38.763	28.770
1100	0.0002041	0.00003322	9.244	0.000207	2.138E-06	-56.700	5.069E-04	-32.951	23.749



Σχήμα 5.2.3.1.1:Γραφική παράσταση της διαφοράς ισχύος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για μονόπολο-δέκτη στη θέση 2



Σχήμα 5.2.3.2: Γραφική παράσταση της διαφοράς ισχύος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για μονόπολο-δέκτη στη θέση 1

Παρατηρώντας το σχήμα 5.2.3.1 βλέπουμε ότι οι διαφορές ισχύος κυμαίνονται από 3,5dB έως 8dB. Μάλιστα, όσο μεγαλώνει η συχνότητα που χρησιμοποιείται τόσο μεγαλύτερες διαφορές εμφανίζονται. Η σχέση των δύο μεγεθών, μέσα στο GTEM cell, τείνει να είναι γραμμική και είναι δυνατόν να προσεγγιστεί από την παρακάτω σχέση που προκύπτει με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων:

$$\Delta P = 0,0082 * f - 1,4004$$

Η σχέση αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την ισχύ που θα λαμβάνεται στη θέση 2 με δεδομένη την εκπεμπόμενη ισχύ από τη θέση 1, ανάλογα με τη συχνότητα.

Στο σχήμα 5.2.3.2 βλέπουμε μια διακύμανση της διαφοράς ισχύος από -1dB έως 28dB. Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, με την αύξηση της συχνότητας παρατηρείται μια γραμμική αύξηση της διαφοράς ισχύος. Με εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\Delta P = 0,029 * f - 11,385$$

Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την πραγματική ισχύ που εκπέμπεται από τη θέση 2 αν προσθέσουμε στην ισχύ που μετράμε στη θέση 1, τη διαφορά ΔP που δίνεται από την παραπάνω σχέση. Η περίπτωση αυτή είναι ένα παράδειγμα υλοποίησης μέτρησης εκπομπής με χρήση του GTEM cell.

Τέλος, και για τις δυο περιπτώσεις προσομοίωσης πρέπει να σημειώσουμε ότι είναι πολύ πιθανό να διογκώνεται το φαινόμενο της αύξησης της διαφοράς της ισχύος σε συνάρτηση με τη συχνότητα λόγω της μη ικανοποιητικής

προσέγγισης των RF απορροφητών που υλοποιούν τον τερματισμό κύματος. Αυτό οφείλεται στο ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν προσέφερε τα κατάλληλα εργαλεία ώστε να προσομοιωθούν οι συμπαγείς πυραμιδοειδείς δομές των απορροφητών. Έτσι, για συχνότητες μεγαλύτερες των 500MHz δεν προσεγγίστηκε στο μέγιστο ικανοποιητικό βαθμό ο επιθυμητός συντελεστής ανάκλασης.

Κεφάλαιο 6

Κεφάλαιο 6

Τελική πρόταση

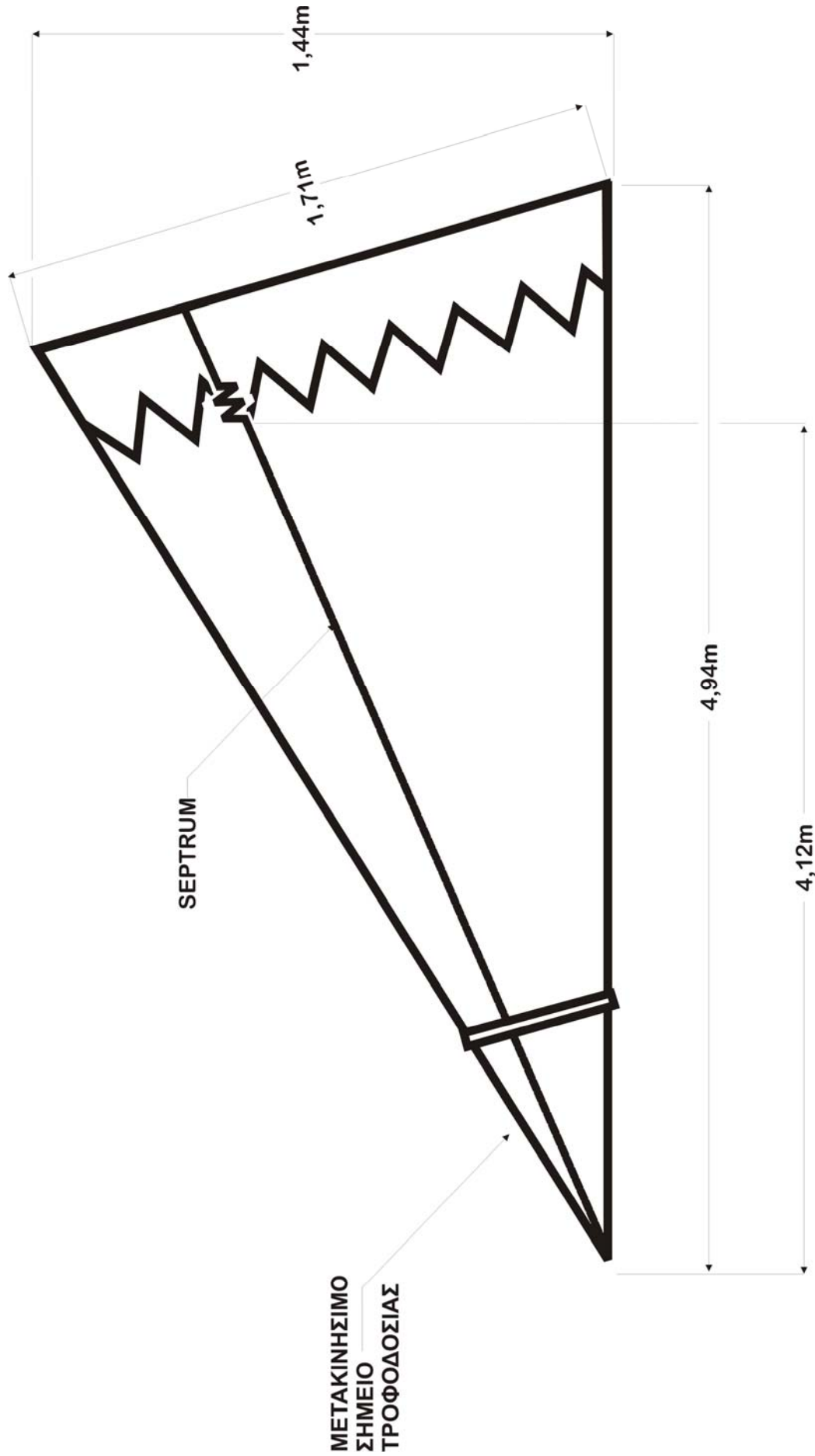
Επιλέγουμε να υλοποιήσουμε το τρίτο μοντέλο του GTEM cell με διαστάσεις που υπολογίστηκαν για $h_{\text{eut}}=0,30\text{m}$. Η επιλογή αυτή οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το ύψος των περισσότερων ηλεκτρονικών συσκευών του εμπορίου που είναι πιθανόν να τεθούν υπό εξέταση είναι της τάξης των 30 εκατοστών. Επιπλέον, το μήκος που πρέπει να έχει ένα τέτοιο GTEM cell δεν είναι απαγορευτικό για τις χωρικές δυνατότητες ενός εργαστηρίου, καθώς απαιτεί μόλις 72cm παραπάνω σε σχέση με το αμέσως προηγούμενο μοντέλο ($h_{\text{eut}}=0,25\text{m}$).

Στα πλαίσια της πρότασης αυτής επιλέγουμε και με ποιους απορροφητές θα τερματίσουμε το GTEM cell. Η επιλογή θα γίνει συγκρίνοντας τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Αυτά ήταν το EBB-600 της εταιρίας RFI, το C-RAM SFC 24 από την Cuming Microwave, τα δυο μοντέλα EHP-24 και FS-600 της ETS-LINDGREN και το FRANKO_{Sorb} P600 της εταιρίας FRANKONIA. Συγκρίνοντας τα δεδομένα τα οποία παρέχουν οι εταιρίες αυτές κρίνουμε ότι η σοφότερη επιλογή θα ήταν το μοντέλο EHP-24 που κατασκευάζεται από την εταιρία ETS-LINDGREN. Το FS-600 της ίδιας εταιρίας έχει αρκετά μικρότερο εύρος ζώνης ενώ το FRANKO_{Sorb} P600 έχει φτωχότερη απόκριση σε σχέση με την αντίστοιχη του

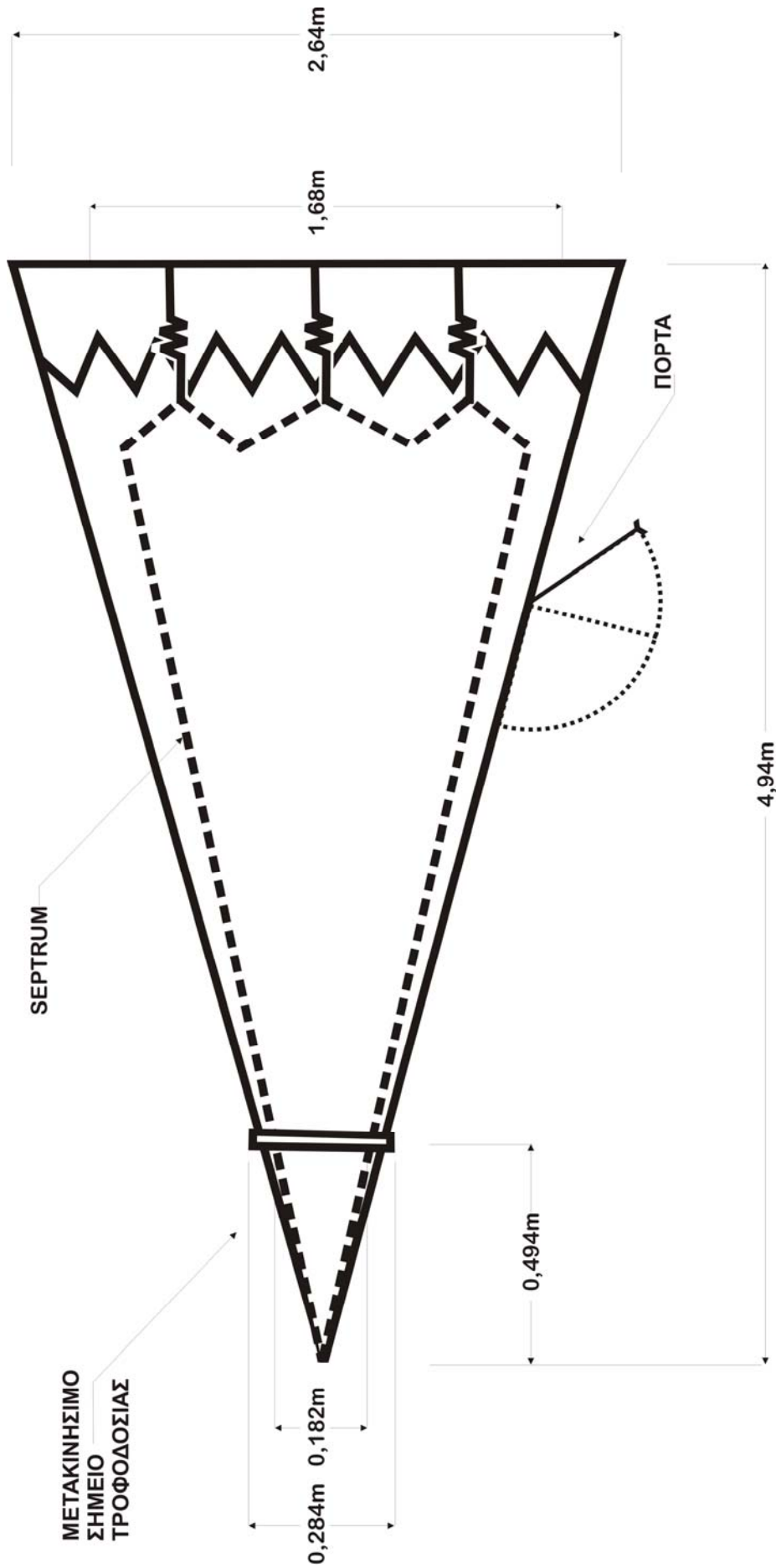
EHP-24. Συγκρινόμενο δε με το EBB-600 αλλά και το C-RAM SFC 24, παρατηρούμε ότι το EHP-24 έχει σημαντικά καλύτερη απόδοση στις χαμηλές συχνότητες. Βλέπουμε από τα data sheets ότι ακόμα και στην χειρότερη περίπτωση τα αποτελέσματα είναι σημαντικά καλύτερα πράγμα που κάνει την επιλογή του EHP-24 να φαίνεται η πιο εγγυημένη.

Στα μηχανολογικά σχέδια των σχημάτων 6.1 και 6.2 φαίνονται οι συνολικές διαστάσεις που πρέπει να χαρακτηρίζουν το GTEM cell. Με βάση αυτές η περιοχή εξέτασης προκύπτει να είναι ίση με:

74cm x 82cm x 30cm



Σχήμα 6.1: Μηχανολογικό σχέδιο της πλάγιας όψης του GTEM cell



Σχήμα 6.2: Μηχανολογικό σχέδιο της κάτοψης του GTEM cell

Βιβλιογραφία

- [1] C. Icheln "The construction and application of a GTEM cell" *Radio Laboratory of the Faculty of Electrical Engineering of the Technical University of Hamburg-Harburg, Helsinki University of Technology*, November 1995.
- [2] Mark T. MA, Motohisa Kanda, M.L. Crawford, E.B. Larsen "A Review of Electromagnetic Compatibility/Interference Measurement Methodologies" *Proceedings of the IEEE*, Vol. 73, No. 3, March 1985.
- [3] C.F. Bunting, K.J. Moeller, C.J. Reddy, S.A. Scarce "Finite Element Analysis of Reverberation Chambers: A Two-Dimensional Study at Cutoff".
- [4] M.L. Crawford "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells" *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* Vol. EMC-16, No.4, November 1974, σελίδες 189-195.
- [5] M.L. Crawford, J.L. Workman, C.L. Thomas "Expanding the Bandwidth of TEM cells for EMC measurements" *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* Vl. EMC-20, No.3, August 1978, σελίδες 368-375.
- [6] D. Konigstein, D. Hansen "A New Family of TEM-cells with Enlarged Bandwidth and Optimized Working Volume" *Proceedings of the 7th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility* Zurich, March 1987, σελίδες 127-132.
- [7] D. Hansen, P. Wilson, D. Konigstein, H. Schaer, "A broadband alternative EMC test chamber based on a TEM-cell anechoic-chamber hybrid concept" *Proceedings of the 1989 International on Electromagnetic Compatibility* (Nagoya) , September 1989, σελίδες 133-137.
- [8] "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 3: Radiated, Radio-Frequency, Electromagnetic Field Immunity Test", *International Standard CEI/IEC 1000-4-3*, Geneva, February 1995.
- [9] "Limits and Methods of Measurements of Radio Interference Characteristics of Information Technology Equipment", *International Electrotechnical Commission, International Special Committee on Radio Interference*, European standard EN 55 022, Brussels, June 1987.
- [10] M.L. Crawford, J.L. Workman, "Predicting free space radiated emissions from electronic equipment using TEM cell and open-field site measurements", *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*,

- Baltimore, 1980, σελίδες 80-85.
- [11] I.Sreenivasian, D.C. Chang, M.T. Ma, "Emission characteristics of electrically small radiating sources from tests inside a TEM cell", *IEEE Transaction on electromagnetic Compatibility* Vol. EMC-23, No.3, August 1981, σελίδες 113-121.
- [12] D.Hansen, D. Konigstein, "Vorrichtung zur EMI-Prufung elektronischer Gerate" *Patentschrift bei der Schweizerischen Eidgenossenschaft*, CH 670 174 A5, Mai 1989.
- [13] E. Yamashita, K. Atsuki "Strip line with rectangular outer conductor and three dielectric layers" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* Vol.18, No.5, May 1970, σελίδες 238-244.
- [14] R. De Leo, T. Rozzi, C. Svara, L. Zappelli, "Rigorous analysis of the Gtem cell", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* Vol.39, No.3, March 1991, σελίδες 488-499.
- [15] P.F. Wilson "Higher-order mode field distribution in asymmetric TEM cells" *International Symposium on EM Theory, URSI*, Stockholm, August 1989, σελίδες 108-110.
- [16] R. De Leo, L. Pierantoni, T. Rozzi, L. Zappelli, "Wideband analytical model of the GTEM cell termination", *Proceedings of the 11th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, March 1995, σελίδες 607-612.
- [17] T. Rozzi, R. De Leo, L. Pierantoni, G. Gerini, "A simplified analytical model of the termination of a GTEM cell", *Proceedings of the 1994 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Rome)*, September 1994, σελίδες 235-239.

