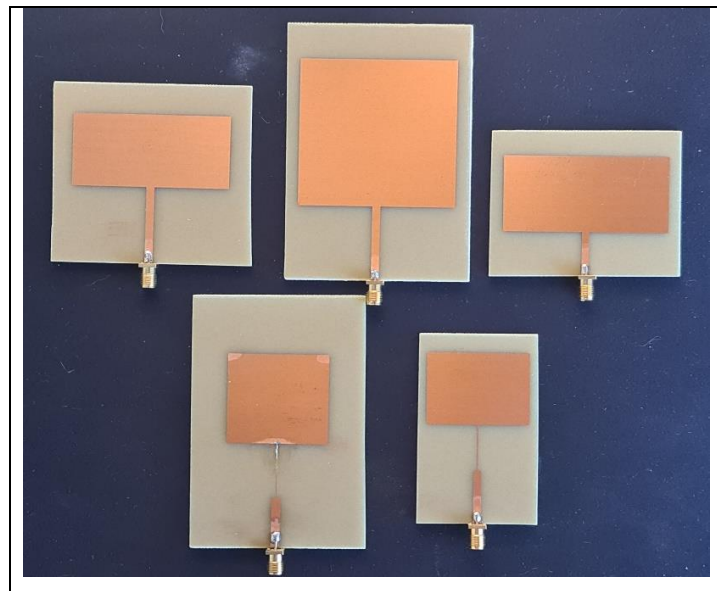


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση και σχεδίαση τυπωμένων ορθογωνικών
κεραιών»



Του φοιτητή
Μπαγδάτογλου Κωνσταντίνου
Αρ. Μητρώου: 515093

Επιβλέπων
Όνοματεπώνυμο : Ιωαννίδου
Μελίνα
Βαθμίδα : Αναπληρώτρια
Καθηγήτρια

Ημερομηνία 31/01/2023

Τίτλος Π.Ε.: Ανάλυση και σχεδίαση τυπωμένων ορθογωνικών κεραιών
Κωδικός Π.Ε.: 21111

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Μπαγδάτογλου Κωνσταντίνος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Ιωαννίδου Μελίνα

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε.: 13/05/2022

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε.: 31/01/2023

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μπαγδάτογλου Κωνσταντίνου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Στη σύγχρονη εποχή κεραιές συναντώνται στην καθημερινότητα μας σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών· από τις δορυφορικές κεραιές των τηλεοράσεων στις ταράτσες των πολυκατοικιών μέχρι και τις κεραιές Wi-Fi στα κινητά τηλέφωνα. Όλες αυτές οι κεραιές βοηθούν στην εξάπλωση της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ συσκευών και συστημάτων για την εξυπηρέτηση του ανθρώπου. Ένα είδος κεραιάς που χρησιμοποιείται ευρέως είναι οι τυπωμένες κεραιές μικροταινίας λόγω της διακριτικής εμφάνισής τους και της προσαρμογής τους σε ποικιλόμορφες επιφάνειες συστημάτων. Η συχνότητα λειτουργίας αυτών των κεραιών είναι ανάλογη με τις διαστάσεις τους. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να δοθεί μεγάλη σημασία στη σωστή σχεδίαση και κατασκευή αυτών των κεραιών καθώς χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, ιδιαίτερα στο φάσμα των υψηλών συχνοτήτων. Γι' αυτόν τον λόγο επέλεξα να εκπονήσω αυτή την εργασία και μπόρεσα να κατανοήσω σε μεγαλύτερο βαθμό τον τρόπο λειτουργίας των κεραιών μικροταινίας αλλά και τον τρόπο σχεδίασης που μπορεί να επηρεάσει την ομαλή λειτουργία τους.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετώνται και σχεδιάζονται τυπωμένες ορθογωνικές κεραίες για τη λειτουργία τους στη συχνότητα 2.4 GHz. Για την ανάλυση και τη σχεδίασή τους χρησιμοποιείται η διεθνής βιβλιογραφία περί κεραιών και συγκεκριμένα των κεραιών μικροταινίας. Μελετάται, συνοπτικά, ο τρόπος λειτουργίας δύο περιπτώσεων κεραιών μικροταινίας: (α) ορθογωνική κεραία με γραμμή μεταφοράς χωρίς προσαρμογή και (β) ορθογωνική κεραία με γραμμή μεταφοράς και παρεμβολή προσαρμοστικής διάταξης για την οποία επιλέγεται ένας μετασχηματιστής $\lambda/4$. Γίνονται όλοι οι θεωρητικοί υπολογισμοί για την εύρεση των ιδανικών διαστάσεων του ορθογώνιου τμήματος της κεραίας, της γραμμής τροφοδοσίας και (όταν υπάρχει) του μετασχηματιστή $\lambda/4$. Με τη βοήθεια του κατάλληλου πακέτου λογισμικού καθίσταται δυνατή η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση των διατάξεων της κεραίας που σχεδιάζεται θεωρητικά με στόχο τη δημιουργία layout κατάλληλων κεραιών που θα λειτουργούν αποτελεσματικά στη συχνότητα 2.4 GHz. Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας, συγκρίνονται για κάθε κεραία τα διαγράμματα απωλειών επιστροφής των σχηματικών (schematic) με αυτά των layout. Επίσης, υπολογίζονται μέσω του πακέτου λογισμικού, τα βασικά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραιών όπως το διάγραμμα ακτινοβολίας, η κατευθυντικότητα και το κέρδος. Τελικά, επιλέγονται κάποιες κεραίες με προοπτικές ορθής λειτουργίας και κατασκευάζονται με αποχάλκωση σε φωτοευαίσθητες πλακέτες FR-4 διπλής όψης. Η μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης αυτών των κεραιών μικροταινίας πραγματοποιείται μέσω του φασματικού αναλυτή του εργαστηρίου Ασύρματων Επικοινωνιών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΠΠΑΕ. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αρκετά ικανοποιητικά σε σχέση με αυτά της προσομοίωσης του layout από το πακέτο λογισμικού και καταδεικνύουν πόσο σημαντική είναι η λεπτομέρεια στην κατασκευή των τυπωμένων κεραιών μικροταινίας.

«Analysis and design of microstrip patch antennas»

«Bagdatoglou Konstantinos»

Abstract

In this thesis, rectangular microstrip patch antennas are studied and designed for operation at 2.4 GHz. For their analysis and design, the international literature on antennas, specifically microstrip antennas, is used. Two cases of microstrip antennas are studied: (a) a rectangular patch fed directly by a microstrip line and (b) a rectangular patch fed by a microstrip line and a quarter wave transformer in between; the latter is used for matching purposes. The theoretical calculations aim at finding the ideal dimensions of the antenna's parts, i.e., the length and width of the rectangular section, the feed line and (when present) the $\lambda/4$ transformer. By using the appropriate software package, it becomes possible to simulate and optimize the parameters of the (theoretically) designed antenna aiming at creating suitable patch layouts that work efficiently at 2.4 GHz. During this process, the return loss diagrams of the schematics are compared for each antenna with those of the layouts. Furthermore, the basic radiation characteristics of the antennas such as radiation pattern, directivity and gain are calculated through the software package. Finally, specific microstrip antennas with good performance prospects are selected and fabricated by stripping onto double-sided FR-4 photosensitive boards. The measurement of the reflection coefficient of these patches is conducted by using the spectrum analyzer of the Wireless Communications Laboratory of the Department of Information and Electronic Engineering of the International Hellenic University. A reasonable agreement is achieved between the measured and the simulated curves of the return loss. Moreover, the measured results demonstrate how important is the detail in fabricating microstrip patch antennas.

Ευχαριστίες

Για τη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια κ. Ιωαννίδου Μελίνα για την εξαιρετική υποστήριξη και επικοινωνία για την καθοδήγηση και την επίλυση αποριών μου. Επίσης, θα ήθελα να αναγνωρίσω την σημαντική βοήθεια των καθηγητών κ. Γιακουμή και κ. Χατζόπουλο στην υλοποίηση των κεραιών μικροταινίας. Επιπρόσθετα, πολύτιμη θεωρήθηκε και η συμβολή του καθηγητή κ. Σταυράκη Αδριανού στην βαθύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του λογισμικού Advanced Design System (ADS). Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους αγαπημένους μου γονείς για την συνεχή συναισθηματική υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Πινάκων.....	11
Συντομογραφίες.....	12
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	13
1.1 Γενικά.....	13
1.2 Δομή Εργασίας.....	13
Κεφάλαιο 2ο: Βασικές αρχές κεραιών	15
2.1 Ακτινοβολία κεραιάς.....	15
2.2 Περιοχές πεδίου.....	16
2.3 Ακτινοβολία μακρινού πεδίου.....	17
2.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας.....	18
2.4.1 Κατευθυντικότητα.....	20
2.4.2 Απόδοση κεραιάς και ακτινοβολίας.....	20
2.4.3 Κέρδος.....	21
2.5 Σύνθετη αντίσταση εισόδου κεραιάς.....	21
2.5.1 Προσαρμογή αντίστασης κεραιάς	22
2.5.2 Λόγος στάσιμου κύματος τάσης (VSWR)	23
2.5.3 Απώλειες επιστροφής (RL)	23
2.5.4 S-Παράμετροι.....	24
2.6 Εύρος ζώνης (Bandwidth – BW).....	25
Κεφάλαιο 3ο: Τυπωμένη κεραιά μικροταινίας.....	27
3.1 Ορισμός τυπωμένης κεραιάς μικροταινίας.....	27
3.2 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα	28
3.3 Μέθοδοι τροφοδοσίας	29
3.3.1 Γραμμή μικροταινίας.....	29
3.3.2 Ομοαξονική τροφοδοσία	30

3.3.3	Τροφοδοσία μέσω ανοίγματος	31
3.3.4	Τροφοδοσία μέσω γεινίασης.....	32
3.4	Ανάλυση λειτουργίας	32
3.5	Διάγραμμα ακτινοβολίας και κατευθυντικότητα	36
Κεφάλαιο 4ο:	Σχεδίαση τυπωμένης κεραίας μικροταινίας	38
4.1	Χαρακτηριστικά πλακέτας ορθογώνιας κεραίας μικροταινίας	38
4.2	Θεωρητικός σχεδιασμός ορθογώνιας κεραίας.....	38
4.3	Προσομοίωση ορθογώνιας κεραίας χωρίς βελτιστοποίηση	39
4.4	Βελτιστοποίηση ορθογώνιας κεραίας	45
4.5	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	46
4.5.1	Βελτιστοποιημένη κεραία #1	47
4.5.2	Βελτιστοποιημένη κεραία #2	50
4.5.3	Βελτιστοποιημένη κεραία #3	52
4.5.4	Βελτιστοποιημένη κεραία #4	55
4.5.5	Βελτιστοποιημένη κεραία #5	57
4.5.6	Βελτιστοποιημένη κεραία #6	59
4.6	Θεωρητική σχεδίαση ορθογώνιας κεραίας με χρήση προσαρμοστικής διάταξης.....	61
4.7	Προσομοίωση ορθογώνιας κεραίας με ΜΣ $\lambda/4$ χωρίς βελτιστοποίηση	62
4.8	Βελτιστοποίηση ορθογώνιας κεραίας με ΜΣ $\lambda/4$	65
4.9	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με ΜΣ $\lambda/4$	66
4.9.1	Βελτιστοποιημένη κεραία #8	67
4.9.2	Βελτιστοποιημένη κεραία #9	69
4.9.3	Βελτιστοποιημένη κεραία #10	71
Κεφάλαιο 5ο:	Κατασκευή και μέτρηση τυπωμένων ορθογωνικών κεραίων	75
5.1	Κατασκευή κεραίων και ρύθμιση φασματικού αναλυτή.....	75
5.2	Μετρήσεις κεραίων	77
5.2.1	Κεραία #1	77
5.2.2	Κεραία #2	78
5.2.3	Κεραία #3	79
5.2.4	Κεραία #9	80
5.2.5	Κεραία #10	81
Κεφάλαιο 6ο:	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....	83
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Κεραία ως συσκευή μετάδοσης	15
Σχήμα 2.2: Περιοχές πεδίου κεραίας.....	16
Σχήμα 2.3: Σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων δίπολου Hertz.....	17
Σχήμα 2.4: Γενική μορφή διαγράμματος ακτινοβολίας	19
Σχήμα 2.5: Κυκλωματικό ισοδύναμο κεραίας εκπομπής.....	22
Σχήμα 2.6: Μικροκυματικό δίκτυο N-θυρών.....	24
Σχήμα 2.7: Μέτρηση εύρους ζώνης από διάγραμμα RL.....	26
Σχήμα 3.1: Διάταξη τυπωμένης κεραίας μικροταινίας.....	27
Σχήμα 3.2: Σχήματα τυπωμένης κεραίας μικροταινίας.....	27
Σχήμα 3.3: Τροφοδοσία κεραίας με γραμμή μικροταινίας	29
Σχήμα 3.4: Μετασχηματιστής $\lambda/4$	30
Σχήμα 3.5: Ομοαξονική τροφοδοσία	31
Σχήμα 3.6: Τροφοδοσία μέσω ανοίγματος.....	31
Σχήμα 3.7: Τροφοδοσία μέσω γειτνίασης.....	32
Σχήμα 3.8: Γραμμή μικροταινίας.....	33
Σχήμα 3.9: Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου	33
Σχήμα 3.10: Ενεργός διηλεκτρική σταθερά.....	33
Σχήμα 3.11: Ορθογώνια κεραία μικροταινίας.....	34
Σχήμα 3.12: Κάτοψη ορθογώνιας κεραίας.....	35
Σχήμα 3.13: Πλαϊνή όψη ορθογώνιας κεραίας.....	35
Σχήμα 3.14: Τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας μιας ορθογώνιας κεραίας μικροταινίας.....	37
Σχήμα 4.1: Δημιουργία Workspace.....	39
Σχήμα 4.2: Δημιουργία σχηματικού.....	40
Σχήμα 4.3: Στοιχεία κεραίας μικροταινίας.....	40
Σχήμα 4.4: Σχηματικό κεραίας μικροταινίας	40
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα RL σχηματικού	41
Σχήμα 4.6: Layout κεραίας.....	41
Σχήμα 4.7: Διάταξη πλακέτας.....	42
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα RL μέσω Layout	42
Σχήμα 4.9: Far Field.....	43
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ακτινοβολίας.....	44
Σχήμα 4.11: Χαρακτηριστικά κεραίας.....	44
Σχήμα 4.12: Ιδιότητες GOAL	45
Σχήμα 4.13: Σχηματικό βελτιστοποίησης κεραίας.....	46
Σχήμα 4.14: Simulation Variables Setup.....	46
Σχήμα 4.15: Σχηματικό κεραίας #1.....	48
Σχήμα 4.16: Διάγραμμα RL σχηματικού	48
Σχήμα 4.17: Layout κεραίας #1.....	48
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα RL μέσω Layout	49
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #1.....	49
Σχήμα 4.20: Χαρακτηριστικά κεραίας #1	50

Σχήμα 4.21: Σχηματικό κεραίας #2.....	50
Σχήμα 4.22: Διάγραμμα RL σχηματικού	51
Σχήμα 4.23: Layout κεραίας #2.....	51
Σχήμα 4.24: Διάγραμμα RL μέσω Layout	51
Σχήμα 4.25: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #2.....	52
Σχήμα 4.26: Χαρακτηριστικά κεραίας #2	52
Σχήμα 4.27: Σχηματικό κεραίας #3.....	53
Σχήμα 4.28: Διάγραμμα RL σχηματικού	53
Σχήμα 4.29: Layout κεραίας #3.....	54
Σχήμα 4.30: Διάγραμμα RL μέσω Layout	54
Σχήμα 4.31: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #3.....	55
Σχήμα 4.32: Χαρακτηριστικά κεραίας #3	55
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα RL σχηματικού	56
Σχήμα 4.34: Διάγραμμα RL μέσω Layout	56
Σχήμα 4.35: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #4.....	57
Σχήμα 4.36: Χαρακτηριστικά κεραίας #4	57
Σχήμα 4.37: Διάγραμμα RL σχηματικού	58
Σχήμα 4.38: Διάγραμμα RL μέσω Layout	58
Σχήμα 4.39: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #5.....	59
Σχήμα 4.40: Χαρακτηριστικά κεραίας #5	59
Σχήμα 4.41: Διάγραμμα RL σχηματικού	60
Σχήμα 4.42: Διάγραμμα RL μέσω Layout	60
Σχήμα 4.43: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #6.....	61
Σχήμα 4.44: Χαρακτηριστικά κεραίας #6	61
Σχήμα 4.45: Στοιχεία κεραίας μικροταινίας με ΜΣ $\lambda/4$	62
Σχήμα 4.46: Σχηματικό κεραίας μικροταινίας με ΜΣ $\lambda/4$	63
Σχήμα 4.47: Διάγραμμα RL σχηματικού	63
Σχήμα 4.48: Layout κεραίας με ΜΣ $\lambda/4$	64
Σχήμα 4.49: Διάγραμμα RL μέσω Layout	64
Σχήμα 4.50: Διάγραμμα ακτινοβολίας με ΜΣ $\lambda/4$	65
Σχήμα 4.51: Χαρακτηριστικά κεραίας με ΜΣ $\lambda/4$	65
Σχήμα 4.52: Σχηματικό βελτιστοποίησης κεραίας με ΜΣ $\lambda/4$	66
Σχήμα 4.53: Simulation Variables Setup.....	66
Σχήμα 4.54: Διάγραμμα RL σχηματικού	67
Σχήμα 4.55: Διάγραμμα RL μέσω Layout	68
Σχήμα 4.56: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #8.....	68
Σχήμα 4.57: Χαρακτηριστικά κεραίας #8	69
Σχήμα 4.58: Σχηματικό κεραίας #9.....	69
Σχήμα 4.59: Διάγραμμα RL σχηματικού	70
Σχήμα 4.60: Layout κεραίας #9.....	70
Σχήμα 4.61: Διάγραμμα RL μέσω Layout	70
Σχήμα 4.62: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #9.....	71
Σχήμα 4.63: Χαρακτηριστικά κεραίας #9	71
Σχήμα 4.64: Σχηματικό κεραίας #10.....	72
Σχήμα 4.65: Διάγραμμα RL σχηματικού	72

Σχήμα 4.66: Layout κεραίας #10.....	72
Σχήμα 4.67: Διάγραμμα RL μέσω Layout	73
Σχήμα 4.68: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #10.....	73
Σχήμα 4.69: Χαρακτηριστικά κεραίας #10	74
Σχήμα 5.1: Θηλυκός κονέκτορας SMA.....	76
Σχήμα 5.2: Ορθογώνιες κεραίες μικροταινίας	76
Σχήμα 5.3: Τρόπος μέτρησης σε φασματικό αναλυτή	77
Σχήμα 5.4: Κεραία #1.....	77
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή	78
Σχήμα 5.6: Κεραία #2.....	78
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή	79
Σχήμα 5.8: Κεραία #3.....	79
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή	80
Σχήμα 5.10: Κεραία #9.....	80
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή	81
Σχήμα 5.12: Κεραία #10.....	81
Σχήμα 5.13: Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή	82

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας διαστάσεων κεραιών	47
Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας διαστάσεων κεραιών με ΜΣ $\lambda/4$	67
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας κεραιών προς κατασκευή	75

Συντομογραφίες

Π.Ε. Πτυχιακή Εργασία
ΔΙΠΑΕ Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Μια κεραία είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά κατευθυνόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για την ακτινοβολία τους σε ένα μέσο, συνήθως ελεύθερο χώρο, και αντίστροφα (δηλαδή είτε για λήψη). Σύμφωνα με τους τυπικούς ορισμούς για τις κεραίες του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE Std 145-1983), προσδιορίζει τον όρο κεραία ως «μέσο ακτινοβολίας ή λήψης ραδιοκυμάτων». Γενικά, υπάρχουν πάρα πολλοί τύποι κεραιών. Κύριο κριτήριο για την επιλογή είναι η εφαρμογή και η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας. Ένας από τους τύπους κεραιών είναι τυπωμένες κεραίες μικροταινίας. Οι κεραίες μικροταινίας παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα, όπως χαμηλό προφίλ, μικρό βάρος, εύκολη κατασκευή. Βέβαια, αυτές οι κεραίες έχουν και μειονεκτήματα όπως χαμηλή απόδοση, παρασιτική ακτινοβολία και πολύ στενό εύρος ζώνης συχνοτήτων [1],[2]. Οι τυπωμένες κεραίες μικροταινίας μπορούν να βρεθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται στην κινητή και δορυφορική επικοινωνία, σε συστήματα πλοήγησης (GPS), radar και τηλεϊατρικής. Ωστόσο, τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια, οι τυπωμένες κεραίες μικροταινίας θεωρούνται από τις ταχέως αναπτυσσόμενες δομές στον τομέα των κεραιών που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη του δικτύου Wi-Fi (2.4 GHz και 5 GHz). Γι' αυτό οι κεραίες μικροταινίας (patch antennas) έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας και έχουν δημοσιευτεί πολυάριθμα άρθρα και βιβλία σχετικά με αυτές [1-9]. Ως αποτέλεσμα, οι κεραίες αυτές έχουν εξελιχθεί γρήγορα από μια εκπαιδευτική καινοτομία σε μια επιχειρηματική πραγματικότητα, με κατασκευές σε διάφορες ζώνες μικροκυμάτων.

1.2 Δομή Εργασίας

Ο σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η σχεδίαση τυπωμένων ορθογωνικών κεραιών ώστε να λειτουργούν στη συχνότητα 2.4 GHz, η προσομοίωση τους με το λογισμικό Advanced Design System (ADS) καθώς και η υλοποίησή τους.

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βασικές λειτουργίες που διέπουν μια κεραία γενικά, ενώ στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η διάταξη και η ανάλυση μιας τυπωμένης κεραίας μικροταινίας καθώς και οι μέθοδοι τροφοδοσίας της. Ωστόσο, δεν επιχειρείται μια εκτενής παρουσίαση όλων των χαρακτηριστικών των κεραιών και των τυπωμένων κεραιών μικροταινίας καθώς αυτή υπάρχει σε πληθώρα συγγραμμάτων της βιβλιογραφίας.

Στο 3^ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται συνοπτικά η διάταξη και η ανάλυση μιας τυπωμένης κεραίας μικροταινίας καθώς και οι μέθοδοι τροφοδοσίας της.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, υπολογίζονται θεωρητικά, με χρήση ημι-εμπειρικών σχέσεων από τη διεθνή βιβλιογραφία, οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά μεγέθη δύο περιπτώσεων τυπωμένης ορθογωνικής κεραίας: (α) κεραία με γραμμή μεταφοράς χωρίς προσαρμογή και (β) κεραία με γραμμή μεταφοράς και παρεμβολή προσαρμοστικής διάταξης για την οποία επιλέχθηκε ένας μετασχηματιστής $\lambda/4$. Και στις δύο περιπτώσεις περιγράφεται βήμα προς βήμα η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση των κεραιών μέσω του λογισμικού ADS και αναλύονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών από το πακέτο λογισμικού.

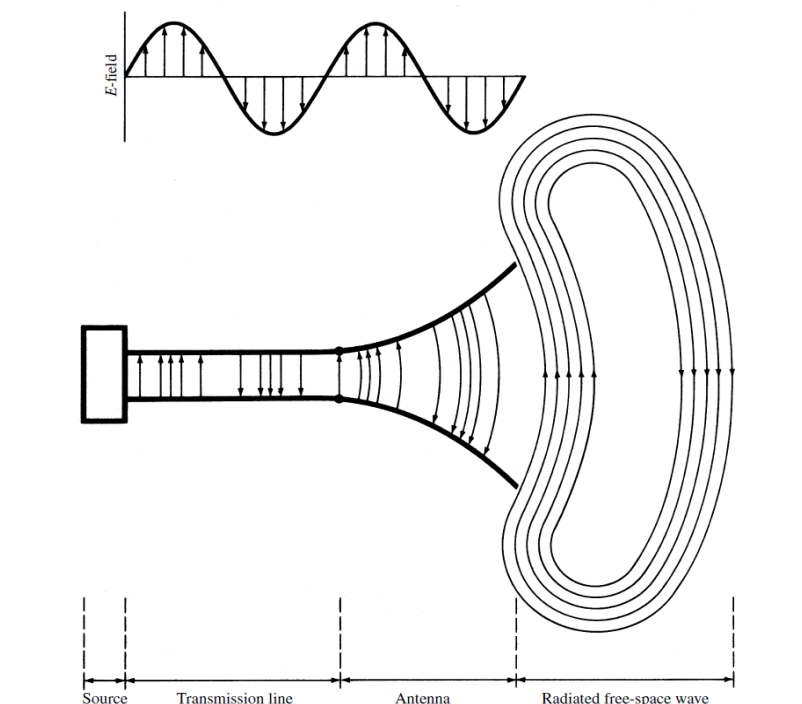
Στο 5^ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο τρόπος υλοποίησης τυπωμένων ορθογωνικών κεραιών σε φωτοευαίσθητη πλακέτα FR-4, η κατασκευή ορισμένων κεραιών μετά την βελτιστοποίηση με το ADS, η μέτρησή τους μέσω του φασματικού αναλυτή του εργαστηρίου και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνων της προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 2ο: Βασικές αρχές κεραιών

2.1 Ακτινοβολία κεραίας

Για την ανάλυση του τρόπου ακτινοβολίας μιας κεραίας, αποτελεί προϋπόθεση η κατανόηση του τρόπου εμφάνισης της ακτινοβολίας. Ένα αγώγιμο σύρμα ακτινοβολεί κυρίως εξαιτίας του χρονικά μεταβαλλόμενου ρεύματος ή εξαιτίας της επιτάχυνσης-επιβράδυνσης φορτίων. Αν δεν υπάρχει κίνηση φορτίων μέσα σε ένα σύρμα ή καλώδιο, δεν εκπέμπεται ακτινοβολία, εφόσον δεν υπάρχει ροή ρεύματος. Η ακτινοβολία δεν θα παρουσιαστεί ακόμη και αν τα φορτία κινούνται με ομοιόμορφη ταχύτητα κατά μήκος ενός ευθύγραμμου σύρματος. Παρόλα αυτά, φορτία που κινούνται με ομοιόμορφη ταχύτητα κατά μήκος ενός κυρτού ή λυγισμένου σύρματος θα έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ακτινοβολίας. Αν το φορτίο ταλαντώνεται με τον χρόνο, τότε εμφανίζεται ακτινοβολία ακόμη και κατά μήκος ενός ευθύγραμμου σύρματος [2].

Η ακτινοβολία από μια κεραία μπορεί να εξηγηθεί με την βοήθεια του σχήματος 2.1 το οποίο δείχνει μια πηγή τάσης συνδεδεμένη σε μια γραμμή μεταφοράς δύο αγωγών. Όταν μια τάση ημιτονοειδούς μορφής εφαρμοστεί κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο που είναι ημιτονοειδούς φύσης και αυτό έχει ως συνέπεια την δημιουργία ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών οι οποίες εφάπτονται στο ηλεκτρικό πεδίο. Το μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου υποδεικνύεται από την συσσώρευση των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στους αγωγούς μετατοπίζονται αναγκαστικά από τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές και η κίνηση αυτών των φορτίων προκαλεί τη ροή του ρεύματος που με τη σειρά του οδηγεί στη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου.



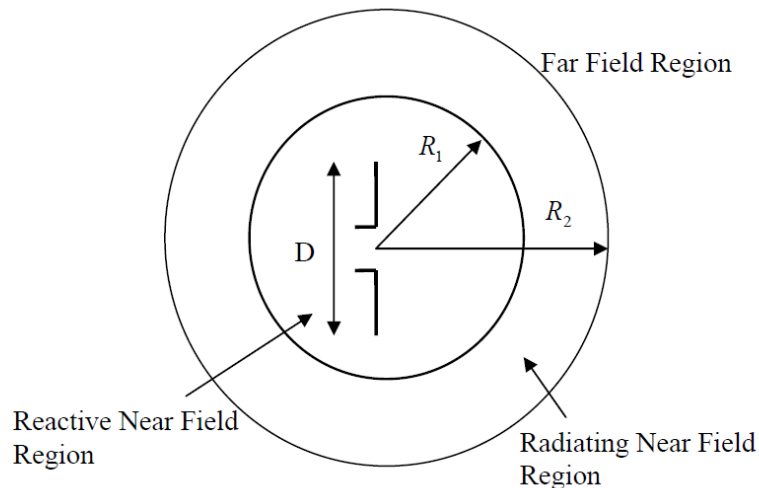
Σχήμα 2.1 Κεραία ως συσκευή μετάδοσης [2]

Λόγω των χρονικών διακυμάνσεων των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται και αυτά οδηγούνται ανάμεσα στους αγωγούς. Καθώς αυτά τα κύματα πλησιάζουν τον ανοιχτό χώρο, κύματα ελεύθερου χώρου σχηματίζονται μέσω της σύνδεσης των

ανοιχτών άκρων των ηλεκτρικών γραμμών. Εφόσον η ημιτονοειδής πηγή δημιουργεί συνεχώς ηλεκτρική διαταραχή, ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται συνεχώς και αυτά μεταδίδονται μέσω της γραμμής μεταφοράς, μέσω της κεραίας και εκπέμπουν ακτινοβολία στον ελεύθερο χώρο. Μέσα στη γραμμή μεταφοράς και στην κεραία, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διατηρούνται λόγω των φορτίων, αλλά από την στιγμή που εισάγονται στον ελεύθερο χώρο, σχηματίζουν κλειστούς βρόχους και ακτινοβολούνται [2].

2.2 Περιοχές πεδίου

Τα διαγράμματα πεδίου που σχετίζονται με μια κεραία αλλάζουν ανάλογα με την απόσταση και σχετίζονται με δύο τύπους ενέργειας: την ακτινοβολούμενη ενέργεια και την μη ακτινοβολούμενη ενέργεια. Κατά συνέπεια, ο χώρος ο οποίος περιβάλλει μια κεραία μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές [2].



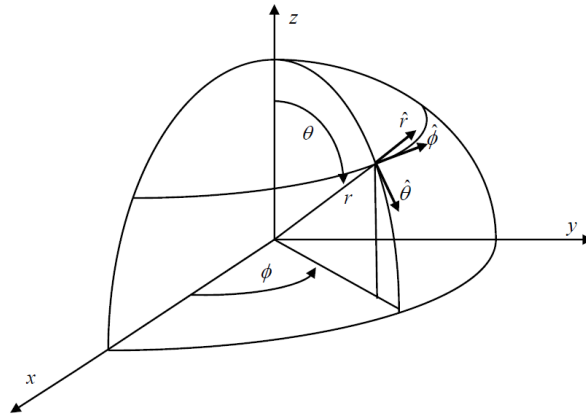
Σχήμα 2.2 Περιοχές πεδίου κεραίας [2]

Οι τρεις περιοχές, όπως φαίνονται από το σχήμα 2.2, είναι οι εξής:

1. Κοντινή περιοχή (reactive near field region): Σε αυτήν την περιοχή, επικρατεί το μη ακτινοβολούμενο πεδίο. Αυτή η μη ακτινοβολούμενη ενέργεια ταλαντώνεται προς και μακριά από την κεραία με αποτέλεσμα την εμφάνισή της ως αντίδραση. Σε αυτή την περιοχή, η ενέργεια αποθηκεύεται μόνο και δεν διαχέεται. Το μέγιστο όριο για αυτή την περιοχή βρίσκεται σε απόσταση $R_1 = 0.062\sqrt{D^3/\lambda}$ όπου R_1 είναι η απόσταση από την επιφάνεια της κεραίας, D είναι η μέγιστη διάσταση της κεραίας και λ είναι το μήκος κύματος.
2. Περιοχή Fresnel (radiating near field region): Αυτή η περιοχή βρίσκεται ανάμεσα στην μη ακτινοβολούμενη κοντινή περιοχή και στην μακρινή περιοχή. Στην συγκεκριμένη περιοχή, τα μη ακτινοβολούμενα πεδία είναι μικρότερα και τα ακτινοβολούμενα κυριαρχούν. Επίσης, η κατανομή του γωνιακού πεδίου είναι σε συνάρτηση με την απόσταση της κεραίας. Το μέγιστο όριο αυτής της περιοχής είναι ίσο με $R_2 = 2D^2/\lambda$ όπου R_2 είναι η απόσταση από την επιφάνεια της κεραίας.

3. Μακρινή περιοχή (ή πεδίο ακτινοβολίας): Η μακρινή περιοχή βρίσκεται πέρα από την απόσταση $R_2 = 2D^2/\lambda$. Σε αυτή την περιοχή, τα μη ακτινοβολούμενα πεδία είναι ανύπαρκτα και υπάρχουν μόνο πεδία ακτινοβολίας. Η κατανομή του γωνιακού πεδίου δεν εξαρτάται από την απόσταση από την κεραία σε αυτήν την περιοχή και η πυκνότητα ισχύος ποικίλλει ανάλογα με το αντίστροφο τετράγωνο της ακτινικής απόστασης σε αυτήν την περιοχή.

2.3 Ακτινοβολία μακρινού πεδίου



Σχήμα 2.3 Σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων δίπολου Hertz [2]

Η ακτινοβολία μακρινού πεδίου από ένα δίπολο Hertz μπορεί να εξηγηθεί με την βοήθεια του σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων όπως δείχνει το σχήμα 2.3. Ο άξονας z θεωρείται η κατακόρυφη διεύθυνση και το επίπεδο xy είναι οριζόντιο. Η γωνία θ υποδηλώνει τη γωνία ανύψωσης και η γωνία ϕ την αζιμούθια γωνία. Το επίπεδο xz είναι το επίπεδο ανύψωσης (όπου η γωνία ϕ ισούται με 0 μοίρες) ή το E-επίπεδο το οποίο περιλαμβάνει το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου και την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Το επίπεδο xy είναι το αζιμουθιακό επίπεδο (όπου η γωνία θ ισούται με $\pi/2$) ή το H-επίπεδο το οποίο περιλαμβάνει το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου και την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας [2].

Συγκεκριμένα, ένα δίπολο Hertz είναι ένα κομμάτι ευθύγραμμου σύρματος του οποίου το μήκος L και η διάμετρος του είναι και τα δύο πολύ μικρά σε σύγκριση με ένα μήκος κύματος. Ένα ομοιόμορφο ρεύμα $I(0)$ θεωρείται ότι ρέει κατά μήκος του. Γενικά, αν αυτό το δίπολο είναι τοποθετημένο στην αρχή κατά μήκος του άξονα z, τότε μπορούμε να γράψουμε [2]:

$$E_{\theta} = jZ \frac{kI(0)L e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] \quad (2.1)$$

$$E_r = Z \frac{I(0)L e^{-jkr} \cos \theta}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] \quad (2.2)$$

$$H_{\phi} = j \frac{kI(0)L e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] \quad (2.3)$$

$$H_r = 0 \quad (2.4)$$

$$H_\theta = 0 \quad (2.5)$$

$$E_\varphi = 0 \quad (2.6)$$

Όσον αφορά την ακτινοβολία μακρινού πεδίου, οι όροι r^2 και r^3 μπορούν να αγνοηθούν. Οπότε οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να τροποποιηθούν ως εξής:

$$E_\theta = jZ \frac{kI(0)Le^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \quad (2.7)$$

$$H_\varphi = j \frac{kI(0)Le^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \quad (2.8)$$

$$E_r = 0 \quad (2.9)$$

όπου $Z =$ χαρακτηριστική αντίσταση ελεύθερου χώρου

$k = 2\pi / \lambda =$ σταθερά διάδοσης κύματος

$r =$ ακτίνα για το σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων

Σε όλες τις παραπάνω σχέσεις, ο φασικός όρος $e^{j\omega t}$ έχει απορριφθεί και υποτίθεται ότι όλα τα πεδία μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο. Όπως γίνεται αντιληπτό από τις προηγούμενες σχέσεις, τα μη μηδενικά πεδία είναι τα E_θ και H_φ τα οποία είναι εγκάρσια μεταξύ τους. Η αναλογία $\frac{E_\theta}{H_\varphi} = Z$, έτσι ώστε η χαρακτηριστική αντίσταση Z να είναι 120π (ή 377Ω) και τα πεδία να είναι σε φάση και αντιστρόφως ανάλογα με την ακτίνα r . Οι κατευθύνσεις των E , H και r είναι τέτοιες έτσι ώστε η πυκνότητα ισχύος (ή διάνυσμα Poynting) να είναι στην κατεύθυνση r και να δείχνει την κατεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Ως εκ τούτου, η πυκνότητα ισχύος που δίνεται από το [2] μπορεί να γραφτεί ως:

$$P_r \hat{r} = \frac{|E_\theta|^2}{2Z} \hat{r} = \frac{Z}{2} \cdot |H_\varphi|^2 \hat{r} \quad (\text{Watts/m}^2) \quad (2.10)$$

Η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς που εκπέμπεται από μια κεραία ισούται με:

$$W_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P_r ds \quad (\text{Watts}) \quad (2.11)$$

όπου ds είναι η στοιχειώδης επιφάνεια σφαίρας και ισούται με $r^2 \sin\theta d\theta d\varphi$

Η ένταση ακτινοβολίας ορίζεται ως η ισχύς που εκπέμπεται από μια κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας και δίνεται ως:

$$U = r^2 P_r \quad (\text{W/sr}) \quad (2.12)$$

2.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας είναι μια γραφική παράσταση των ιδιοτήτων της ακτινοβολίας μακρινού πεδίου μιας κεραίας ως συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων που καθορίζονται από την γωνία ανύψωσης θ και την αζιμούθια γωνία φ . Συγκεκριμένα, είναι μια γραφική

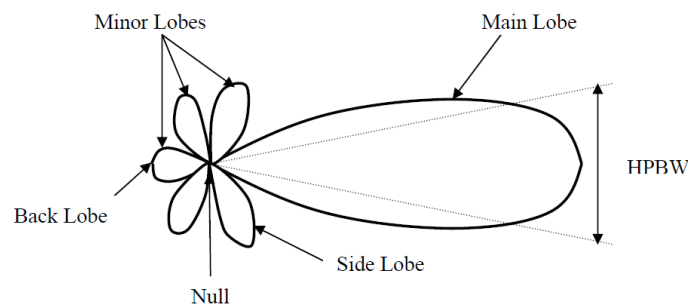
παράσταση της εκπεμπόμενης ισχύος ανά μονάδα στερεάς γωνίας που δεν είναι παρά η ένταση της ακτινοβολίας [2]. Για την καλύτερη κατανόηση του διαγράμματος ακτινοβολίας, ας αναλύσουμε την περίπτωση μιας ισότροπης κεραίας. Ισοτροπική κεραία είναι αυτή που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις χωρίς απώλειες. Εάν η συνολικής ισχύος εκπέμπεται από την ισότροπική κεραία είναι W_i , τότε η ισχύς κατανέμεται σε μια σφαίρα ακτίνας r , έτσι ώστε η πυκνότητα ισχύος P_i σε αυτή την απόσταση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση να δίνεται ως:

$$P_i = \frac{W_i}{4\pi r^2} \quad (2.13)$$

Τότε η ένταση ακτινοβολίας για αυτήν την ισότροπική κεραία U_i μπορεί να γραφτεί ως:

$$U_i = r^2 P_i = \frac{W_i}{4\pi} \quad (2.14)$$

Μια ισότροπική κεραία δεν είναι δυνατό να υλοποιηθεί στην πράξη και είναι χρήσιμη μόνο για λόγους σύγκρισης. Ένας πιο πρακτικός τύπος κεραίας είναι η κατευθυντική κεραία που εκπέμπει περισσότερη ισχύ σε ορισμένες κατευθύνσεις και λιγότερη ισχύ σε άλλες κατευθύνσεις. Μια ειδική περίπτωση της κατευθυντικής κεραίας είναι η ομοιοκατευθυντική κεραία της οποίας το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να είναι κύκλος σε ένα επίπεδο (πχ Ε-επίπεδο) και να διαφέρει σε ένα ορθογώνιο επίπεδο (πχ Η-επίπεδο). Η γραφική παράσταση μιας γενικής κατευθυντικής κεραίας φαίνεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Γενική μορφή διαγράμματος ακτινοβολίας

Το σχήμα 2.4 δείχνει τα ακόλουθα:

- **Γωνιακό εύρος μισής ισχύος (HPBW):** η γωνία μεταξύ των δύο σημείων εκατέρωθεν της δέσμης στα οποία η ένταση ακτινοβολίας είναι η μισή της μέγιστης, σε ένα επίπεδο που περιέχει τη διεύθυνση του μεγίστου της δέσμης.
- **Κεντρικός λοβός:** Αυτός είναι ο λοβός ακτινοβολίας που περιέχει την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας.
- **Δευτερεύον λοβός:** Όλοι οι λοβοί εκτός από τον κύριο λοβό ονομάζονται δευτερεύοντες λοβοί. Αυτοί οι λοβοί αντιπροσωπεύουν την ακτινοβολία σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Το επίπεδο των δευτερευόντων λοβών εκφράζεται συνήθως ως αναλογία της πυκνότητας ισχύος στον εν λόγω λοβό προς αυτή του κύριου λοβού. Αυτή η αναλογία ονομάζεται επίπεδο πλευρικού λοβού SLL (εκφράζεται σε dB)
- **Οπίσθιος λοβός:** Αυτός είναι ο δευτερεύον λοβός διαμετρικά αντίθετος του κύριου λοβού.
- **Πλευρικοί λοβοί:** Αυτοί οι δευτερεύοντες λοβοί δίπλα στον κύριο λοβό και χωρίζονται με μηδενισμούς.

Στα περισσότερα ασύρματα συστήματα, οι δευτερεύοντες λοβοί είναι ανεπιθύμητοι, Ως εκ τούτου, ένας καλός σχεδιασμός κεραίας θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τους δευτερεύοντες λοβούς.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας καθορίζεται από κάποια κύρια χαρακτηριστικά της κεραίας. Αυτά είναι η κατευθυντικότητα, η απόδοση ακτινοβολίας και το κέρδος.

2.4.1 Κατευθυντικότητα

Η κατευθυντικότητα μιας κεραίας ορίζεται ως «ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε μια δεδομένη κατεύθυνση από την κεραία προς την ένταση ακτινοβολίας που υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε όλες τις κατευθύνσεις» [2]. Με άλλα λόγια, η κατευθυντικότητα μιας μη ιστροπικής πηγής είναι ίση με την αναλογία της έντασης της ακτινοβολίας της σε μια δεδομένη κατεύθυνση, έναντι αυτής μιας ιστροπικής πηγής.

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{W_i} \quad (2.15)$$

όπου D είναι η κατευθυντικότητα της κεραίας

U είναι η ένταση ακτινοβολίας της κεραίας (W/μονάδα στερεάς γωνίας)

U_i είναι η ένταση ακτινοβολίας μιας ιστροπικής πηγής (W/μονάδα στερεάς γωνίας)

W_i είναι η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς (W)

Μερικές φορές, όμως, η κατεύθυνση της κατευθυντικότητας δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Σε αυτή την περίπτωση, η κατεύθυνση της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας υπονοείται και η μέγιστη κατευθυντικότητα υπολογίζεται ως εξής [2]:

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{max}}{W_i} \quad (2.16)$$

όπου D_{max} είναι η μέγιστη κατευθυντικότητα

U_{max} είναι η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας

Η κατευθυντικότητα είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, αφού είναι ο λόγος δύο εντάσεων ακτινοβολίας. Ως εκ τούτου, εκφράζεται γενικά σε dBi. Η κατευθυντικότητα μιας κεραίας μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί από το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Μια κεραία που έχει στενό κύριο λοβό θα έχει μεγαλύτερη κατευθυντικότητα από μια άλλη κεραία με ευρύ κύριο λοβό. Επομένως, θα είναι πιο κατευθυντική.

2.4.2 Απόδοση κεραίας και ακτινοβολίας

Η απόδοση της κεραίας είναι μια παράμετρος που λαμβάνει υπόψη το ποσό των απωλειών στους ακροδέκτες της κεραίας και εντός της δομής της κεραίας. Αυτές οι απώλειες μπορεί να είναι [2]:

- Αντανakλάσεις λόγω μη προσαρμογής μεταξύ πομπού και κεραίας
- Απώλειες I^2R (αγωγιμότητα και διηλεκτρικότητα)

Επομένως, η συνολική απόδοση της κεραίας μπορεί να γραφτεί ως:

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.17)$$

όπου e_t = η συνολική αποδοτικότητα της κεραίας

e_r = η απόδοση ανάκλασης

e_c = η απόδοση αγωγιμότητας

e_d = η διηλεκτρική απόδοση

Εφόσον οι παράγοντες e_c και e_d είναι δύσκολο να διαχωριστούν, συγκεντρώνονται για να σχηματίσουν την απόδοση e_{cd} που δίνεται ως εξής:

$$e_{cd} = e_c e_d \quad (2.18)$$

όπου e_{cd} ονομάζεται η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας.

2.4.3 Κέρδος

Το κέρδος μιας κεραίας είναι μια σημαντική παράμετρος που μπορεί να μας βοηθήσει να βρούμε την συνολική ισχύ εκπομπής της κεραίας. Το κέρδος ορίζεται ως ο λόγος της έντασης της ακτινοβολίας σε μια δεδομένη κατεύθυνση από την κεραία προς την συνολική ισχύ εισόδου που δέχεται η κεραία διαιρεμένη με 4π [3]. Εάν η κατεύθυνση δεν καθορίζεται, υπονοείται η κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Το κέρδος της κεραίας (χωρίς διάσταση) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$G = \frac{4\pi U}{W_{in}} \quad (2.19)$$

οπού U είναι η ένταση ακτινοβολίας και

W_{in} είναι η συνολική ισχύς εισόδου της κεραίας

Η συνάρτηση κέρδους της κεραίας είναι μια παράμετρος που σχετίζεται στενά με την συνάρτηση κατευθυντικότητας της κεραίας. Γνωρίζουμε ότι η συνάρτηση κατευθυντικότητας είναι το κατά πόσο μια κεραία συγκεντρώνει ενέργεια προς μια κατεύθυνση, έναντι της ακτινοβολίας προς άλλες κατευθύνσεις. Επομένως, εάν η κεραία είναι 100% αποδοτική, τότε η κατευθυντικότητα θα είναι ίση με το κέρδος της κεραίας και η κεραία θα είναι ισοτροπική. Επίσης, η συνάρτηση κέρδους σχετίζεται πάντα με τον κύριο λοβό του διαγράμματος ακτινοβολίας. Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση κέρδους δίνεται ως εξής:

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd} D(\theta, \varphi) \text{ (dBi)} \quad (2.20)$$

2.5 Σύνθετη αντίσταση εισόδου κεραίας

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου μιας κεραίας ορίζεται ως «η σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζεται από μια κεραία στους ακροδέκτες της ή ο λόγος της τάσης προς το ρεύμα στο ζεύγος ακροδεκτών ή ο λόγος των κατάλληλων στοιχείων των ηλεκτρικών προς των μαγνητικών πεδίων σε ένα σημείο» [2]. Επομένως η σύνθετη αντίσταση της κεραίας μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.21)$$

όπου Z_{in} είναι η σύνθετη αντίσταση εισόδου

R_{in} είναι η ωμική αντίσταση εισόδου

X_{in} είναι η χωρητική αντίσταση εισόδου

Το φανταστικό μέρος, X_{in} της σύνθετης αντίστασης εισόδου αντιπροσωπεύει την ισχύ που είναι αποθηκευμένη στο κοντινό πεδίο της κεραίας. Το ωμικό μέρος R_{in} της σύνθετης αντίστασης εισόδου αποτελείται από δύο στοιχεία, την αντίσταση ακτινοβολίας R_r και την αντίσταση απώλειας R_L . Η ισχύς που σχετίζεται με την αντίσταση ακτινοβολίας είναι η ισχύς που ακτινοβολείται στην πραγματικότητα από την κεραία, ενώ η ισχύς που διαχέεται στην αντίσταση απώλειας χάνεται ως θερμότητα στην ίδια την κεραία λόγω διηλεκτρικών ή αγωγικών απωλειών.

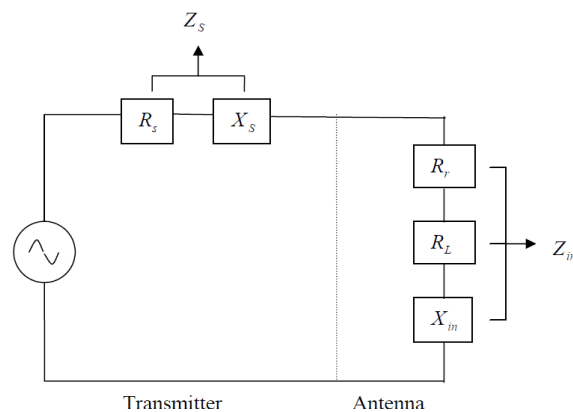
2.5.1 Προσαρμογή αντίστασης κεραίας

Για την αποτελεσματική λειτουργία της κεραίας, πρέπει να πραγματοποιείται μέγιστη μεταφορά ισχύος μεταξύ του πομπού και της κεραίας. Η μέγιστη μεταφορά ισχύος από τον πομπό στην κεραία υπάρχει όταν η σύνθετη αντίσταση της κεραίας Z_{in} είναι ίση αυτή του πομπού Z_S . Σύμφωνα με το θεώρημα της μέγιστης μεταφοράς ισχύος, η μέγιστη ισχύς από τον πομπό προς την κεραία μπορεί να υπάρξει αν η σύνθετη αντίσταση της κεραίας ισούται με τον συζυγή μιγαδικό της σύνθετης αντίστασης του πομπού και αντίστροφα. Επομένως, η προϋπόθεση για προσαρμογή σε αυτές τις δύο αντιστάσεις είναι:

$$Z_{in} = Z_S^* \quad (2.22)$$

όπου $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$

$Z_S = R_S + jX_S$ όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5



Σχήμα 2.5 Κυκλωματικό ισοδύναμο κεραίας εκπομπής

Η προσαρμογή σύνθετης αντίστασης κεραίας Z_{in} είναι ένα δύσκολο βήμα στο σχεδιασμό της κεραίας για την επίτευξη βέλτιστων παραμέτρων απόδοσης, όπως απώλειες επιστροφής, απόδοση, κέρδος. Η προσαρμογή σύνθετης αντίστασης βοηθά επίσης στον συντονισμό της συχνότητας της κεραίας με πολύ ευκολότερο και ταχύτερο τρόπο από την τροποποίηση της γεωμετρίας της κεραίας. Επιπλέον, η σωστή προσαρμογή βελτιώνει το εύρος ζώνης της κεραίας, επειδή τα κυκλώματα αντιστοίχισης αντίστασης προσθέτουν μερικούς επιπλέον συντονισμούς. Συνήθως, η σύνθετη αντίσταση της κεραίας αντιστοιχεί σε γραμμή τροφοδοσίας 50Ω λόγω του γεγονότος ότι σχεδόν όλες οι πηγές και γραμμές μικροκυμάτων κατασκευάζονται με χαρακτηριστική σύνθεση αντίσταση 50Ω .

2.5.2 Λόγος στάσιμου κύματος τάσης (VSWR)

Όταν η συνθήκη για σωστή προσαρμογή αντίστασης κεραίας με γραμμή τροφοδοσίας δεν ισχύει, τότε ένα μέρος της ισχύος μπορεί να ανακλάται προς τα πίσω και αυτό οδηγεί στη δημιουργία στάσιμων κυμάτων, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν από μια παράμετρο που ονομάζεται λόγος στάσιμου κύματος τάσης (VSWR). Τα στάσιμα κύματα οδηγούν στην αποθήκευση ισχύος αντί να τη μεταδίδουν στο φορτίο. Τα στάσιμα κύματα μπορεί να καταστρέψουν και να υπερθερμάνουν την συσκευή RF λόγω αυξημένου επιπέδου ισχύος.

Ο λόγος VSWR δίνεται από τη σχέση [4]:

$$P = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.23)$$

$$\Gamma = \frac{V_o^-}{V_o^+} = \frac{Z_{in} - Z_S}{Z_{in} + Z_S} \quad (2.24)$$

όπου Γ είναι ο συντελεστής ανάκλασης

V_o^- είναι το πλάτος της τάσης του ανακλώμενου κύματος

V_o^+ είναι το πλάτος της τάσης του προσπίπτοντος κύματος

Ο λόγος VSWR είναι βασικά ένα μέτρο της προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης μεταξύ πομπού και κεραίας. Όσο υψηλότερος είναι αυτός ο λόγος, τόσο μικρότερη είναι η προσαρμογή. Η τέλεια προσαρμογή επιτυγχάνεται όταν ο λόγος VSWR ισούται με μονάδα.

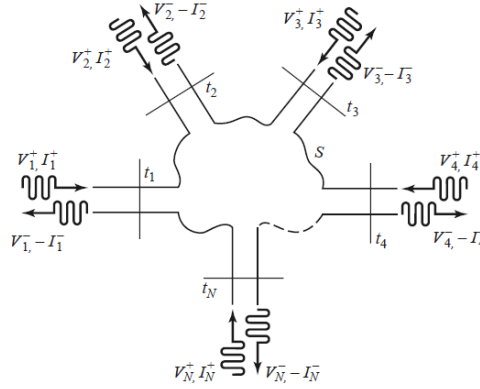
2.5.3 Απώλειες επιστροφής (RL)

Οι απώλειες επιστροφής είναι μια παράμετρος που υποδεικνύει την ποσότητα ισχύος που «χάνεται» στο φορτίο και δεν επιστρέφει ως ανάκλαση. Όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα κύματα ανακλώνται οδηγώντας στο σχηματισμό στάσιμων κυμάτων, όταν ο πομπός και η αντίσταση της κεραίας δεν ταιριάζουν. Ως εκ τούτου, ο παράγοντας RL είναι μια παράμετρος παρόμοια με τον λόγο VSWR για να δείξει πόσο καλά έχει γίνει η προσαρμογή μεταξύ του πομπού και της κεραίας. Οι απώλειες επιστροφής υπολογίζονται ως εξής [4]:

$$RL = 20 \log_{10} |\Gamma| \quad (\text{dB}) \quad (2.25)$$

Για τέλεια προσαρμογή μεταξύ πομπού και κεραίας, αν ο συντελεστής ανάκλασης Γ ισούται με 0 τότε η απώλεια επιστροφής RL ισούται με ∞ που σημαίνει ότι καμία ισχύς δεν θα ανακλάται πίσω, ενώ αν Γ ισούται με 1 τότε RL ισούται με 0 το οποίο σημαίνει ότι όλη η προσπίπτουσα ισχύς ανακλάται. Για πρακτικές εφαρμογές, ένας λόγος VSWR της τάξης του 2 ή λίγο μικρότερος μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτός καθώς αυτό αντιστοιχεί σε RL περίπου ίσο με 10dB.

2.5.4 S-Παράμετροι



Σχήμα 2.6 Μικροκυματικό δίκτυο N -θυρών [4]

Στις μικροκυματικές συχνότητες (300MHz – 300GHz) η μέτρηση των συνολικών τάσεων και ρευμάτων δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με άμεσο τρόπο επειδή περιλαμβάνουν το μέγεθος (που προκύπτει από την ισχύ) και τη φάση ενός κύματος που ταξιδεύει σε μια δεδομένη κατεύθυνση ή ενός στάσιμου κύματος. Για αυτό χρησιμοποιείται μια αναπαράσταση που συμφωνεί με τις άμεσες μετρήσεις και με τις ιδέες των προσπίπτοντων, ανακλώμενων και μεταδιδόμενων κυμάτων. Αυτή η αναπαράσταση ονομάζεται πίνακας σκέδασης (scattering matrix). Ο πίνακας σκέδασης παρέχει μια πλήρη περιγραφή του δικτύου με N -θύρες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Κάθε θύρα αντιπροσωπεύει μια γραμμή μεταφοράς που μπορεί να λειτουργεί ως είσοδος ή ως έξοδος. Ο πίνακας σκέδασης συσχετίζει τα κύματα τάσης που προσπίπτουν στις θύρες με εκείνα που ανακλώνται από τις θύρες. Στο σχήμα 2.6, ο όρος V_N^+ είναι το πλάτος του κύματος τάσης που προσπίπτει στη θύρα και ο όρος V_N^- είναι το πλάτος του κύματος τάσης που ανακλάται από τη θύρα N . [4] Ο πίνακας σκέδασης ή ο πίνακας $[S]$ ορίζεται σε σχέση με αυτά τα προσπίπτοντα και ανακλώμενα κύματα τάσης ως:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

ή

$$[V^-] = [S][V^+]$$

Ένα συγκεκριμένο στοιχείο του πίνακα σκέδασης μπορεί να προσδιοριστεί ως

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ όταν } k \neq j} \quad (2.27)$$

Με απλά λόγια, η εξίσωση (2.27) εννοεί ότι το στοιχείο S_{ij} βρίσκεται οδηγώντας τη θύρα j με ένα προσπίπτον κύμα τάσης V_j^+ και μετρώντας το ανακλώμενο πλάτος κύματος V_i^- που βγαίνει από τη θύρα i . Τα προσπίπτοντα κύματα σε όλες τις θύρες εκτός από τη j θύρα έχουν μηδενιστεί, πράγμα που σημαίνει ότι όλες οι θύρες θα πρέπει να τερματίζονται σε προσαρμοσμένα φορτία για να αποφευχθούν οι ανακλάσεις. Έτσι, το στοιχείο S_{ii} είναι ο συντελεστής ανάκλασης που παρατηρείται κοιτάζοντας στη θύρα i όταν όλες οι άλλες θύρες τερματίζονται σε προσαρμοσμένα φορτία και το στοιχείο S_{ij} είναι ο συντελεστής μετάδοσης από τη θύρα j στη θύρα i όταν όλες οι άλλες θύρες τερματίζονται σε προσαρμοσμένα φορτία.

Οι παράμετροι σκέδασης μπορούν να υπολογιστούν μέσω προγράμματος προσομοίωσης (π.χ. ADS) ή να μετρηθούν μέσω του φασματικού αναλυτή (spectrum analyzer). Στην πράξη, η πιο συχνά αναφερόμενη παράμετρος σε σχέση με τις κεραίες, οπότε και με την τυπωμένη κεραία μικροταινίας, είναι η S_{11} . Ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} αντιπροσωπεύει πόση ισχύς ανακλάται από την κεραία ξανά πίσω στον είσοδο. Στην ουσία αυτή η παράμετρος είναι ίδια με την παράμετρο RL και είναι σημαντική στην μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης μέσω του φασματικού αναλυτή. Εάν $S_{11} = -10$ dB, αυτό σημαίνει ότι εάν 3 dB ισχύος γίνουν δεκτά από την κεραία, -7 dB είναι η ανακλώμενη ισχύς. Η αποδεκτή ισχύς είτε ακτινοβολείται είτε απορροφάται ως απώλειες εντός της κεραίας. Δεδομένου ότι οι κεραίες είναι συνήθως σχεδιασμένες να έχουν χαμηλές απώλειες, ιδανικά το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που παρέχεται στην κεραία ακτινοβολείται.

2.6 Εύρος ζώνης (Bandwidth – BW)

Το εύρος ζώνης μιας κεραίας ορίζεται από το [2] ως «το εύρος των χρησιμοποιήσιμων συχνοτήτων εντός των οποίων η απόδοση της κεραίας, σε σχέση με κάποιο χαρακτηριστικό, συμμορφώνεται με ένα καθορισμένο πρότυπο». Το εύρος ζώνης μπορεί να είναι το εύρος των συχνοτήτων εκατέρωθεν της κεντρικής συχνότητας όπου τα χαρακτηριστικά της κεραίας όπως η σύνθετη αντίσταση εισόδου, το διάγραμμα ακτινοβολίας, το πλάτος δέσμης, το επίπεδο πλευρικών λοβών (SLL) ή το κέρδος, είναι κοντά σε εκείνες τις τιμές που έχουν ληφθεί στην κεντρική συχνότητα. Το εύρος ζώνης μιας κεραίας ευρείας ζώνης μπορεί να οριστεί ως ο λόγος των ανώτερων προς τις χαμηλότερες συχνοτήτες αποδεκτής λειτουργίας. Το εύρος ζώνης μιας κεραίας στενής ζώνης μπορεί να οριστεί ως το ποσοστό της διαφοράς συχνότητας σε σχέση με την κεντρική συχνότητα [2]. Αυτοί οι ορισμοί μπορούν να γραφτούν με όρους εξισώσεων ως εξής [5]:

$$BW_{broadband} = \frac{f_H}{f_L} \quad (2.28)$$

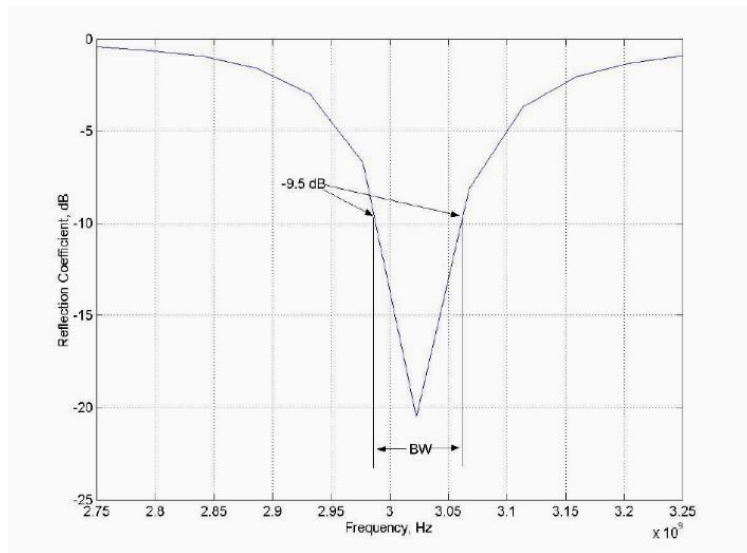
$$BW_{narrowband}(\%) = \left[\frac{f_H - f_L}{f_C} \right] \cdot 100 \quad (2.29)$$

όπου f_H είναι η ανώτερη συχνότητα

f_L είναι η χαμηλότερη συχνότητα

f_C είναι η κεντρική συχνότητα

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.7, μπορούμε να καθορίσουμε το εύρος ζώνης στενής ζώνης εφόσον γνωρίζουμε τις συχνοτήτες όπου το διάγραμμα RL έχει απώλειες επιστροφής ίσες με 9.5dB ($f_L = 2.985$ GHz και $f_H = 3.06$ GHz). Η κεντρική συχνότητα f_C ισούται με 3.02GHz. Οπότε το εύρος ζώνης είναι ίσο με $BW = 75$ MHz. Άρα, το ποσοστό εύρους στενής ζώνης, σύμφωνα με την σχέση (2.29), ισούται με $BW_{narrowband} = 2.48\%$.

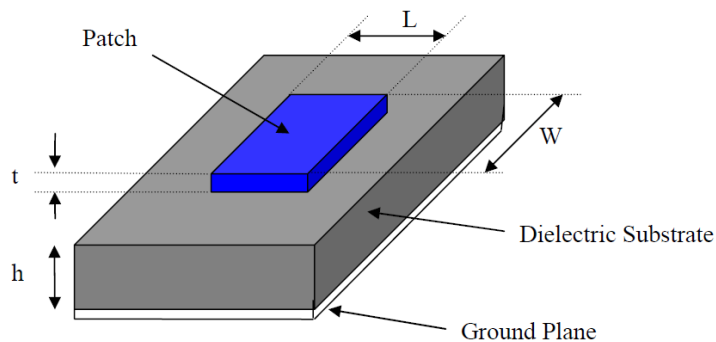


Σχήμα 2.7 Μέτρηση εύρους ζώνης από διάγραμμα RL

Κεφάλαιο 3ο: Τυπωμένη κεραία μικροταινίας

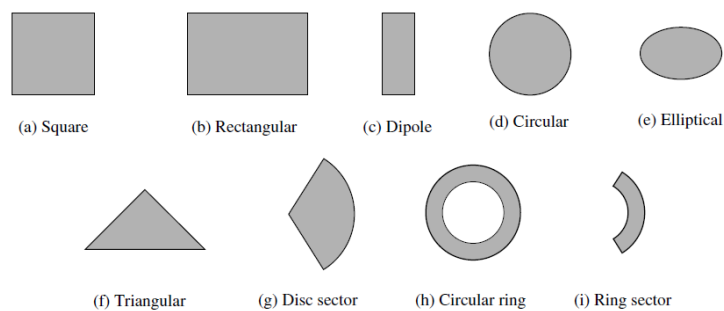
3.1 Ορισμός τυπωμένης κεραίας μικροταινίας

Στην πιο βασική της μορφή, μια τυπωμένη κεραία μικροταινίας αποτελείται από ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο (patch) στη μία πλευρά ενός διηλεκτρικού υποστρώματος το οποίο έχει ένα επίπεδο γείωσης στην άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Το μεταλλικό φύλλο είναι γενικά κατασκευασμένο από αγώγιμο υλικό όπως χαλκός ή χρυσός και μπορεί να πάρει οποιοδήποτε πιθανό σχήμα. Αυτό το φύλλο και οι γραμμές τροφοδοσίας είναι συνήθως φωτοχαραγμένες στο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Το επίπεδο γείωσης κατασκευάζεται συνήθως από χαλκό ή χρυσό.



Σχήμα 3.1 Διάταξη τυπωμένης κεραίας μικροταινίας

Προκειμένου να απλοποιηθεί η ανάλυση και η πρόβλεψη απόδοσης, το μεταλλικό φύλλο είναι γενικά τετράγωνο, ορθογώνιο, κυκλικό, τριγωνικό, ελλειπτικό ή κάποιο άλλο κοινό σχήμα όπως δείχνει το σχήμα 3.2. Για ένα ορθογώνιο φύλλο, το μήκος L του φύλλου είναι συνήθως ίσο με $0.333\lambda_0 < L < 0.5\lambda_0$, όπου λ_0 είναι το μήκος κύματος ελεύθερου χώρου. Το φύλλο επιλέγεται να είναι πολύ λεπτό έτσι ώστε $t \ll \lambda_0$, όπου t είναι το πάχος του φύλλου. Το ύψος h του διηλεκτρικού υποστρώματος είναι συνήθως $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$. Η διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος ϵ_r κυμαίνεται τυπικά στην περιοχή $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$.



Σχήμα 3.2 Σχήματα τυπωμένης κεραίας μικροταινίας [2]

Οι κεραίες μικροταινίας ακτινοβολούν κυρίως λόγω του φαινομένου στα άκρα, δηλαδή μεταξύ της άκρης του μεταλλικού φύλλου και του επιπέδου γείωσης. Για καλή απόδοση της κεραίας, ένα παχύ διηλεκτρικό υπόστρωμα με χαμηλή διηλεκτρική σταθερά είναι επιθυμητό, καθώς αυτό παρέχει καλύτερη απόδοση, μεγαλύτερο εύρος ζώνης και καλύτερη ακτινοβολία [2]. Ωστόσο, μια τέτοια

διαμόρφωση οδηγεί σε μεγαλύτερο μέγεθος κεραίας. Προκειμένου να σχεδιαστεί μια συμπαγής κεραία μικροταινίας, πρέπει να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες διηλεκτρικές σταθερές που είναι λιγότερο αποδοτικές και έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερο εύρος ζώνης. Ως εκ τούτου, πρέπει να επιτευχθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ των διαστάσεων και της απόδοσης της κεραίας.

3.2 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα

Οι τυπωμένες κεραίες μικροταινίας αυξάνονται σε δημοτικότητα για χρήση σε ασύρματες εφαρμογές λόγω της απλής δομής τους. Ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά συμβατές για ενσωματωμένες κεραίες σε φορητές ασύρματες συσκευές. Οι κεραίες τηλεμετρίας και επικοινωνίας σε πυραύλους πρέπει να είναι λεπτές και σύμμορφες. Οπότε συχνά χρησιμοποιούνται κεραίες μικροταινίας για αυτόν τον σκοπό. Μερικά από τα κύρια πλεονεκτήματα τους που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [2,6] επισημαίνονται παρακάτω:

- Μικρό βάρος και μικρός όγκος.
- Επίπεδη διαμόρφωση χαμηλού προφίλ εύκολα προσαρμόσιμη σε επιφάνειες.
- Χαμηλό κόστος κατασκευής.
- Κατασκευή σε μεγάλες ποσότητες.
- Ενσωμάτωση σε ολοκληρωμένα κυκλώματα μικροκυμάτων (MMIC).
- Δυνατότητα λειτουργίας σε διπλή και τριπλή συχνότητα.

Οι κεραίες μικροταινίας, όμως, έχουν και διάφορα μειονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές κεραίες. Μερικά από τα κύρια μειονεκτηματά τους, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία [6,7], παρατίθενται παρακάτω:

- Στενό εύρος ζώνης
- Χαμηλή απόδοση ακτινοβολίας, 15-50%
- Χαμηλό κέρδος, 3-5dBi
- Εξωγενής ακτινοβολία από τροφοδοσίες και διασταυρώσεις
- Χαμηλή ικανότητα χειρισμού ισχύος
- Διέγερση επιφανειακών κυμάτων

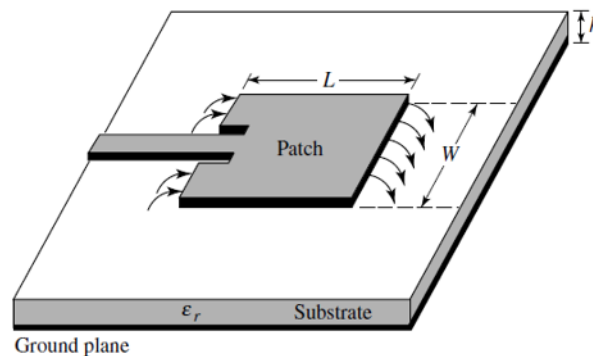
Οι τυπωμένες κεραίες μικροταινίας έχουν πολύ υψηλό συντελεστή ποιότητας κεραίας (Q). Ο παράγοντας Q αντιπροσωπεύει τις απώλειες που σχετίζονται με την κεραία και ένα μεγάλο Q οδηγεί σε στενό εύρος ζώνης και χαμηλή απόδοση. Το Q μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος. Αλλά καθώς το πάχος αυξάνεται, ένα αυξανόμενο κλάσμα της συνολικής ισχύος που παρέχεται από την πηγή πηγαίνει σε ένα επιφανειακό κύμα. Αυτή η συνεισφορά του επιφανειακού κύματος μπορεί να μετρηθεί ως ανεπιθύμητη απώλεια ισχύος αφού τελικά διασκορπίζεται στις διηλεκτρικές στρώσεις και προκαλεί υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της κεραίας. Ωστόσο, τα επιφανειακά κύματα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση δομών φωτονικών κενού ζώνης [7]. Αλλά προβλήματα όπως το χαμηλότερο κέρδος και η χαμηλότερη ικανότητα διαχείρισης ισχύος μπορούν να ξεπεραστούν χρησιμοποιώντας μια διαμόρφωση διάταξης για τα στοιχεία.

3.3 Μέθοδοι τροφοδοσίας

Οι κεραίες μικροταινίας μπορούν να τροφοδοτηθούν με ποικίλες μεθόδους. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες – με επαφή και χωρίς επαφή. Στη μέθοδο της επαφής, η ισχύς ραδιοσυχνότητας τροφοδοτείται απευθείας στο μεταλλικό φύλλο χρησιμοποιώντας ένα συνδετικό στοιχείο όπως μια γραμμή μικροταινίας (microstrip line). Στο σχήμα χωρίς επαφή, η σύζευξη ηλεκτρομαγνητικού πεδίου πραγματοποιείται για τη μεταφορά ισχύος μεταξύ της γραμμής μικροταινίας και του μεταλλικού φύλλου [2]. Οι τέσσερις πιο δημοφιλείς τεχνικές τροφοδοσίας που χρησιμοποιούνται είναι η γραμμή μικροταινίας (microstrip line), το ομοαξονικό καλώδιο (coaxial feed), η σύζευξη μέσω ανοίγματος (aperture coupling) και η διέγερση μέσω γειτνίασης (proximity coupling). Οι πρώτες δύο τεχνικές είναι μέθοδοι επαφής ενώ οι τελευταίες δύο είναι μέθοδοι χωρίς επαφή.

3.3.1 Γραμμή μικροταινίας

Σε αυτόν τον τύπο τροφοδοσίας, μια αγώγιμη λωρίδα συνδέεται απευθείας στην άκρη του patch όπως δείχνει το σχήμα 3.3. Η αγώγιμη λωρίδα είναι μικρότερη σε πλάτος σε σύγκριση με το patch και αυτού του είδους η διάταξη τροφοδοσίας έχει το πλεονέκτημα ότι η τροφοδοσία μπορεί να χαράσσεται στο ίδιο υποστρώμα για να παρέχει μια επίπεδη δομή. Ωστόσο, καθώς το πάχος του χρησιμοποιούμενου διηλεκτρικού υποστρώματος αυξάνεται, τα επιφανειακά κύματα και η παρασιτική ακτινοβολία τροφοδοσίας αυξάνονται επίσης, γεγονός που παρεμποδίζει το εύρος ζώνης της κεραίας [2]. Συνήθως, η γραμμή μικροταινίας που χρησιμοποιείται είναι μια γραμμή μικροταινίας με αντίσταση 50Ω.



Σχήμα 3.3 Τροφοδοσία κεραίας με γραμμή μικροταινίας [2]

Για τον υπολογισμό του πλάτους και του μήκους των τμημάτων γραμμής μικροταινίας αρχικά υπολογίζεται ο παράγοντας A σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$A = \frac{Z_0}{60} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)} \quad (3.1)$$

όπου Z_0 = χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μικροταινίας

ϵ_r = διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος

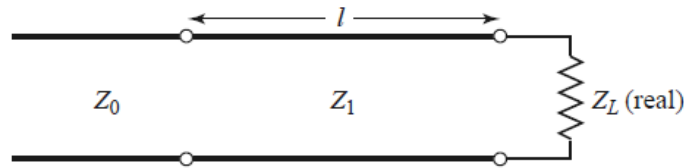
Στη συνέχεια, για την σχεδίαση της γραμμής μικροταινίας, χρειάζεται να υπολογιστεί η παράμετρος $\frac{W}{h}$ για να βρεθεί το πλάτος της γραμμής W . Ο όρος $\frac{W}{h}$ μπορεί να βρεθεί ανάλογα με την τιμή του παράγοντα A , ως εξής:

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & A > 1.52 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right], & A \leq 1.52 \end{cases} \quad (3.2)$$

όπου W το πλάτος της γραμμής, h το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος και η παράμετρος B είναι ίση με:

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.3)$$

Παρόλα αυτά χρειάζεται να σημειωθεί ότι η σύνθετη αντίσταση της κεραίας είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της γραμμής μικροταινίας (τροφοδοσίας) των 50 Ω. Οπότε πρέπει να γίνει σωστή προσαρμογή μεταξύ αυτών των δύο σύνθετων αντιστάσεων για να μην υπάρχει ανάκλαση ισχύος από τα στάσιμα κύματα. Δεδομένου ότι το ρεύμα είναι χαμηλό στα άκρα ενός patch μισού κύματος και αυξάνεται σε μέγεθος προς το κέντρο, η σύνθετη αντίσταση εισόδου της κεραίας Z_L θα μπορούσε να μειωθεί αν το patch τροφοδοτηθεί πιο κοντά στο κέντρο. Ένας τρόπος που μπορεί να επιτευχθεί αυτό είναι η μέθοδος με έναν μετασχηματιστή $\lambda/4$.



Σχήμα 3.4 Μετασχηματιστής $\lambda/4$ [4]

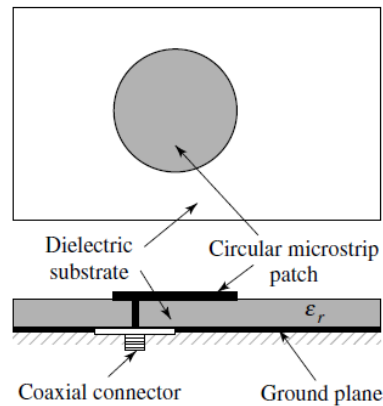
Με την μέθοδο του μετασχηματιστή $\lambda/4$ είναι δυνατή η αντιστοίχιση δύο πραγματικών σύνθετων αντιστάσεων σε μία μόνο συχνότητα. Αυτός ο μετασχηματιστής παρέχει αντιστοίχιση σύνθετης αντίστασης στενής ζώνης δίνοντας μηδενική ανάκλαση στη συχνότητα λειτουργίας [8]. Το patch της κεραίας μπορεί να συνδυαστεί με τη γραμμή τροφοδοσίας 50 Ω χρησιμοποιώντας μια γραμμή μεταφοράς που είναι ο μετασχηματιστής $\lambda/4$ όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Ο μετασχηματιστής ονομάζεται έτσι γιατί το μήκος του l ισούται με $\lambda/4$. Ο στόχος της προσθήκης μετασχηματιστή είναι να ταιριάζει ακριβώς με το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης εισόδου της κεραίας Z_L με την αντίσταση της γραμμής μικροταινίας Z_0 . Ο υπολογισμός της αντίστασης του μετασχηματιστή Z_1 δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Z_1^2 = Z_0 Z_L \Rightarrow Z_1 = \sqrt{Z_0 \cdot Z_L} \quad (3.4)$$

3.3.2 Ομοαξονική τροφοδοσία

Η ομοαξονική τροφοδοσία είναι μια πολύ κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία κεραιών μικροταινίας. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.5, ο εσωτερικός αγωγός του ομοαξονικού

κονέκτορα εκτείνεται μέσω του διηλεκτρικού και συγκολλάται στο patch, ενώ ο εξωτερικός αγωγός συνδέεται με το επίπεδο της γείωσης.

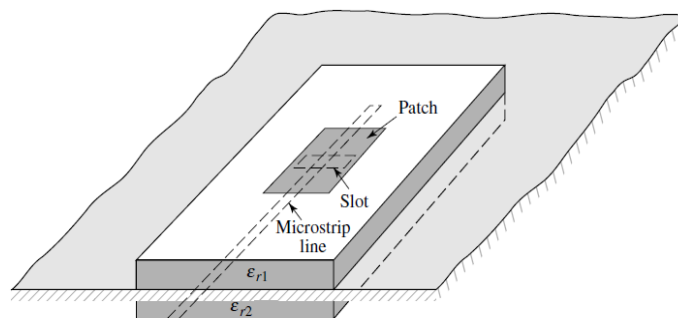


Σχήμα 3.5 Ομοαξονική τροφοδοσία [2]

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου σχεδίου τροφοδοσίας είναι ότι η τροφοδοσία μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε επιθυμητή θέση μέσα στο patch, προκειμένου να γίνεται κατάλληλη προσαρμογή με την αντίσταση εισόδου του. Αυτή η μέθοδος είναι εύκολη στην κατασκευή και έχει χαμηλή παρασιτική ακτινοβολία. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα του είναι ότι παρέχει στενό εύρος ζώνης και είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί, καθώς πρέπει να ανοίξει μια τρύπα στο υπόστρωμα και ο κονέκτορας προεξέχει έξω από το επίπεδο γείωσης, με αποτέλεσμα να μην είναι εντελώς επίπεδος για χοντρά υποστρώματα ($h > 0.02\lambda_0$). Επίσης, για παχύτερα υποστρώματα, το αυξημένο μήκος του εσωτερικού αγωγού του ομοαξονικού κονέκτορα καθιστά την αντίσταση εισόδου πιο επαγωγική, οδηγώντας σε προβλήματα προσαρμογής [6]. Φαίνεται παραπάνω ότι για ένα παχύ διηλεκτρικό υπόστρωμα, το οποίο παρέχει ευρύ εύρος ζώνης, η τροφοδοσία γραμμής μικροταινιών και η ομοαξονική τροφοδοσία πάσχουν από πολλά μειονεκτήματα. Οι τεχνικές τροφοδοσίας χωρίς επαφή, που θα συζητηθούν παρακάτω, λύνουν αυτά τα προβλήματα.

3.3.3 Τροφοδοσία μέσω ανοίγματος

Σε αυτόν τον τύπο τροφοδοσίας, το μεταλλικό φύλλο και η γραμμή τροφοδοσίας μικροταινίας διαχωρίζονται από το επίπεδο γείωσης όπως φαίνεται από το σχήμα 3.6. Η σύζευξη μεταξύ του patch και της γραμμής τροφοδοσίας γίνεται μέσω μιας σχισμής ή ενός ανοίγματος στο επίπεδο της γείωσης.

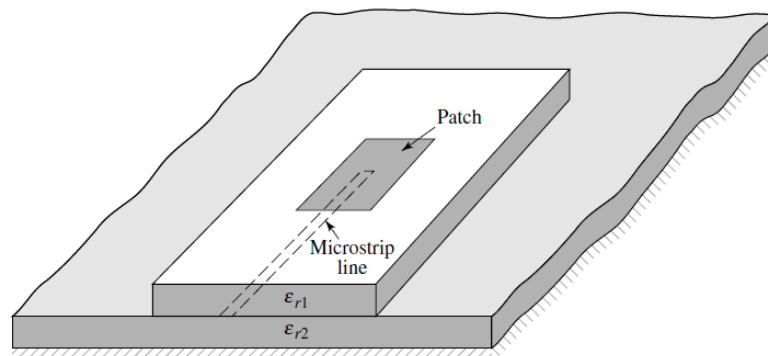


Σχήμα 3.6 Τροφοδοσία μέσω ανοίγματος [2]

Το άνοιγμα σύζευξης είναι συνήθως κεντραρισμένο κάτω από το μεταλλικό φύλλο, οδηγώντας σε χαμηλότερη διασταυρωμένη πόλωση λόγω συμμετρίας της διαμόρφωσης. Η ποσότητα σύζευξης από τη γραμμή τροφοδοσίας στο patch καθορίζεται από το σχήμα, το μέγεθος και τη θέση του ανοίγματος. Εφόσον το επίπεδο γείωσης διαχωρίζει το patch και την γραμμή τροφοδοσίας, η παρασιτική ακτινοβολία ελαχιστοποιείται. Γενικά, ένα υλικό υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς χρησιμοποιείται για το κάτω υπόστρωμα και ένα υλικό παχύ, χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς χρησιμοποιείται για το πάνω υπόστρωμα για τη βελτιστοποίηση της ακτινοβολίας από το μεταλλικό φύλλο [2]. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής τροφοδοσίας είναι ότι είναι δύσκολο να κατασκευαστεί λόγω πολλαπλών στρώσεων, γεγονός που αυξάνει επίσης το πάχος της κεραίας. Αυτό το σχήμα τροφοδοσίας παρέχει επίσης στενό εύρος ζώνης.

3.3.4 Τροφοδοσία μέσω γειτνίασης

Αυτός ο τύπος τροφοδοσίας ονομάζεται επίσης σχέδιο ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης. Όπως δείχνει το σχήμα 3.7, χρησιμοποιούνται δύο διηλεκτρικά υποστρώματα έτσι ώστε η γραμμή τροφοδοσίας να βρίσκεται μεταξύ των δύο υποστρωμάτων και το patch ακτινοβολίας να βρίσκεται στην κορυφή του άνω υποστρώματος. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής τροφοδοσίας είναι ότι εξαλείφει την παρασιτική ακτινοβολία τροφοδοσίας και παρέχει πολύ υψηλό εύρος ζώνης (στα επίπεδα του 13%) [2], λόγω της συνολικής αύξησης του πάχους της κεραίας μικροταινίας. Αυτό το σχήμα παρέχει επίσης επιλογές μεταξύ δύο διαφορετικών διηλεκτρικών μέσων, ένα για το μεταλλικό φύλλο και ένα για την γραμμή τροφοδοσίας για βελτιστοποίηση των επιμέρους επιδόσεων.



Σχήμα 3.7 Τροφοδοσία μέσω γειτνίασης [2]

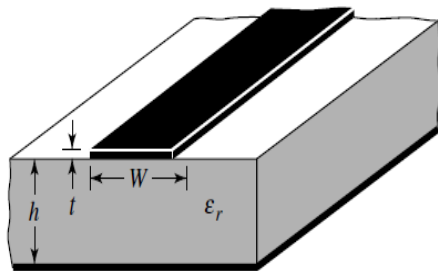
Η αντιστοίχιση αντίστασης μπορεί να επιτευχθεί ελέγχοντας το μήκος της γραμμής τροφοδοσίας και την αναλογία πλάτους προς γραμμή του patch. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του σχήματος τροφοδοσίας είναι ότι είναι δύσκολο να κατασκευαστεί λόγω των δύο διηλεκτρικών στρωμάτων που χρειάζονται σωστή ευθυγράμμιση. Επίσης, υπάρχει αύξηση στο συνολικό πάχος της κεραίας.

3.4 Ανάλυση λειτουργίας

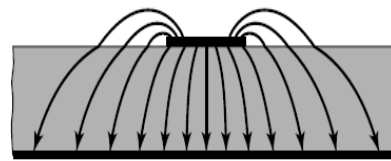
Τα πιο δημοφιλή μοντέλα για την ανάλυση των κεραίων μικροταινίας είναι το μοντέλο γραμμής μεταφοράς, το μοντέλο κοιλότητας και το μοντέλο πλήρους κύματος [2]. Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς είναι το πιο απλό από όλα και παρέχει καλή φυσική εικόνα, αλλά είναι λιγότερο ακριβές. Το μοντέλο κοιλότητας είναι πιο ακριβές και παρέχει καλή φυσική εικόνα, αλλά είναι πολύπλοκο στη φύση. Το μοντέλο πλήρους κύματος είναι εξαιρετικά ακριβές, ευέλικτο και μπορεί να επεξεργαστεί

μεμονωμένα στοιχεία, πεπερασμένες και άπειρες συστοιχίες, στοιβαγμένα στοιχεία, στοιχεία αυθαίρετου σχήματος και σύζευξη. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι πολύ πιο περίπλοκο στη φύση του σε σύγκριση με τα δύο μοντέλα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύεται και χρησιμοποιείται το μοντέλο γραμμής μεταφοράς για την ανάλυση και τον σχεδιασμό μιας τυπωμένης κεραίας μικροταινίας.

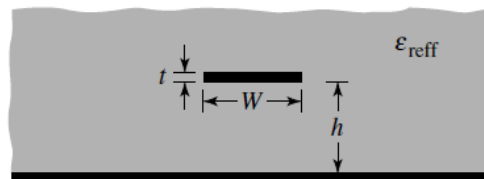
Το μοντέλο γραμμής μεταφοράς αντιπροσωπεύει την κεραία μικροταινίας με δύο σχισμές πλάτους W και ύψους h , που χωρίζονται από μια γραμμή μεταφοράς μήκους L . Η μικροταινία είναι ουσιαστικά μια μη ομοιογενής γραμμή δύο διηλεκτρικών, τυπικά του υποστρώματος και του αέρα.



Σχήμα 3.8 Γραμμή μικροταινίας [2]



Σχήμα 3.9 Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου [2]



Σχήμα 3.10 Ενεργός διηλεκτρική σταθερά [2]

Ως εκ τούτου, όπως φαίνεται από το σχήμα 3.9, οι περισσότερες από τις γραμμές ηλεκτρικού πεδίου βρίσκονται στο υπόστρωμα και τμήματα ορισμένων γραμμών στον αέρα. Ως αποτέλεσμα, αυτή η γραμμή μεταφοράς δεν μπορεί να υποστηρίξει τον καθαρό εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό (TEM) τρόπο μετάδοσης, καθώς οι ταχύτητες φάσης θα ήταν διαφορετικές στον αέρα και στο υπόστρωμα. Αντίθετα, ο κυρίαρχος τρόπος διάδοσης θα ήταν σχεδόν TEM (quasi-TEM). Ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθεί μια ενεργός διηλεκτρική σταθερά (ϵ_{reff}) προκειμένου να υπολογιστούν τα φαινόμενα άκρων (fringing effects) και η διάδοση του κύματος στη γραμμή. Η τιμή του ϵ_{reff} είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή του ϵ_r επειδή τα φαινόμενα των άκρων γύρω από την περιφέρεια του patch δεν περιορίζονται στο διηλεκτρικό υπόστρωμα αλλά απλώνονται επίσης στον αέρα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8. Το αποτέλεσμα είναι η ενεργός διηλεκτρική σταθερά να ορίζεται ως η διηλεκτρική σταθερά του ομοιόμορφου διηλεκτρικού υλικού έτσι ώστε η γραμμή μικροταινίας του σχήματος 3.10 να έχει τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα τη σταθερά διάδοσης, με την πραγματική γραμμή του σχήματος 3.8. Η τιμή του ϵ_{reff} διαφέρει ανάλογα με το πλάτος της γραμμής μικροταινίας. Άρα είναι διαφορετική για την γραμμή τροφοδοσίας 50Ω , διαφορετική για τον μετασχηματιστή $\lambda/4$ (όταν χρησιμοποιείται) και διαφορετική για το patch της κεραίας. Η μαθηματική έκφραση για την τιμή του ϵ_{reff} δίνεται από το [2] ως:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_0} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

όπου ϵ_{reff} = ενεργός διηλεκτρική σταθερά

ϵ_r = διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος

h = ύψος (πάχος) του διηλεκτρικού υποστρώματος

W_0 = πλάτος γραμμής μικροταινίας

Γνωρίζοντας την ενεργό διηλεκτρική σταθερά, μπορεί να υπολογιστεί το μήκος κύματος ως εξής:

$$\lambda = \frac{c_0}{f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (3.6)$$

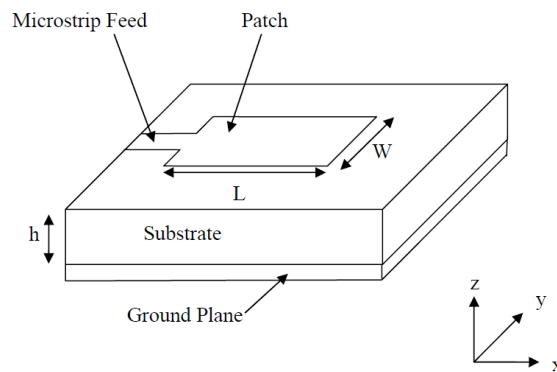
όπου c_0 = η ταχύτητα του φωτός στον ελεύθερο χώρο

f_0 = η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας

λ_0 = το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο

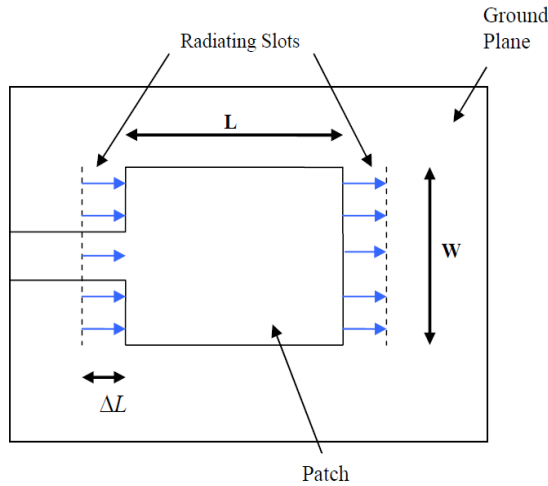
Όπως γίνεται φανερό από τον παραπάνω τύπο, το μήκος κύματος είναι διαφορετικό για την γραμμή μικροταινίας, διαφορετικό για τον μετασχηματιστή $\lambda/4$ (όταν χρησιμοποιείται) και διαφορετικό για το patch της κεραίας. Το μήκος κύματος για το patch της κεραίας συμβολίζεται ως λ_p .

Το σχήμα 3.11 δείχνει μια ορθογώνια κεραία μικροταινίας μήκους L , πλάτους W , που είναι τοποθετημένη πάνω σε ένα υπόστρωμα ύψους h . Ο άξονας συντεταγμένων επιλέγεται έτσι ώστε το μήκος να είναι κατά μήκος της διεύθυνσης x , το πλάτος κατά την διεύθυνση y και το ύψος κατά την διεύθυνση z .

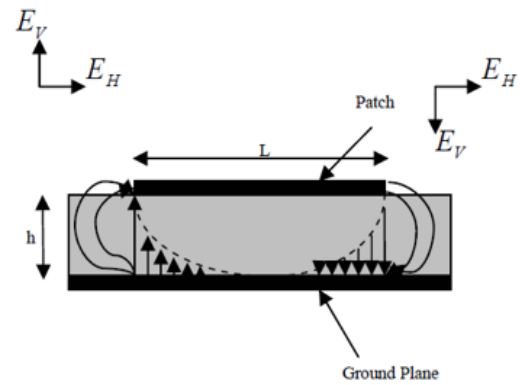


Σχήμα 3.11 Ορθογώνια κεραία μικροταινίας

Για να λειτουργήσει ο επικρατών ρυθμός TM_{10} , το μήκος του patch πρέπει να είναι ελαφρώς μικρότερο από $\lambda_p / 2$ όπου λ_p είναι το μήκος κύματος του patch όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Ο επικρατών ρυθμός TM_{10} υποδηλώνει ότι το πεδίο ποικίλλει κατά ένα κύκλο $\lambda_p / 2$ κατά μήκος και δεν υπάρχει διακύμανση κατά το πλάτος του patch. Στο σχήμα 3.12, η κεραία μικροταινίας αντιπροσωπεύεται από δύο σχισμές, που χωρίζονται από μια γραμμή μεταφοράς μήκους L και είναι ανοιχτό κύκλωμα και στα δύο άκρα. Κατά μήκος του πλάτους του patch, η τάση είναι μέγιστη και το ρεύμα είναι ελάχιστο λόγω των ανοιχτών άκρων. Τα πεδία στις άκρες μπορούν να διαχωριστούν σε κανονικές και εφαπτόμενες συνιστώσες σε σχέση με το επίπεδο γείωσης.



Σχήμα 3.12 Κάτοψη ορθογώνιας κεραίας



Σχήμα 3.13 Πλαινή όψη ορθογώνιας κεραίας [2]

Από το σχήμα 3.13 φαίνεται ότι οι κανονικές συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου στις δύο άκρες κατά μήκος του πλάτους είναι σε αντίθετες κατευθύνσεις και επομένως εκτός φάσης αφού το patch έχει μήκος $\lambda_p / 2$ και ως εκ τούτου ακυρώνονται μεταξύ τους στην ευρεία κατεύθυνση. Οι εφαπτόμενες συνιστώσες, οι οποίες βρίσκονται σε φάση, σημαίνει ότι τα πεδία που προκύπτουν συνδυάζονται για να δώσουν μέγιστο ακτινοβολούμενο πεδίο κάθετο στην επιφάνεια της κατασκευής. Ως αποτέλεσμα, οι άκρες κατά το πλάτος μπορούν να αναπαρασταθούν ως δύο ακτινοβολούμενες εγκοπές (slots), οι οποίες απέχουν $\lambda_p / 2$ μεταξύ τους και διεγείρονται σε φάση και ακτινοβολούν στο μισό χώρο πάνω από το επίπεδο γείωσης. Τα φαινόμενα των άκρων κατά μήκος του πλάτους μπορούν να μοντελοποιηθούν ως σχισμές ακτινοβολίας και ηλεκτρικά το μεταλλικό φύλλο της κεραίας μικροταινίας φαίνεται μεγαλύτερο από τις φυσικές του διαστάσεις.

Οι διαστάσεις του patch κατά μήκος του έχουν πλέον επεκταθεί σε κάθε άκρο κατά μια απόσταση ΔL , η οποία δίνεται από την εμπειρική σχέση[9]:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.7)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, το πραγματικό φυσικό μήκος του patch υπολογίζεται ως εξής:

$$L = \frac{\lambda_p}{2} - 2\Delta L \quad (3.8)$$

Τελικά το ενεργό μήκος του patch L_{eff} , λόγω του φαινομένου των άκρων, ισούται με:

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L = \frac{\lambda_p}{2} \quad (3.9)$$

Το πλάτος του patch W υπολογίζεται ως εξής [1]:

$$W = \frac{c_0}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3.10)$$

Για μια γραμμή μικροταινίας (όπως αυτή του 50 Ω), το μήκος της γραμμής μπορεί να βρεθεί σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$L_0 = \frac{g \cdot c_0}{\omega \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{g \cdot c_0}{2\pi f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{g \cdot \lambda_0}{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3.11)$$

όπου $g = \beta l =$ το ηλεκτρικό μήκος γραμμής μετρούμενο σε rad

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} =$ σταθερά διάδοσης κύματος ή κυματικός αριθμός

$l =$ το φυσικό μήκος γραμμής υπολογισμένο σε μήκος κύματος

$\omega =$ η κυκλική συχνότητα

Το ηλεκτρικό μήκος γραμμής αντιστοιχεί με το μήκος της γραμμής μικροταινίας μετρούμενο σε μήκη κύματος. Το φυσικό μήκος γραμμής μικροταινίας μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε τιμή ανάλογα με τις υπόλοιπες διαστάσεις της κεραίας.

Επιπλέον, υπολογίζονται και οι διαστάσεις της γείωσης (ή της πλακέτας) σε μια τυπωμένη κεραία μικροταινίας ως εξής:

$$W_G = W + 6h \quad (3.12)$$

$$L_G = L + 6h \quad (3.13)$$

όπου $W_G =$ το πλάτος της γείωσης

$L_G =$ το μήκος της γείωσης

Τέλος, όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, το patch (ανάλογα με τις διαστάσεις του) έχει την δική του σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_L η οποία μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Z_L = \frac{90\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \cdot \left(\frac{L}{W}\right)^2 \quad (3.14)$$

3.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας και κατευθυντικότητα

Η ακτινοβολία προέρχεται από τα φαινόμενα των άκρων στα δύο ανοιχτά άκρα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η οποία ισοδυναμεί με δύο εγκοπές - κεραίες που χωρίζονται με απόσταση L . Τα σχήματα ακτινοβολίας στα δύο κύρια επίπεδα (Ε-επίπεδο και Η-επίπεδο) είναι [3]:

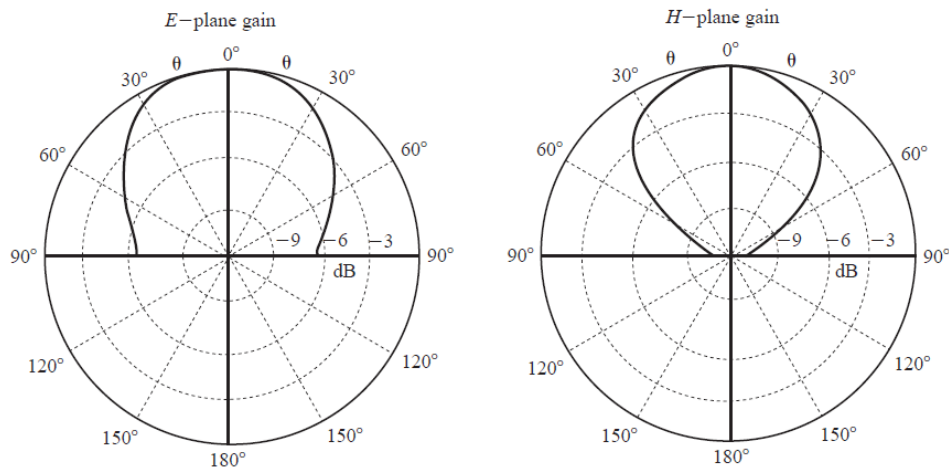
- Στο Ε-επίπεδο ($\varphi = 0^\circ$):

$$E = \hat{\theta} E_0 \cos\left(\frac{\beta L}{2} \sin \theta\right) \quad (3.15)$$

- Στο Η-επίπεδο ($\varphi = 90^\circ$):

$$E = -\hat{\varphi} E_0 \sin c_0 \left(\frac{\beta W}{2} \sin \theta\right) \cos \theta \quad (3.16)$$

Οι εξισώσεις (3.15) και (3.16) δεν περιλαμβάνουν τις επιδράσεις του υποστρώματος και το πλάτος των εγχοπών, αλλά δίνουν αρκετά καλά αποτελέσματα ως εκτιμήσεις. Τα τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας στα επίπεδα E και H φαίνονται στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14 Τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας μιας ορθογώνιας κεραίας μικροταινίας [3]

Με το ακτινοβολούμενο πεδίο, μπορούμε να υπολογίσουμε την κατευθυντικότητα χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.17) Η κατευθυντικότητα της κεραίας μικροταινίας μπορεί να εκφραστεί, σύμφωνα με την [3], ως:

$$D = \begin{cases} 6.6 = 8.2dBi, & W \ll \lambda_o \\ \frac{8W}{\lambda_o}, & W \gg \lambda_o \end{cases} \quad (3.17)$$

Κατά συνέπεια, όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος, τόσο μεγαλύτερη είναι η κατευθυντικότητα. Η εξίσωση (3.17) ισχύει κατά προσέγγιση. Οι πραγματικές τιμές είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τις θεωρητικές.

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση τυπωμένης κεραίας μικροταινίας

4.1 Χαρακτηριστικά πλακέτας ορθογώνιας κεραίας μικροταινίας

Το πιο σύνηθες και χρησιμοποιούμενο διηλεκτρικό υλικό είναι αυτό του FR-4 ή αλλιώς Flame Retardant-4. Το FR-4 είναι ένα σύνθετο υλικό, το οποίο αποτελείται από ύφασμα πλαστικού ενισχυμένο με ίνες γυαλιού μαζί με εποξική ρητίνη, και είναι ανθεκτικό στη φλόγα. Το FR-4 χρησιμοποιείται πιο συχνά ως ηλεκτρικός μονωτής με σημαντική μηχανική αντοχή. Το υλικό είναι γνωστό ότι διατηρεί τις υψηλές μηχανικές του αξίες και τις ηλεκτρικές μονωτικές του ιδιότητες τόσο σε ξηρές όσο και σε υγρές συνθήκες. Χρησιμοποιείται ευρέως ως μονωτικό υλικό σε κατασκευές PCB για να απομονώσει τα γειτονικά χάλκινα επίπεδα. Για την κατασκευή της ορθογώνιας κεραίας μικροταινίας, χρησιμοποιείται η πλακέτα διπλής όψης FR-4 της Bungard, με παραμέτρους $\epsilon_r = 4.5$, $h = 1.55 \text{ mm}$, $\tau = 35 \mu\text{m}$ και $\tan \delta = 0.015$ για συχνότητα λειτουργίας $f_o = 2.4 \text{ GHz}$ [10]. Για την σχεδίαση ορθογώνιας κεραίας στην συχνότητα των 2.4 GHz, επιλέχθηκε η συγκεκριμένη πλακέτα για λόγους κόστους και ευκολίας στην χρήση καθώς πρόκειται για μια φωτοευαίσθητη, συμπαγή και ελαφριά πλακέτα.

4.2 Θεωρητικός σχεδιασμός ορθογώνιας κεραίας

Αρχικά χρειάζεται να υπολογίσουμε το μήκος κύματος του αέρα για την συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας f_o :

$$\lambda_o = \frac{c_o}{f_o} = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9} = 0.125 \text{ m} = 125 \text{ mm}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το πλάτος W του patch σύμφωνα με την εξ. (3.10):

$$W = \frac{c_o}{2f_o} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \times 10^9} \cdot \sqrt{\frac{2}{4.5 + 1}} = 37.688 \text{ mm}$$

Έπειτα, υπολογίζεται την ενεργό διηλεκτρική σταθερά ϵ_{reff} του patch από την σχέση (3.5):

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1.55}{37.688} \right]^{-\frac{1}{2}} = 4.181$$

Γνωρίζοντας την ενεργό διηλεκτρική σταθερά υπολογίζεται, σύμφωνα με την σχέση (3.6), το μήκος κύματος στο διηλεκτρικό μέσο του patch, δηλ. στο FR4:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{0.125}{\sqrt{4.181}} = 61.132 \text{ mm}$$

Η επέκταση του μήκους ΔL λόγω του φαινομένου των άκρων υπολογίζεται, από την εξ. (3.7) ως εξής:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} = 0.412 \times 1.55 \frac{(4.181 + 0.3) \left(\frac{37.688}{1.55} + 0.264 \right)}{(4.181 - 0.258) \left(\frac{37.688}{1.55} + 0.8 \right)} = 0.713 \text{ mm}$$

Οπότε το φυσικό μήκος του patch L υπολογίζεται από την σχέση (3.8) ως:

$$L = \frac{\lambda_p}{2} - 2\Delta L = \frac{61.132}{2} - 2(0.713) = 29.14 \text{ mm}$$

Η αντίσταση εισόδου της κεραίας Z_L , σύμφωνα με την σχέση (3.14) ισούται με:

$$Z_L = \frac{90\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1} \cdot \left(\frac{L}{W}\right)^2 = \frac{90 \times 4.5^2}{4.5 - 1} \cdot \left(\frac{29.14}{37.688}\right)^2 = 311.29 \Omega$$

Για τον υπολογισμό του πλάτους της γραμμής μικροταινίας με αντίσταση $Z_0 = 50 \Omega$ ισχύει η εξ. (3.1):

$$A = \frac{Z_0}{60} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right)} = \frac{50}{60} \cdot \sqrt{\frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5}\right)} = 1.543$$

και επειδή $A > 1.52$, μπορούμε να βρούμε το πλάτος W_0 της γραμμής μεταφοράς 50Ω σύμφωνα με την εξ. (3.2):

$$\frac{W_0}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \Rightarrow W_0 = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \times h = \frac{8e^{1.543}}{e^{2 \times 1.543} - 2} \times 1.55 = 2.916 \text{ mm}$$

Για να υπολογίσουμε το μήκος της γραμμής μικροταινίας 50Ω , χρειάζεται να υπολογίσουμε πρώτα την ενεργό διηλεκτρική σταθερά για την συγκεκριμένη γραμμή μικροταινίας, η οποία ισούται με:

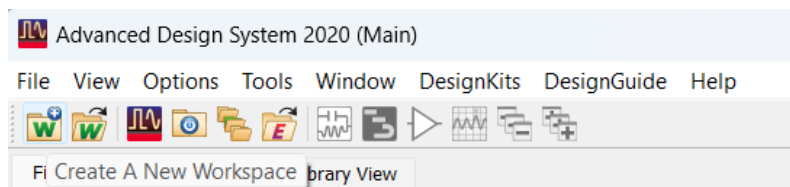
$$\varepsilon_{re0} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_0}\right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1.55}{2.916}\right]^{-\frac{1}{2}} = 3.394$$

Έχουμε θέσει από πριν ότι το μήκος της γραμμής l θα είναι ίσο με $\lambda/4$. Άρα το ηλεκτρικό μήκος g θα ισούται με $\pi/2$. Οπότε, σύμφωνα με την σχέση (3.11) το μήκος L_0 της γραμμής μικροταινίας 50Ω ισούται με:

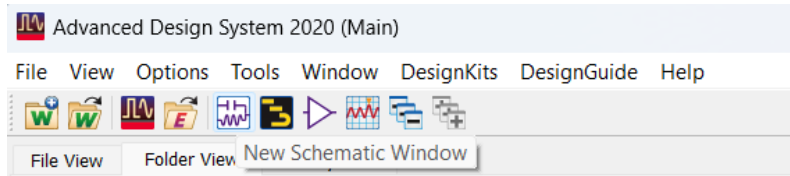
$$L_0 = \frac{g \cdot c_0}{\omega \cdot \sqrt{\varepsilon_{re0}}} = \frac{g \cdot c_0}{2\pi f_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_{re0}}} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \lambda_0}{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{re0}}} = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon_{re0}}} = \frac{0.125}{4\sqrt{3.394}} = 16.962 \text{ mm}$$

4.3 Προσομοίωση ορθογώνιας κεραίας χωρίς βελτιστοποίηση

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι διαστάσεις της κεραίας θεωρητικά, παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης της κεραίας που προέκυψε θεωρητικά μέσω του λογισμικού Advanced Design System 2020 (ADS). Η προσομοίωση γίνεται ώστε να μέσω των διαγραμμάτων απωλειών επιστροφής (ή RL) να μπορεί να κριθεί η σωστή λειτουργία μιας κεραίας στην συχνότητα 2.4GHz. Στην αρχή, δημιουργείται ένας νέος χώρος εργασίας στο ADS, το λεγόμενο “Workspace”, μέσα στον οποίο θα τοποθετηθούν τα στοιχεία της κεραίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Για την δημιουργία του σχηματικού, επιλέγουμε “New Schematic Window” από την γραμμή εντολών του ADS όπως δείχνει το σχήμα 4.2.

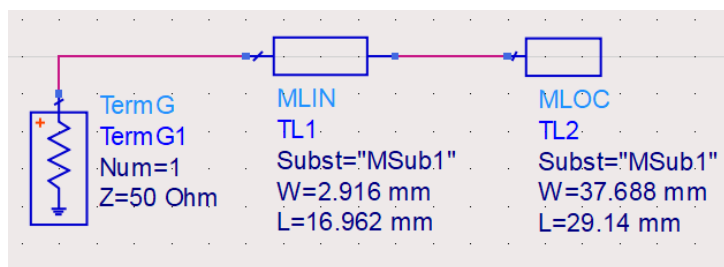


Σχήμα 4.1 Δημιουργία Workspace



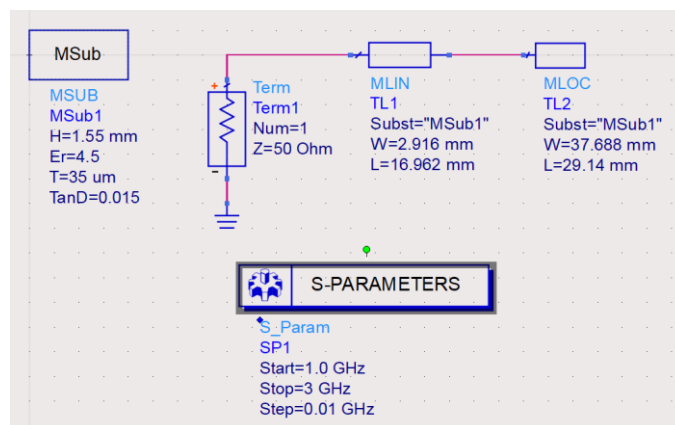
Σχήμα 4.2 Δημιουργία σχηματικού

Αφού δημιουργηθεί το σχηματικό, από την βιβλιοθήκη “TLines-Microstrip”, χρησιμοποιούμε το block του “MLIN” για την γραμμή μεταφοράς 50 Ω και το block “MLOC” για το μεταλλικό φύλλο patch της κεραίας. Επίσης, για την υλοποίηση του κυκλώματος και την προσομοίωση του, τοποθετούμε μια θύρα “TermG” (Port Impedance Termination for S-Parameters with Ground Reference) της οποίας η χαρακτηριστική αντίσταση επιλέγεται 50 Ohm. Έπειτα, ενώνουμε τα στοιχεία με την επιλογή “Insert Wire”. Έπειτα τοποθετούμε τις θεωρητικές τιμές, που έχουν υπολογιστεί στην παράγραφο 4.2, στο κάθε στοιχείο της κεραίας. Το σχήμα 4.3 απεικονίζει τα στοιχεία της κεραίας μικροταινίας στο ADS.



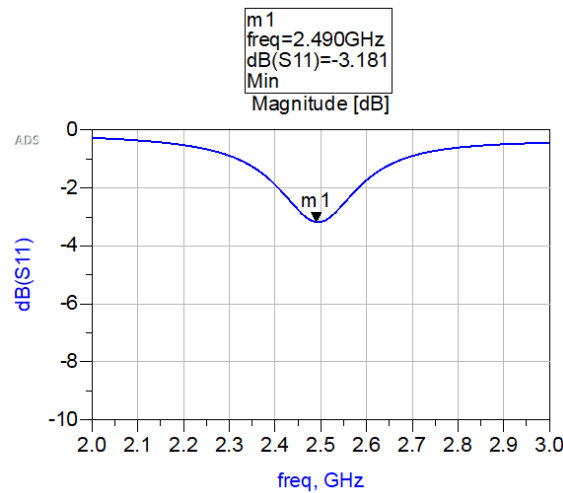
Σχήμα 4.3 Στοιχεία κεραίας μικροταινίας

Για την προσομοίωση του σχηματικού και χρειάζεται να εισαχθεί το εξάρτημα “SP” από τη βιβλιοθήκη “Basic Components”, στο οποίο επιλέγουμε το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας για την κεραία μικροταινίας. Στο πεδίο “Start” τοποθετούμε την αρχική συχνότητα προσομοίωσης (2 GHz), στο πεδίο “Stop” την τελική συχνότητα προσομοίωσης (3 GHz) και στο πεδίο “Step” το βήμα (0.01 GHz). Επιπρόσθετα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε και το εξάρτημα “MSUB” από τη βιβλιοθήκη “TLines-Microstrip”, στο οποίο συμπληρώνεται τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος της πλακέτας. Για να γίνει αυτό, κάνουμε κλικ πάνω στο “MSUB”, ανοίγει το παράθυρο “Edit Instance Parameters” και συμπληρώνουμε τις τιμές των παραμέτρων της μικροταινίας. Επίσης, μπορούμε να επιλέξουμε ποια χαρακτηριστικά θα εμφανίζονται χρησιμοποιώντας την επιλογή “Display parameter on schematic”. Το τελικό κύκλωμα του σχηματικού παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Εφόσον έχουν γίνει και αυτά τα βήματα, επιλέγουμε την επιλογή “Simulate” από την γραμμή εργαλείων.



Σχήμα 4.4 Σχηματικό κεραίας μικροταινίας

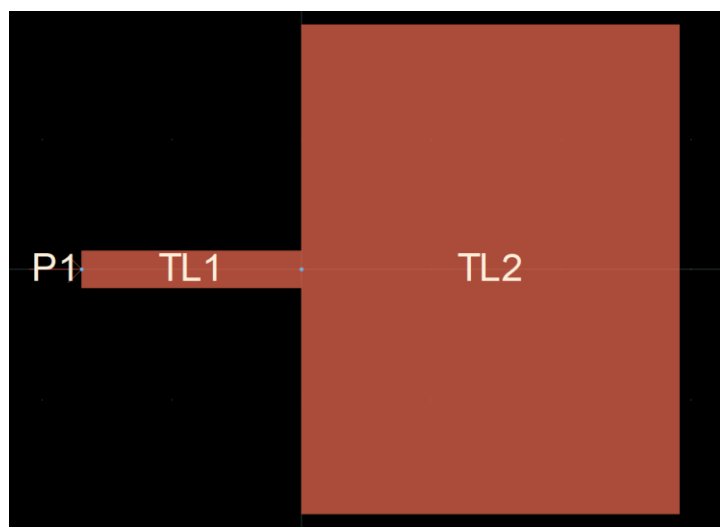
Στο σχήμα 4.5 εμφανίζεται το διάγραμμα με τις απώλειες επιστροφής (παράμετρος S_{11}) ή διάγραμμα RL σε dB.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα RL σχηματικού

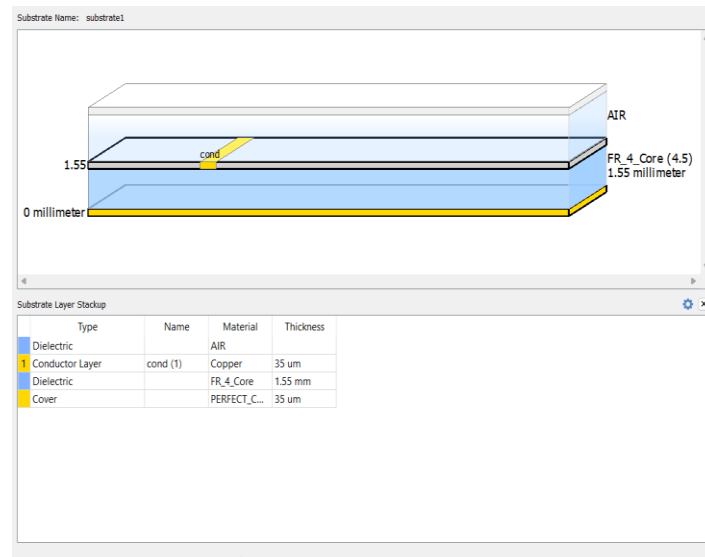
Παρατηρούμε ότι οι απώλειες επιστροφής στην συχνότητα των 2.490 GHz είναι κοντά στα -3 dB. Αυτό σημαίνει ότι η κεραία προσπαθεί να λειτουργήσει στη συχνότητα των 2.490GHz καθώς εκεί παρατηρούμε ότι υπάρχει ποσότητα ισχύος που καταναλώνεται από την κεραία μικροταινίας ενώ στις υπόλοιπες συχνότητες υπάρχει μεγαλύτερη ανάκλαση της τροφοδοτούμενης ισχύς και η ακτινοβολία είναι ελάχιστη ή και καθόλου. Όμως οι απώλειες επιστροφής της κεραίας είναι πολύ μικρές για να θεωρηθεί η κεραία λειτουργική. Όπως έχει αναφερθεί, ένα ελάχιστο ικανοποιητικό αποτέλεσμα είναι γύρω στα -10 dB.

Στη συνέχεια, ακολουθείται η εξαγωγή του Layout μέσω του σχηματικού. Από την γραμμή εργαλείων επιλέγουμε “Layout” και στη συνέχεια “Generate/Update Layout”. Κατευθείαν ανοίγει ένα νέο παράθυρο όπου εμφανίζεται το Layout του κυκλώματος που σχεδιάστηκε. Στην συνέχεια επιλέγουμε “Insert Pin” και τοποθετούμε ένα Pin (P1) στο άκρο της γραμμής μικροταινίας 50 Ω, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.



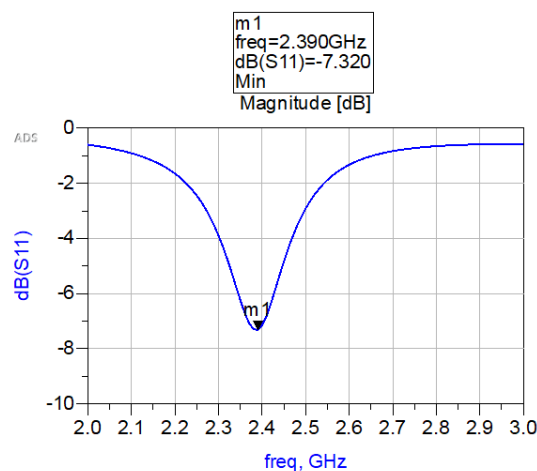
Σχήμα 4.6 Layout κεραίας

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν οι παράμετροι της πλακέτας. Πατώντας το εικονίδιο “Substrate Editor” από την γραμμή εργαλείων ανοίγει το παράθυρο που εμφανίζει μια προσομοίωση της διάταξης της πλακέτας. Αφαιρούμε τα επιπλέον στρώματα αγωγού ή διηλεκτρικού, καθορίζουμε το υλικό του διηλεκτρικού (“FR_4_Core”) και δίνουμε τις κατάλληλες τιμές για το πάχος του διηλεκτρικού και του χαλκού στα πεδία “Thickness” και “Material” αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα της διάταξης εμφανίζεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Διάταξη πλακέτας

Για τις τελευταίες ρυθμίσεις πριν γίνει η προσομοίωση στο Layout χρειάζεται να επιλέξουμε το εικονίδιο “EM Simulation Settings” και έπειτα “Create EM Setup View”. Αφού επιβεβαιώσουμε ότι δεν εμφανίζεται κάποιο θαυμαστικό για επανεξέταση των παραμέτρων, επιλέγουμε την καρτέλα “Frequency Plan”, στην λίστα “Type” επιλέγουμε Linear, στην λίστα “Fstart” την αρχική συχνότητα (στην περίπτωση μας 2 GHz), στην λίστα “Fstop” την τελική συχνότητα (στην περίπτωση μας 3 GHz) και στην λίστα “Step” το βήμα της δειγματοληψίας (στην περίπτωση μας 0.01 GHz). Τέλος, στο πεδίο “Generate” επιλέγουμε “S-Parameters” και κατόπιν “Simulate”. Στο σχήμα 4.8 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.

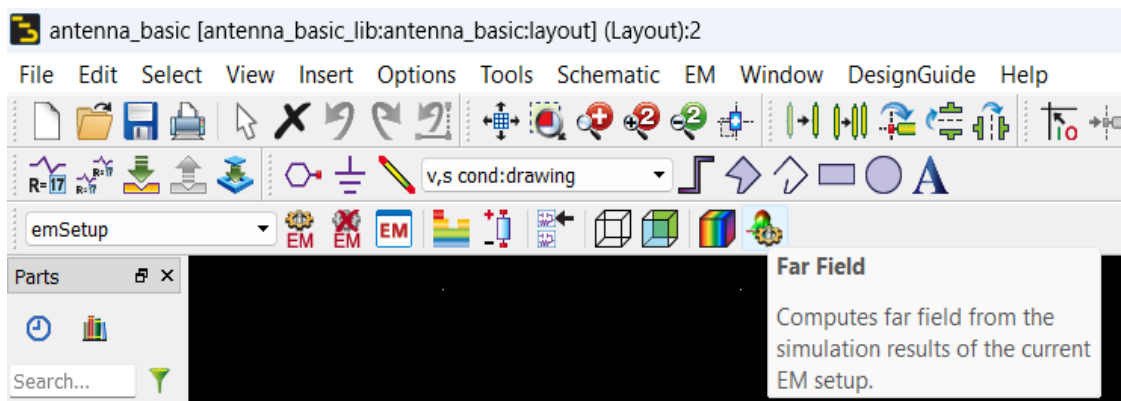


Σχήμα 4.8 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Σύμφωνα με το αποτέλεσμα του Layout παρατηρούμε ότι οι απώλειες επιστροφής εμφανίζονται στην συχνότητα των 2.36 GHz, όχι ακριβώς στα 2.4 GHz. Επίσης, αυτές οι απώλειες έχουν μέγεθος κοντά στα -7dB. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει λιγότερη ανάκλαση τροφοδοτούμενης ισχύς σε σχέση με το αποτέλεσμα του σχηματικού προηγούμενως. Όμως και σε αυτήν την περίπτωση είναι σχετικά μικρό αυτό το μέγεθος στις απώλειες και δεν ξεπερνιέται το όριο των -10 dB. Οπότε δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί σωστά ως κεραία.

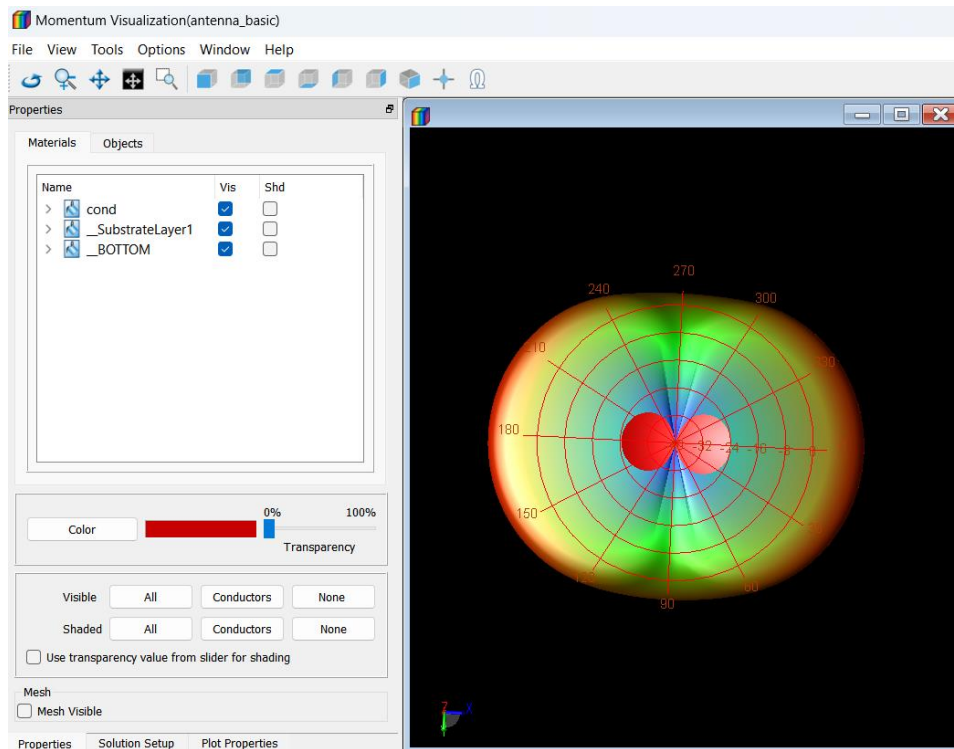
Όπως γίνεται φανερό, υπάρχει διαφορά αποτελεσμάτων ανάμεσα στο σχηματικό και στο Layout. Η χρήση σχηματικών στοιχείων είναι καλή για μια προσέγγιση 1ης τάξης ενός κυκλώματος, ειδικά μιας πραγματικής, μεταλλικής διάταξης. Το σχηματικό, όμως, δεν λαμβάνει υπόψη αλληλεπιδράσεις στοιχείων. Επομένως, η ακρίβειά του είναι ήδη περιορισμένη. Ωστόσο, η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση (η οποία θα ακολουθήσει στην συνέχεια) από μια σχηματική σχεδίαση είναι πολύ γρήγορες επειδή τα στοιχεία έχουν λύσεις κλειστής μορφής που είναι εξαιρετικά γρήγορες στον υπολογισμό. Από την άλλη πλευρά, η προσομοίωση από το Layout λαμβάνει υπόψη κάθε αλληλεπίδραση κάθε κομματιού μετάλλου της κεραίας μικροταινίας όπως και τα φαινόμενα των άκρων. Για αυτό και η προσομοίωση του Layout είναι χρονικά πιο αργή από αυτή του σχηματικού αλλά τα αποτελέσματα από το Layout είναι πιο έμπιστα.

Στη συνέχεια, μέσω του ADS, μπορούμε να εκτιμήσουμε μερικές από τις βασικές παραμέτρους της κεραίας. Επίσης, μπορούμε να δούμε σε τρισδιάστατη απεικόνιση το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Για να το κάνουμε αυτό, θα χρειαστεί να επιλέξουμε το εικονίδιο “EM Simulation Settings”, να επιλέξουμε την καρτέλα “Frequency Plan”, στην λίστα “Type” επιλέγουμε Single και στην λίστα “Fstart” την συγκεκριμένη συχνότητα στην οποία θέλουμε να εμφανιστεί το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα χαρακτηριστικά της κεραίας (στην περίπτωση μας στα 2.390 GHz). Τέλος, στο πεδίο “Generate” επιλέγουμε “S-Parameters” και κατόπιν “Simulate”. Για να εμφανίσουμε τα παραπάνω χαρακτηριστικά, επιλέγουμε από την γραμμή εργαλείων την επιλογή “Far Field” όπως δείχνει και το σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 Far Field

Έπειτα, εμφανίζεται σε τρισδιάστατη μορφή το διάγραμμα ακτινοβολίας όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας και από τα δύο άκρα του patch είναι το επιθυμητό σύμφωνα με τις παραγράφους 3.4 και 3.5. Δεν υπάρχουν δευτερεύοντες λοβοί.



Σχήμα 4.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Για την εμφάνιση των χαρακτηριστικών της κεραίας, επιλέγουμε κάτω αριστερά την καρτέλα “Plot Properties”, μετά την στήλη “Far Fields” και έπειτα την επιλογή “Antenna Parameters”. Στο σχήμα 4.11 βλέπουμε διάφορα χαρακτηριστικά της κεραίας στη συχνότητα των 2.390 GHz, όπως το κέρδος (“Gain”), την κατευθυντικότητα (“Directivity”) και την απόδοση ακτινοβολίας (“Radiation efficiency”). Παρατηρούμε ότι το κέρδος είναι κοντά 2 dB και η κατευθυντικότητα κοντά στα 6 dBi. Και τα δυο αυτά χαρακτηριστικά είναι αναμενόμενα για μια τέτοιου είδους κεραία χωρίς βελτιστοποίηση ή χωρίς προσαρμογή των σύνθετων αντιστάσεων. Επίσης, η απόδοση είναι γύρω στα 37%.

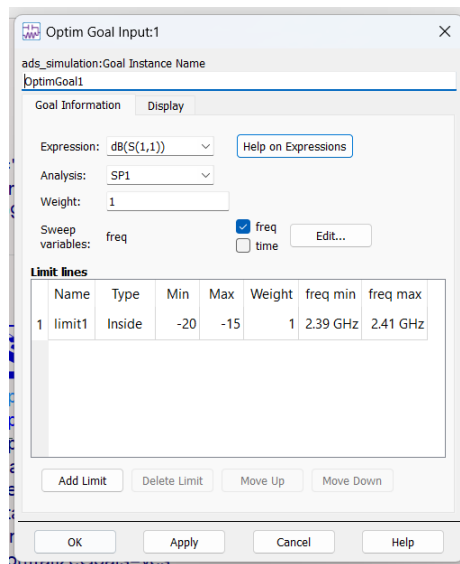
Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.39
Input power (Watts)	0.00203676
Radiated power (Watts)	0.000773665
Directivity(dBi)	6.25665
Gain (dBi)	2.05277
Radiation efficiency (%)	37.9851

Σχήμα 4.11 Χαρακτηριστικά κεραίας

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των απωλειών επιστροφής από το σχηματικό και το layout, η κεραία δεν ικανοποιεί τις κατάλληλες συνθήκες για να θεωρηθεί μια κεραία μικροταινίας στα 2.4GHz εφόσον - η παράμετρος RL δεν φτάνει κοντά στα -10dB. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος θα γίνει βελτιστοποίηση (“Optimization”) της κεραίας, μια λειτουργία την οποία προσφέρει το ADS.

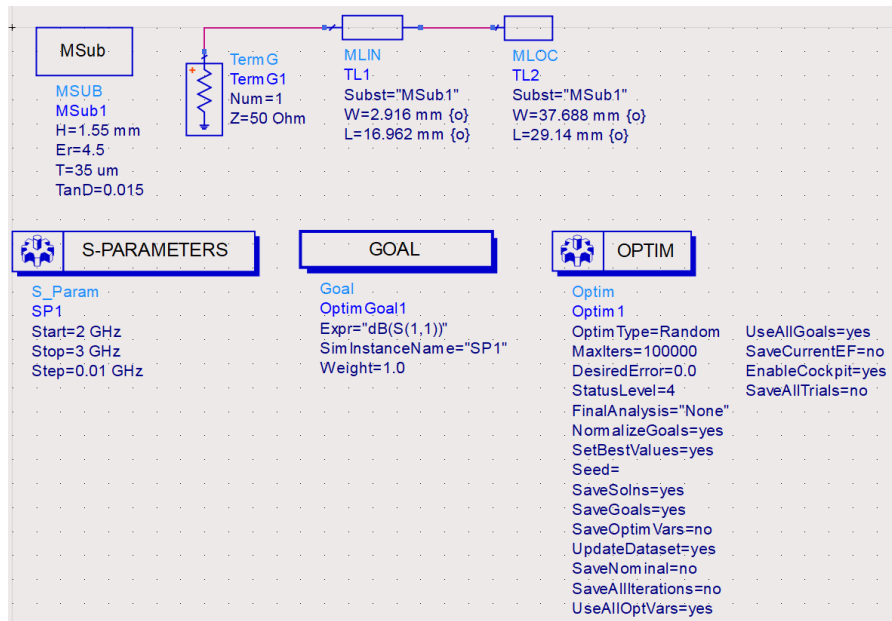
4.4 Βελτιστοποίηση ορθογώνιας κεραίας

Επιστρέφοντας στο σχηματικό, επιλέγουμε από τη βιβλιοθήκη “Optim/Stat/DOE” το στοιχείο “GOAL” και το τοποθετούμε στο σχηματικό. Κάνοντας διπλό κλικ στο “GOAL”, ανοίγουν οι ιδιότητες και χρειάζεται στο κελί “Expression” να πληκτρολογήσουμε την παράμετρο για την οποία θέλουμε να θέσουμε τον στόχο για καλύτερο αποτέλεσμα. Στην προκειμένη περίπτωση, γράφουμε “dB(S(1,1))” δηλαδή το διάγραμμα RL. Στο κελί “Analysis”, πληκτρολογούμε “SP1” και το κελί “Weight” το αφήνουμε 1. Επίσης, τσεκάρουμε στα “Sweep Variables” το κουτάκι “freq”. Στο πλαίσιο “Limit lines”, επιλέγουμε συγκεκριμένα τον στόχο που θέλουμε να έχουμε. Επειδή χρειάζεται το διάγραμμα RL να μας επιστρέψει τιμή μικρότερη του -10dB, θέτουμε στη στήλη “Max” την τιμή -15 και στη στήλη “Min” την τιμή -20 αφού πρώτα στην στήλη “Type” επιλέξουμε “Inside”. Επιπρόσθετα, εφόσον θέλουμε η κεραία μικροταινίας να λειτουργεί στα 2.4 GHz, περιορίζουμε περισσότερο τα όρια της συχνότητας. Οπότε, τοποθετούμε τις τιμές 2.39GHz και 2.41GHz στις στήλες “freq min” και “freq max” αντίστοιχα. Στο σχήμα 4.12 βλέπουμε τις ιδιότητες του “GOAL” όπως έχουν ρυθμιστεί.



Σχήμα 4.12 Ιδιότητες GOAL

Κατόπιν, για να ολοκληρωθεί η διαδικασία πριν την εκτέλεση της βελτιστοποίησης, χρειάζεται να τοποθετήσουμε από τη βιβλιοθήκη “Optim/Stat/DOE” το στοιχείο “OPTIM” στο σχηματικό. Κάνοντας διπλό κλικ στο “OPTIM” ανοίγουν οι ιδιότητες του και στο κελί “Number of iterations” βάζουμε την τιμή “100.000”. Αυτός είναι ο αριθμός επαναλήψεων που θα κάνει η βελτιστοποίηση του ADS με διαφορετικές διαστάσεις της κεραίας για να πετύχει ένα καλύτερο αποτέλεσμα. Στο σχήμα 4.13 απεικονίζεται το κύκλωμα του σχηματικού όπως έχει δημιουργηθεί για την βελτιστοποίηση.



Σχήμα 4.13 Σχηματικό βελτιστοποίησης κεραίας

Μετά, στην γραμμή εργαλείων του ADS και στην ενότητα “Simulate”, επιλέγουμε “Simulation Variables Setup...”. Έπειτα, επιλέγουμε την καρτέλα “Optimization”. Θέλουμε να κάνουμε βελτιστοποίηση στις διαστάσεις και των δύο στοιχείων της κεραίας, δηλαδή και στο patch και στην γραμμή μεταφοράς 50Ω. Συνεπώς, από το στοιχείο “TL2”(patch) τσεκάρουμε τα “W”(πλάτος) και “L”(μήκος) στην στήλη “Optimization” και το ίδιο κάνουμε και για το στοιχείο “TL1”(γραμμή μεταφοράς). Το σχήμα 4.14 δείχνει το παράθυρο του “Simulation Variables Setup...”.

Name	Optimize	Value	Unit	Format	Min/+/-	Unit	Max	Unit	Step	Unit
antenna_basic_lib:antenna_basicschematic										
TL2										
W	<input checked="" type="checkbox"/>	37.688	mm	min/max	1	mm	100	mm		
L	<input checked="" type="checkbox"/>	29.14	mm	min/max	1	mm	100	mm		
Wall1	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	min/max						
Wall2	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	min/max						
MSub1										
TL1										
W	<input checked="" type="checkbox"/>	2.916	mm	min/max	1	mm	100	mm		
L	<input checked="" type="checkbox"/>	16.962	mm	min/max	1	mm	100	mm		
Wall1	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	min/max						
Wall2	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	min/max						
TermG1										

Σχήμα 4.14 Simulation Variables Setup

Στις στήλες “Min” και “Max”, επιλέγουμε το εύρος των διαστάσεων για το οποίο θα γίνει η βελτιστοποίηση.

4.5 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος, χρειάστηκαν να γίνουν πολλές δοκιμές βελτιστοποίησης ανάλογα με το εύρος των διαστάσεων στις στήλες “Min” και “Max”. Επίσης, είναι αξιοσημείωτο ότι ακόμα και σε συγκεκριμένα εύρη διαστάσεων το αποτέλεσμα δεν είναι μοναδικό. Η

βελτιστοποίηση είναι μια τυχαία διαδικασία και κάθε φορά που πραγματοποιείται προτείνει διαφορετικές τιμές στις διαστάσεις τόσο του patch όσο και της γραμμής μεταφοράς 50Ω.

Εν τέλει, μετά από αρκετές δοκιμές στο ADS, καταγράφηκαν έξι βελτιστοποιημένες κεραίες. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αυτές οι έξι κεραίες (που αριθμούνται από #1 έως #6), μαζί με την κεραία όπως προέκυψε από τη θεωρητική σχεδίαση χωρίς βελτιστοποίηση (κεραία #0) για σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας διαστάσεων κεραιών

№ κεραιών	“TL2” W (mm)	“TL2” L (mm)	“TL1” W (mm)	“TL1” L (mm)
#0	37.688	29.14	2.916	16.962
#1	57.5	29	3	30
#2	57.5	58	3	29
#3	60	29.9917	2.5	16.9592
#4	70	59.7268	2	24.13
#5	60	59.9572	2.5	19.1796
#6	50	30.0833	2.5	17.6701

4.5.1 Βελτιστοποιημένη κεραία #1

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων:

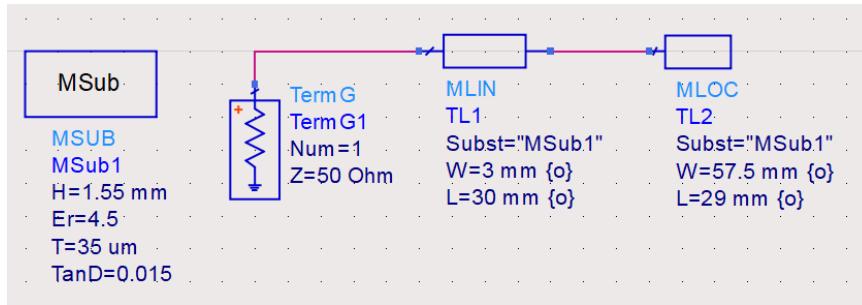
α) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 20mm και 60mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 20mm και 40mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

β) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

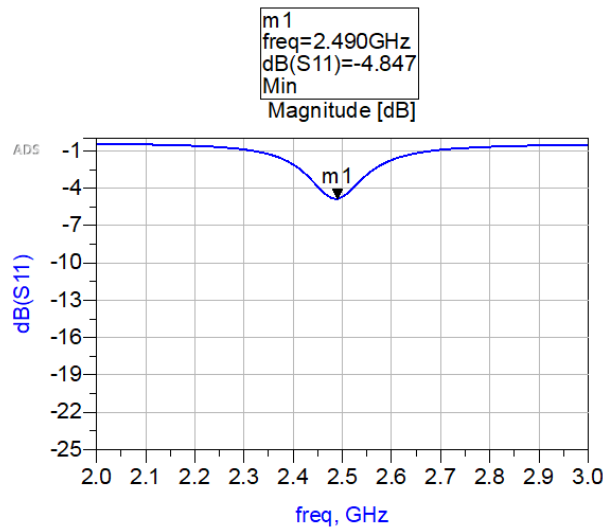
- για W: 2.5mm και 8mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 5mm και 32mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Αφού έχουμε πατήσει το “OK” στο παράθυρο του “Simulation Variables Setup...”, επιλέγουμε την επιλογή “Optimize” από την γραμμή εργαλείων του ADS. Αμέσως μετά, το ADS προσπαθεί να βρει την καλύτερη δυνατή λύση για την επίτευξη του στόχου που έχουμε θέσει στο “GOAL”. Εφόσον έχει τελειώσει η βελτιστοποίηση και πατήσουμε “Update Design”, το σχηματικό μας παραμετροποιείται. Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το σχηματικό με τις νέες διαστάσεις.



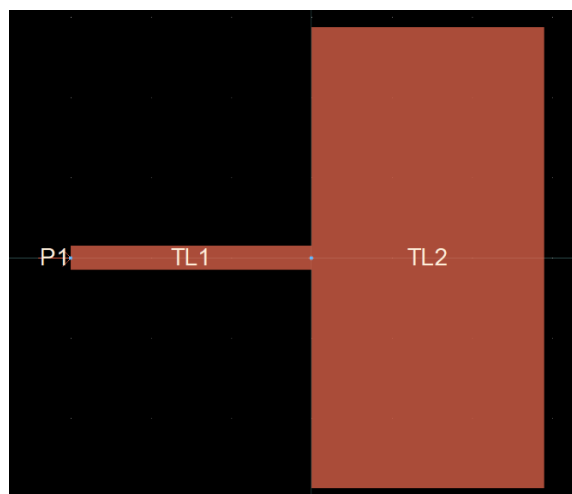
Σχήμα 4.15 Σχηματικό κεραίας #1

Στο σχήμα 4.16 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού.



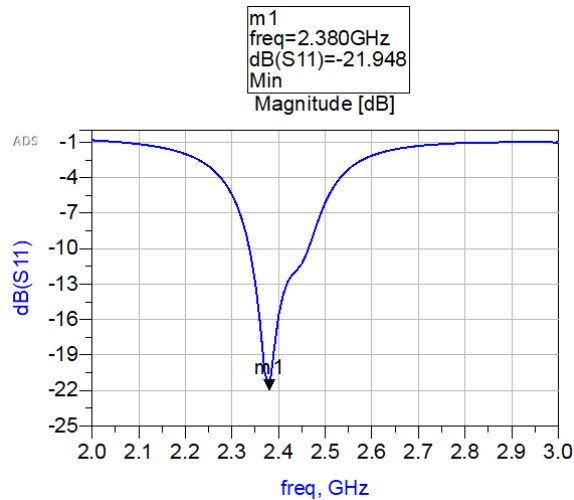
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα RL σχηματικού

Αν και το αποτέλεσμα του σχηματικού δεν είναι αυτό που θέλουμε, εξάγουμε το Layout καθώς τα διαγράμματα RL του σχηματικού και του Layout διαφέρουν. Στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται το Layout της κεραίας #1.



Σχήμα 4.17 Layout κεραίας #1

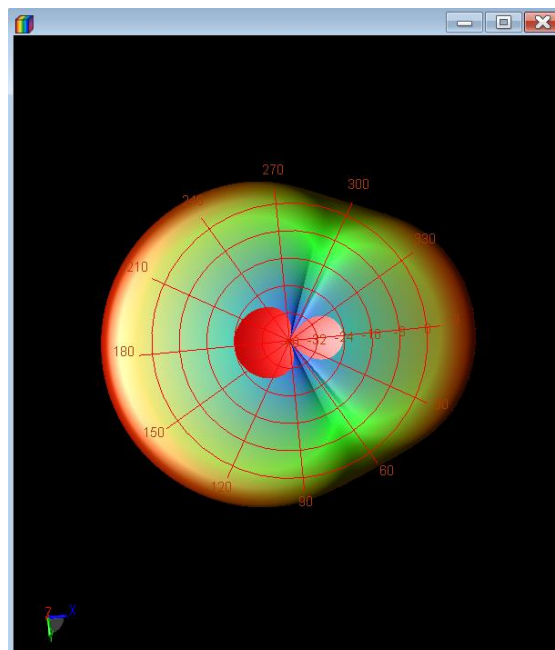
Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται το διάγραμμα RL του Layout.



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Όπως γίνεται φανερό, το Layout δίνει ένα πολύ καλό αποτέλεσμα στο διάγραμμα απωλειών επιστροφής. Έχει μια πολύ μικρή απόκλιση από την επιθυμητή συχνότητα των 2.4GHz αλλά οι απώλειες επιστροφής στη (νέα) κεντρική συχνότητα λειτουργίας (2.38GHz) είναι πολύ ικανοποιητικές για μια κεραία μικροταινίας. Οπότε αυτή η κεραία θεωρείται πολύ καλύτερη από την κεραία #0 και αξίζει να υλοποιηθεί.

Τα σχήματα 4.19 και 4.20 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.38GHz. Το διάγραμμα ακτινοβολίας διαφέρει λίγο από την κεραία #0 λόγω διαφορετικών διαστάσεων του patch αλλά δεν υπάρχουν δευτερεύοντες λοβοί. Παρατηρούμε ότι η απόδοση ακτινοβολίας στο 43.43% θεωρείται αρκετά ικανοποιητική για μια τέτοιου είδους κεραία.



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #1

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.38
Input power (Watts)	0.00249022
Radiated power (Watts)	0.00108171
Directivity(dBi)	6.41644
Gain (dBi)	2.79516
Radiation efficiency (%)	43.4382

Σχήμα 4.20 Χαρακτηριστικά κεραίας #1

4.5.2 Βελτιστοποιημένη κεραία #2

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων:

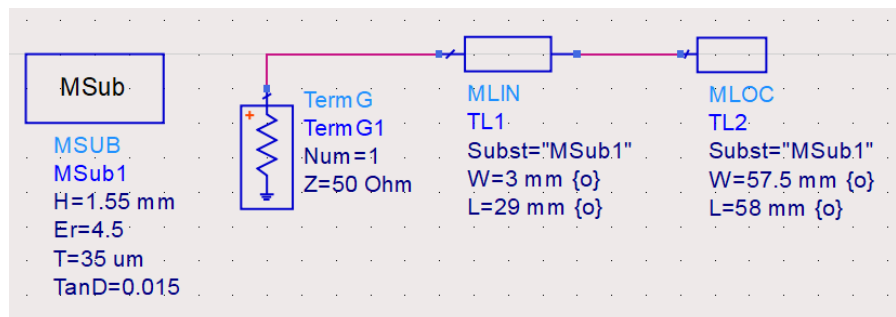
α) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 20mm και 60mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 20mm και 60mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

β) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

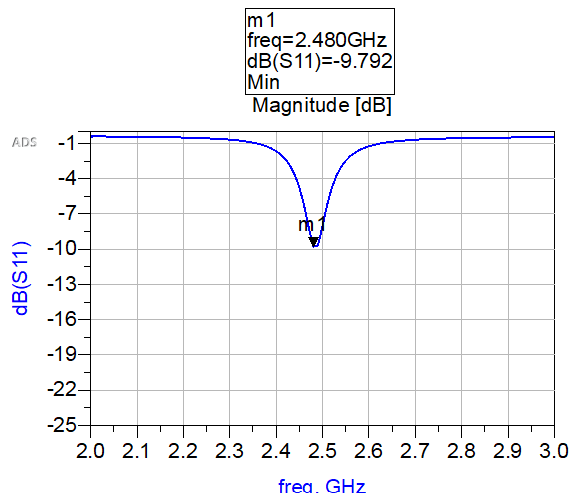
- για W: 2.5mm και 8mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 5mm και 30mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται το σχηματικό της κεραίας #2 με τις νέες διαστάσεις μετά την βελτιστοποίηση που έγινε.



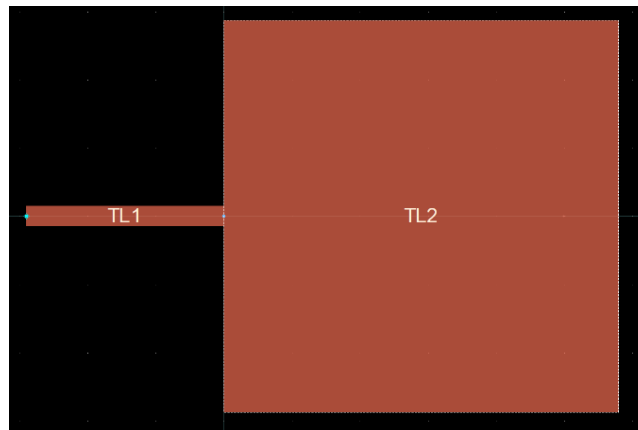
Σχήμα 4.21 Σχηματικό κεραίας #2

Στο σχήμα 4.22 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού.



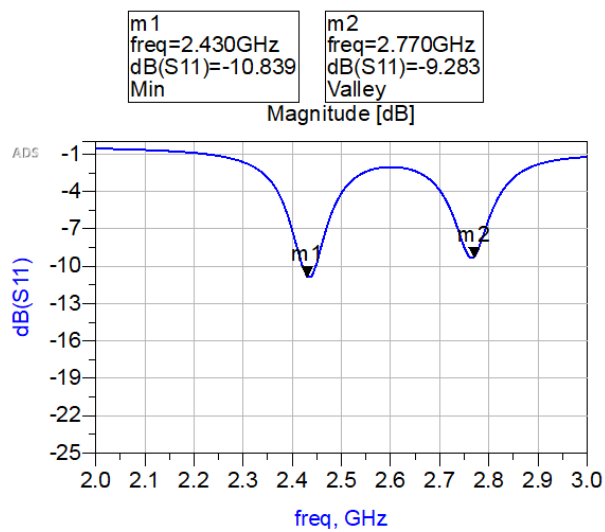
Σχήμα 4.22 Διάγραμμα RL σχηματικού

Σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα του σχηματικού είναι στα όρια του παρεδεκτού, οπότε εξάγουμε και το Layout που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.23.



Σχήμα 4.23 Layout κεραίας #2

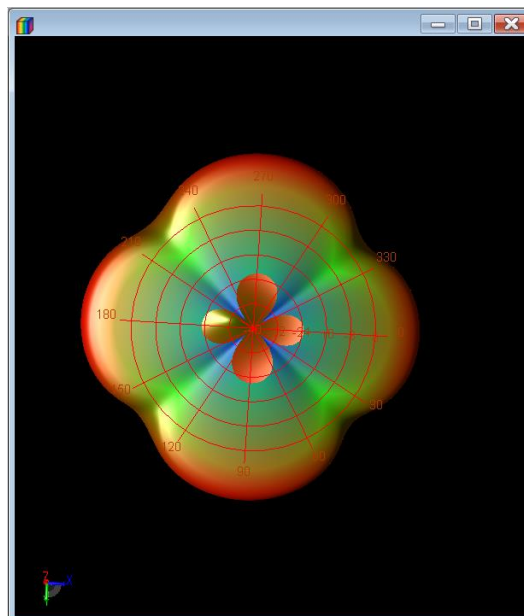
Στην εικόνα 4.24 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.



Σχήμα 4.24 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Σε αυτή την περίπτωση, το Layout δίνει ένα σχετικά μέτριο αποτέλεσμα στο διάγραμμα απωλειών επιστροφής, στα -10.8dB . Υπάρχουν δυο βυθίσματα στο διάγραμμα με συγκρίσιμο συντελεστή ανάκλασης που αρχικά δίνουν την εντύπωση ότι η κεραία λειτουργεί σε δύο συχνότητες, στα 2.43GHz και στα 2.77GHz . Οπότε, η κεραία αυτή δεν έχει τόσο επιθυμητή λειτουργία. Ωστόσο, επιλέγουμε να υλοποιήσουμε και αυτή την κεραία για να διαπιστώσουμε αν στην πράξη θα προκύψει όντως ένα διπλό βύθισμα ή αν η λειτουργία της θα είναι πιο κοντά σε εκείνη που προβλέπει το σχηματικό.

Τα σχήματα 4.25 και 4.26 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.43GHz . Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας δεν θεωρείται κατάλληλο για μια κεραία μικροταινίας. Παρουσιάζονται δύο πλευρικοί λοβοί. Οπότε η κεραία μπορεί να εκπέμπει στην συχνότητα που θα θέλαμε αλλά δεν είναι αποδοτική. Αυτό πιστοποιείται και από τα χαρακτηριστικά της κεραίας. Αν και η κατευθυντικότητα δεν διαφέρει πολύ σε σχέση με την κεραία #1, το κέρδος είναι υπερβολικά μικρό σε σχέση με την προηγούμενη κεραία. Η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας είναι αρκετά χαμηλή, στα 22% περίπου.



Σχήμα 4.25 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #2

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.43
Input power (Watts)	0.00227633
Radiated power (Watts)	0.000502603
Directivity(dBi)	6.72301
Gain (dBi)	0.162909
Radiation efficiency (%)	22.0795

Σχήμα 4.26 Χαρακτηριστικά κεραίας #2

4.5.3 Βελτιστοποιημένη κεραία #3

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων:

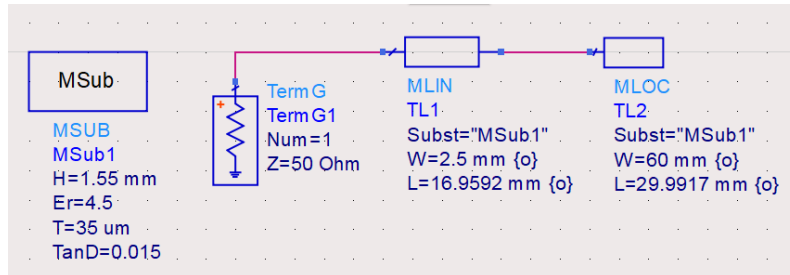
α) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 35mm και 60mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 26mm και 40mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

β) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

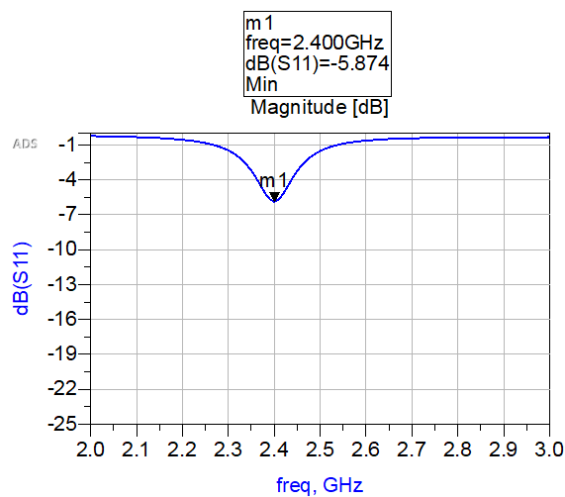
- για W: 2.5mm και 6mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 10mm και 32mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται το σχηματικό με τις νέες διαστάσεις μετά την βελτιστοποίηση που έγινε.



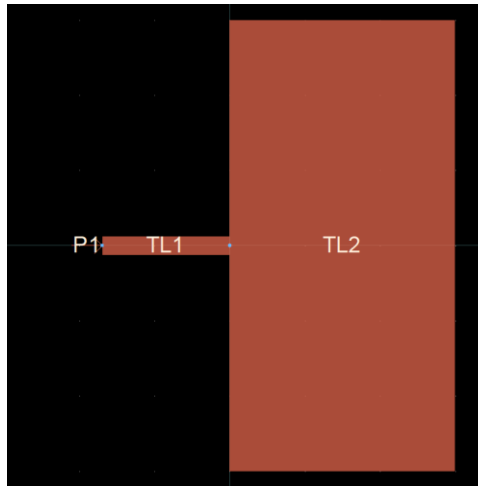
Σχήμα 4.27 Σχηματικό κεραίας #3

Στο σχήμα 4.28 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού.



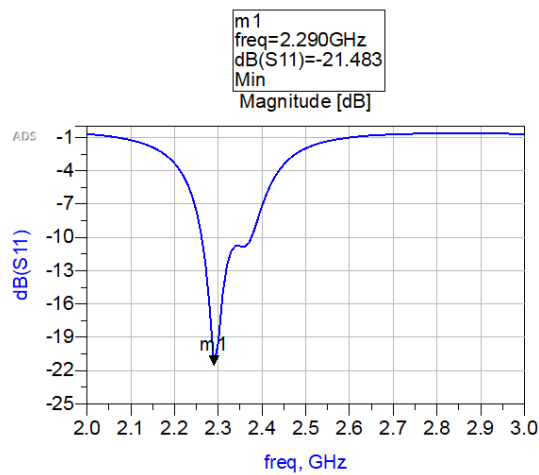
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα RL σχηματικού

Και σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα του σχηματικού δεν είναι ακριβώς αυτό που θα θέλαμε. Παρ’ όλα αυτά, εξάγουμε το Layout. Στο σχήμα 4.29 παρουσιάζεται το Layout της κεραίας #3.



Σχήμα 4.29 Layout κεραίας #3

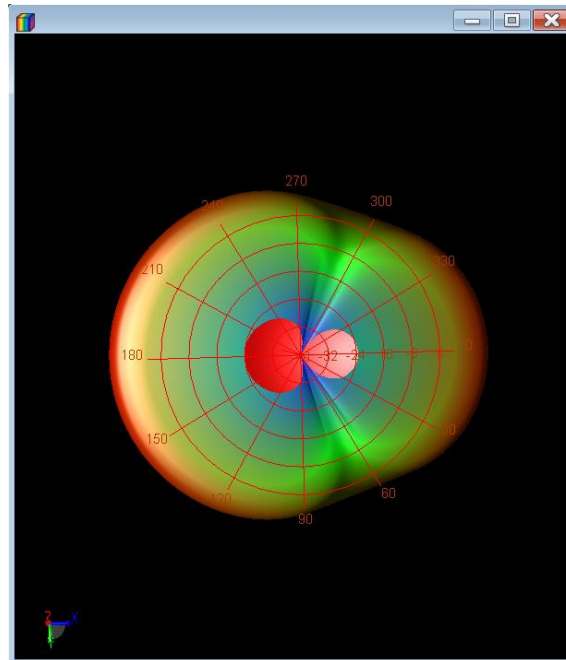
Στην εικόνα 4.30 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.



Σχήμα 4.30 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Σε αυτή την περίπτωση, το Layout δίνει ένα αποτέλεσμα στο διάγραμμα απωλειών επιστροφής παρόμοιο με αυτό της κεραίας #1 αλλά σε μια συχνότητα πιο μακρινή από την συχνότητα των 2.4GHz. Παρ' όλα αυτά, επιλέγεται να υλοποιηθεί αυτή η κεραία καθώς οι τρεις από τις τέσσερις διαστάσεις της είναι σχεδόν ίδιες με αυτές της κεραίας #0 που προέκυψε θεωρητικά.

Τα σχήματα 4.31 και 4.32 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.29GHz. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι παρόμοιο με αυτό της κεραίας #1. Το κέρδος, η κατευθυντικότητα και η απόδοση ακτινοβολίας διαφέρουν ελάχιστα από την κεραία #1.



Σχήμα 4.31 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #3

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.29
Input power (Watts)	0.00247039
Radiated power (Watts)	0.00105835
Directivity(dBi)	6.46813
Gain (dBi)	2.78678
Radiation efficiency (%)	42.8415

Σχήμα 4.32 Χαρακτηριστικά κεραίας #3

4.5.4 Βελτιστοποιημένη κεραία #4

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων:

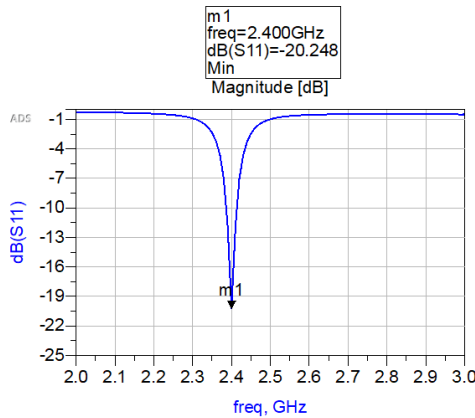
α) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 25mm και 70mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 25mm και 70mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

β) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

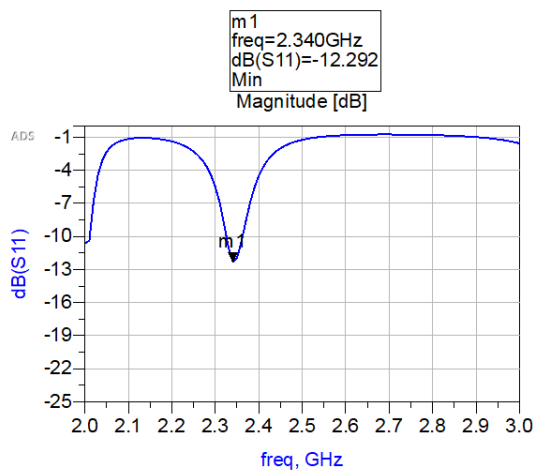
- για W: 2mm και 10mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 5mm και 30mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, προέκυψαν οι διαστάσεις που δίνονται στον πίνακα 4.1, ενώ στο σχήμα 4.33 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού. Σε αυτήν την περίπτωση, το διάγραμμα του σχηματικού θεωρείται πολύ καλό. Ωστόσο, έχοντας υπόψη την διαφορετικότητα του υπολογισμού της παραμέτρου S_{11} μεταξύ σχηματικού και Layout, χρειάζεται να ερευνησουμε και το διάγραμμα RL του Layout για να έχουμε μια πλήρη εικόνα της λειτουργίας της κεραίας.



Σχήμα 4.33 Διάγραμμα RL σχηματικού

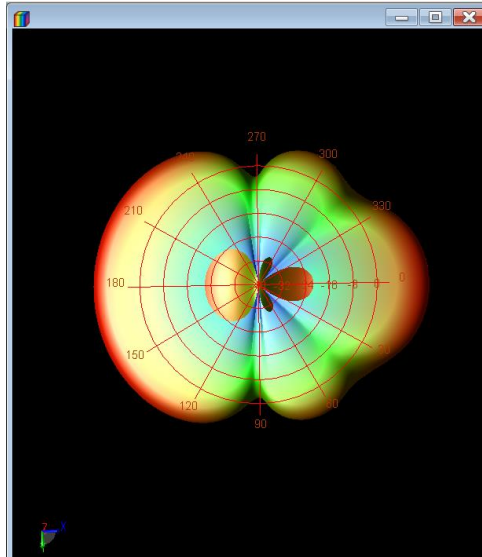
Στην εικόνα 4.34 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.



Σχήμα 4.34 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Σε αυτή την περίπτωση, το Layout έχει δύο βυθίσματα όπως στην περίπτωση της κεραίας #2. Το ένα βύθισμα βρίσκεται στη συχνότητα των 2.34 GHz ενώ το άλλο σε μια συχνότητα κοντά στα 2GHz. Άρα, η κεραία #4 δεν δίνει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα. Ιδιαίτερα σε αυτήν την κεραία, και τα δύο βυθίσματα ξεπερνάν τα -10dB οπότε είναι μεγαλύτερη η πιθανότητα να λειτουργεί η κεραία σταθερά σε δύο συχνότητες από ότι στην περίπτωση της κεραίας #2. Συνεπώς, αποφασίζεται να μην υλοποιηθεί αυτή η κεραία.

Τα σχήματα 4.35 και 4.36 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.34GHz. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας δεν είναι κατάλληλο μιας κεραίας μικροταινίας. Παρόλο που η κεραία είναι περισσότερο κατευθυντική από τις προηγούμενες κεραίες, οι πλευρικοί λοβοί καθιστούν την κεραία μη παραδεκτή. Επίσης, όπως γίνεται αντιληπτό από τα χαρακτηριστικά της κεραίας, το κέρδος είναι υπερβολικά μικρότερο και ως συνέπεια και η απόδοση ακτινοβολίας είναι πολύ μικρότερη από τις προηγούμενες κεραίες. Η απόδοση ακτινοβολίας είναι γύρω στο 15%.



Σχήμα 4.35 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #4

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.34
Input power (Watts)	0.00234217
Radiated power (Watts)	0.000367774
Directivity(dBi)	8.13827
Gain (dBi)	0.0979079
Radiation efficiency (%)	15.7023

Σχήμα 4.36 Χαρακτηριστικά κεραίας #4

4.5.5 Βελτιστοποιημένη κεραία #5

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων:

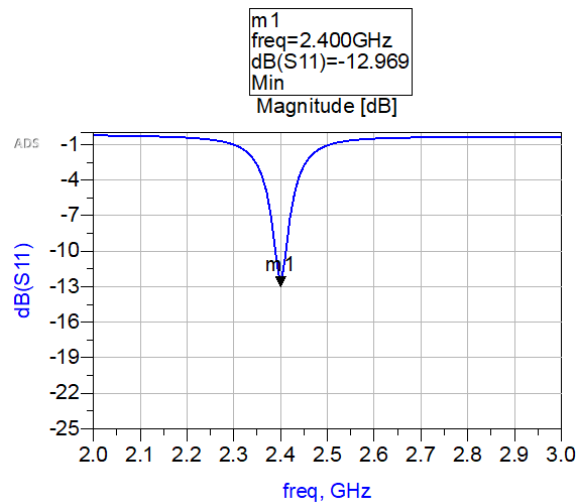
α) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 25mm και 60mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 25mm και 60mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

β) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

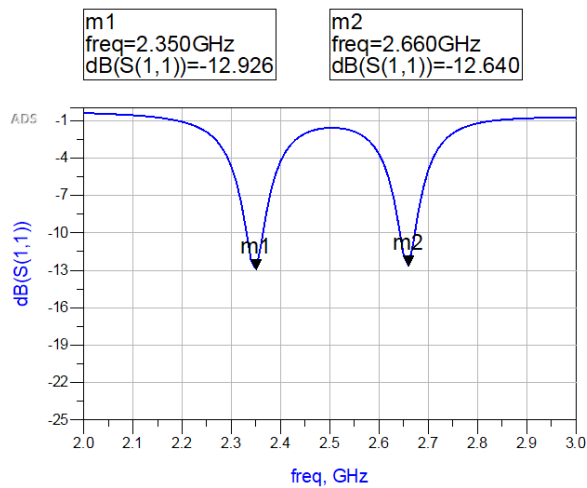
- για W: 2.5mm και 8mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 5mm και 32mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, προέκυψαν οι διαστάσεις που υπάρχουν στον πίνακα 4.1. Στο σχήμα 4.37 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού. Όπως και στην κεραία #4, το διάγραμμα του σχηματικού θεωρείται ικανοποιητικό και στην επιθυμητή συχνότητα. Ωστόσο, γίνεται διερεύνηση του διαγράμματος RL και του Layout για πιο έμπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.37 Διάγραμμα RL σχηματικού

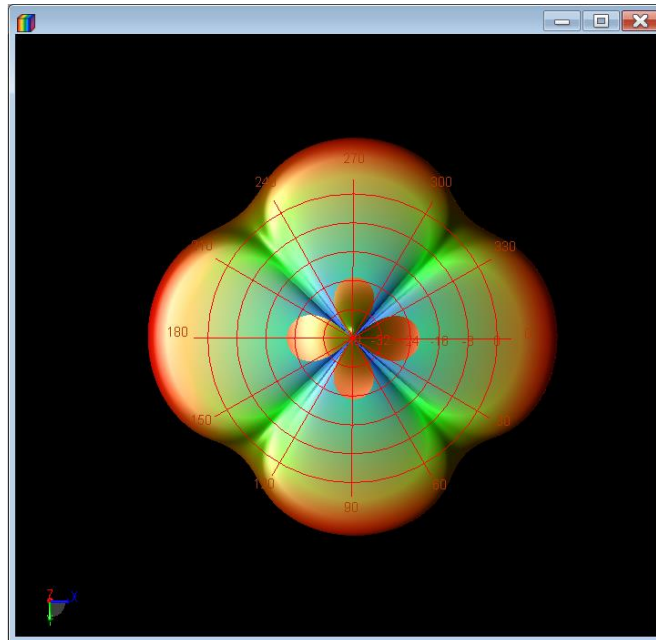
Στο σχήμα 4.38 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.



Σχήμα 4.38 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Σε αυτή την περίπτωση, το Layout δύο βυθίσματα. Το ένα βρίσκεται στη συχνότητα των 2.35 GHz ενώ το άλλο στην συχνότητα των 2.66 GHz. Συγκρίνοντας με τις προηγούμενες κεραίες, η κεραία #5 είναι σχεδόν παρόμοια με την κεραία #2 και #4. Όμως, και σε αυτήν την περίπτωση το μέγεθος των απωλειών επιστροφής είναι σχεδόν ίδιο και στις δύο συχνότητες. Άρα, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτή η κεραία λειτουργεί και στις δύο συχνότητες. Κατά συνέπεια, αυτή η κεραία δεν θεωρείται κατάλληλη για κατασκευή.

Στα σχήματα 4.39 και 4.40 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.35GHz. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι παρόμοιο με αυτό της κεραίας #2. Αυτό φαίνεται και στις παραμέτρους της κεραίας που δεν έχουν μεγάλη διαφορά από αυτές της κεραίας #2.



Σχήμα 4.39 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #5

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.35
Input power (Watts)	0.00237439
Radiated power (Watts)	0.0005131
Directivity(dBi)	6.99544
Gain (dBi)	0.341944
Radiation efficiency (%)	21.6098

Σχήμα 4.40 Χαρακτηριστικά κεραίας #5

4.5.6 Βελτιστοποιημένη κεραία #6

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων:

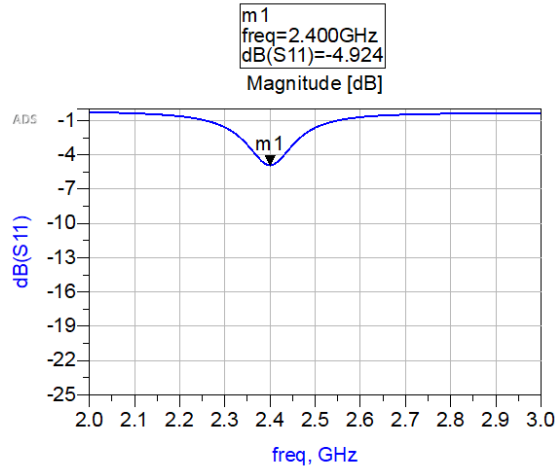
α) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 35mm και 50mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 25mm και 35mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

β) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

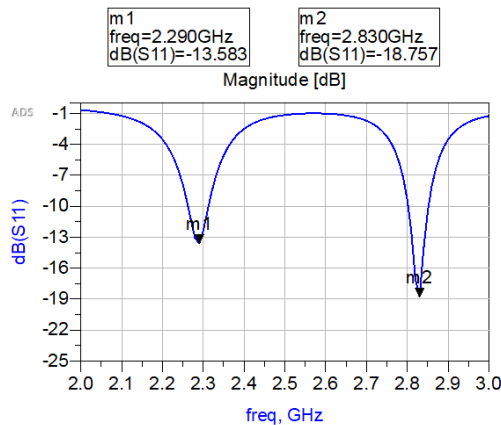
- για W: 2.5mm και 8mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 8mm και 25mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, προέκυψαν οι διαστάσεις που υπάρχουν στον πίνακα 4.1 για την κεραία #6. Στο σχήμα 4.41 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού. Παρατηρούμε ότι οι απώλειες επιστροφής είναι πολύ μικρές για μια κεραία μικροταινίας.



Σχήμα 4.41 Διάγραμμα RL σχηματικού

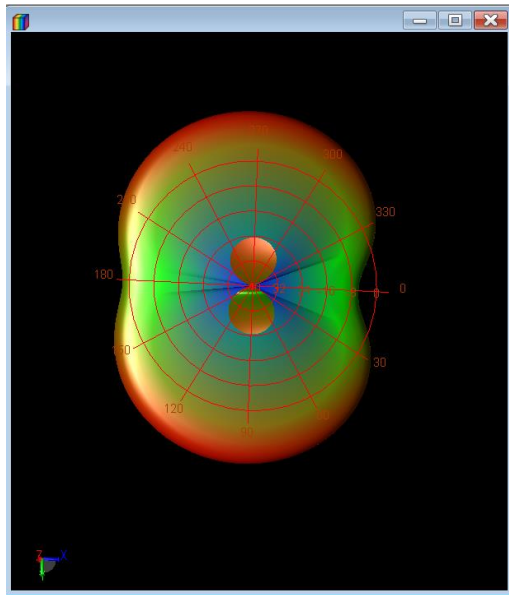
Στο σχήμα 4.42 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.



Σχήμα 4.42 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Σε αυτή την περίπτωση, το Layout έχει πάλι δύο βυθίσματα. Το ένα βρίσκεται στη συχνότητα των 2.29 GHz ενώ το άλλο στη συχνότητα 2.83 GHz. Αυτό δεν είναι επιθυμητό, καθώς και αυτή η κεραία λειτουργεί σε δύο συχνότητες. Ειδικά σε αυτή την περίπτωση, η κεραία έχει μεγαλύτερη απώλεια επιστροφής στην συχνότητα των 2.83 GHz. Άρα, αυτή είναι η κύρια συχνότητα λειτουργίας. Οπότε, είναι λογικό το συμπέρασμα ότι αυτή η κεραία δεν έχει τις προϋποθέσεις για κατασκευή.

Στα σχήματα 4.43 και 4.44 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.83GHz. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας #7 έχει μια πολύ σημαντική διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες κεραίες. Υπάρχει μια μετατόπιση της φάσης ακτινοβολίας της τάξης των 90° μοιρών, κάθετα στο άξονα x. Παρόλο που η κεραία είναι περισσότερο κατευθυντική από τις κεραίες #1 και #3, έχει πολύ χαμηλό κέρδος όπως δείχνει το σχήμα 4.44. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση ακτινοβολίας είναι μικρή και σε ποσοστό συγκρίσιμο με αυτά της κεραίας #2 και της #5.



Σχήμα 4.43 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #6

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.83
Input power (Watts)	0.00246773
Radiated power (Watts)	0.000582698
Directivity(dBi)	7.77088
Gain (dBi)	1.50232
Radiation efficiency (%)	23.6127

Σχήμα 4.44 Χαρακτηριστικά κεραίας #6

Έχοντας αναλύσει τις παραπάνω κεραίες, βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι κεραίες που αξίζει να κατασκευαστούν είναι οι κεραίες #1, #2 και #3 καθώς αυτές βγάζουν ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα κοντά στη συχνότητα των 2.4 GHz. Ωστόσο, όσον αφορά τις διαστάσεις των κεραιών είναι ενδιαφέρον ότι οι περισσότερες κεραίες διαφέρουν από την κεραία #0. Ειδικότερα, παρατηρούμε ότι η βελτιστοποίηση του ADS συχνά φτάνει τα όρια στα εύρη των διαστάσεων που είχαν τεθεί. Από τις κεραίες του πίνακα 4.1 είναι αξιοσημείωτο ότι μόνο η κεραία #3 καταφέρνει και βγάζει ένα σχετικά καλό αποτέλεσμα με τις 3 από τις 4 διαστάσεις των στοιχείων να είναι πολύ κοντά με αυτές της κεραίας #0.

4.6 Θεωρητική σχεδίαση ορθογώνιας κεραίας με χρήση προσαρμοστικής διάταξης

Ένας ακόμη τρόπος για να πετύχουμε καλύτερο συντελεστή ανάκλασης και κατά συνέπεια καλύτερη απόδοση ακτινοβολίας είναι η σωστή προσαρμογή των σύνθετων αντιστάσεων της γραμμής τροφοδοσίας ($Z_0 = 50\Omega$) και του patch της κεραίας ($Z_L = 311.29\Omega$). Οπότε μπορεί να παρεμβληθεί μια προσαρμοστική διάταξη μεταξύ της γραμμής μεταφοράς και της κεραίας. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τέτοια διάταξη είναι μια γραμμή μεταφοράς μήκους $\lambda/4$ που ονομάζεται μετασχηματιστής (ΜΣ) $\lambda/4$ και παρεμβάλλεται σε σειρά ώστε να τροποποιείται κατάλληλα το φορτίο της γραμμής μεταφοράς και να «μετασχηματίζεται» σε 50Ω . Οι διαστάσεις του patch και της γραμμής

μικροταινίας 50 Ω παραμένουν όπως έχουν υπολογιστεί στην παράγραφο 4.2. Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή Z_1 μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (3.4) ως εξής:

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 \times Z_L} = \sqrt{50 \times 311.29} = 124.75 \Omega$$

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων του ΜΣ $\lambda/4$ (πλάτος και μήκος) ισχύει η εξ. (3.1):

$$A = \frac{Z_1}{60} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) = \frac{124.75}{60} \cdot \sqrt{\frac{4.5 + 1}{2}} + \frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right) = 3.609$$

και επειδή $A > 1.52$, μπορούμε να βρούμε το πλάτος W_1 του ΜΣ $\lambda/4$ μέσω της εξ. (3.2) :

$$\frac{W_1}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \Rightarrow W_1 = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \times h = \frac{8e^{3.609}}{e^{2 \times 3.609} - 2} \times 1.55 = 0.336 \text{ mm}$$

Για να υπολογίσουμε το μήκος του ΜΣ $\lambda/4$, χρειάζεται να υπολογίσουμε πρώτα τη ενεργό διηλεκτρική σταθερά για την γραμμή του μετασχηματιστή:

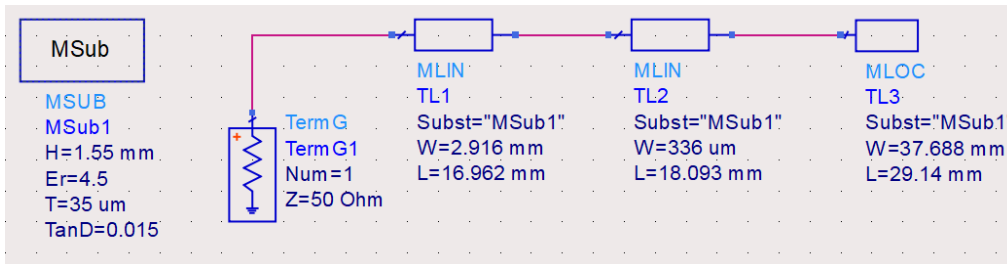
$$\epsilon_{re1} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_1} \right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1.55}{0.336} \right]^{-\frac{1}{2}} = 2.983$$

Το φυσικό μήκος του ΜΣ $\lambda/4$ l_1 θα είναι ίσο με $\lambda/4$. Άρα το ηλεκτρικό μήκος g_1 θα ισούται με $\pi/2$. Οπότε το μήκος L_1 υπολογίζεται από την σχέση (3.11) ως:

$$L_1 = \frac{g_1 \cdot c_0}{\omega \cdot \sqrt{\epsilon_{re1}}} = \frac{g_1 \cdot c_0}{2\pi f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{re1}}} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \lambda_0}{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_{re1}}} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{re1}}} = \frac{0.125}{4\sqrt{2.983}} = 18.093 \text{ mm}$$

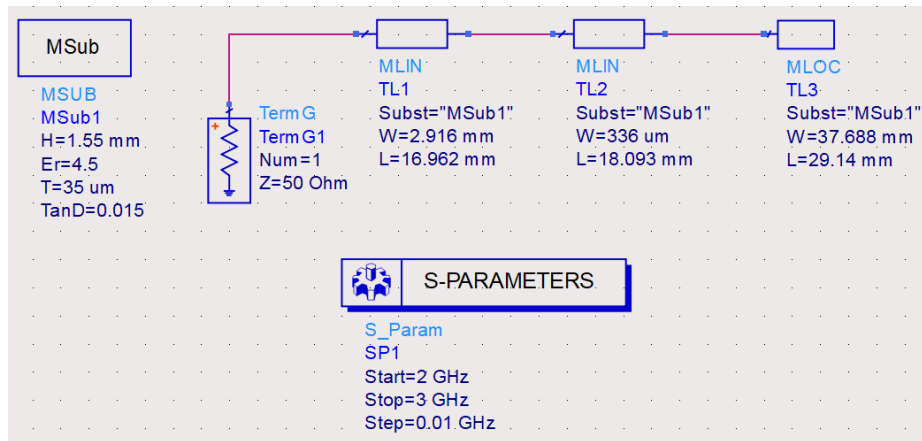
4.7 Προσομοίωση ορθογώνιας κεραίας με ΜΣ $\lambda/4$ χωρίς βελτιστοποίηση

Για την προσομοίωση αυτής της κεραίας μέσω του προγράμματος ADS, το μόνο που χρειάζεται να προσθέσουμε στο σχηματικό (σε σχέση με την προηγούμενη κεραία) είναι μια ακόμη γραμμή μικροταινίας “MLIN” ανάμεσα στην γραμμή μικροταινίας 50 Ω και στο patch της κεραίας. Στο σχήμα 4.45 παρουσιάζονται τα στοιχεία της κεραίας με ΜΣ $\lambda/4$ στο σχηματικό.



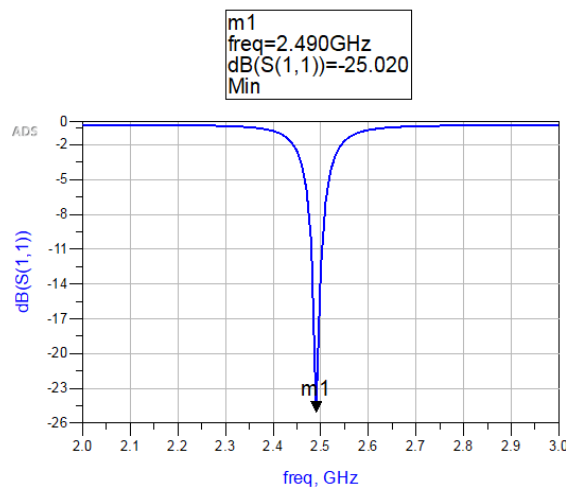
Σχήμα 4.45 Στοιχεία κεραίας μικροταινίας με ΜΣ $\lambda/4$

Στη συνέχεια, εφόσον έχουμε θέσει τις κατάλληλες παραμέτρους στο εξαρτήματα “SP” και MSUB”, επιλέγουμε την επιλογή “Simulate” από την γραμμή εργαλείων. Το σχήμα 4.46 δείχνει το τελικό κύκλωμα κεραίας με ΜΣ $\lambda/4$.



Σχήμα 4.46 Σχηματικό κεραίας μικροταινίας με ΜΣ λ/4

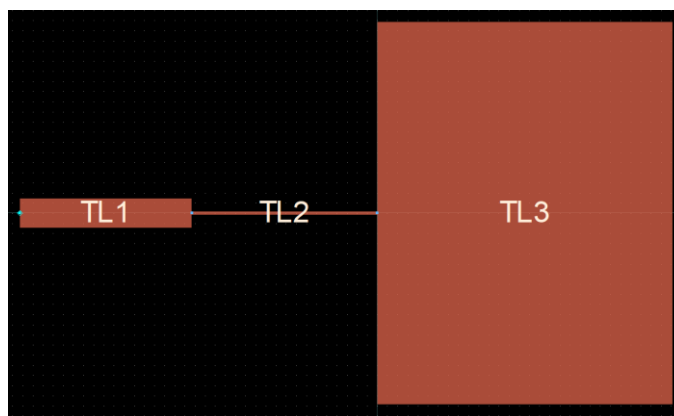
Στο σχήμα 4.47 εμφανίζεται το διάγραμμα με τις απώλειες επιστροφής σε dB.



Σχήμα 4.47 Διάγραμμα RL σχηματικού

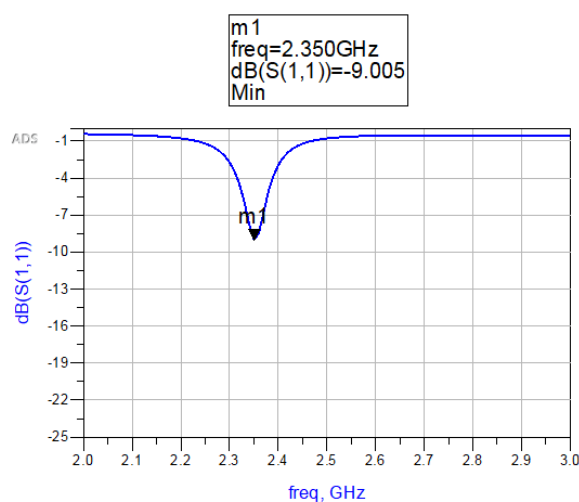
Παρατηρούμε ότι οι απώλειες επιστροφής στην συχνότητα των 2.49 GHz είναι κοντά στα -25 dB. Το βύθισμα είναι πολύ καλύτερο από τα άλλα σχηματικά (χωρίς ΜΣ λ/4) αλλά εξακολουθεί η συχνότητα λειτουργίας να είναι στα 2.49 GHz, όπως στην κεραία #0 χωρίς βελτιστοποίηση. Καθίσταται προφανές ότι η προσαρμογή λόγω του μετασχηματιστή βοηθάει αρκετά στην απόδοση της κεραίας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να δούμε και το αποτέλεσμα του Layout για να έχουμε μια πιο ρεαλιστική εικόνα της λειτουργίας της κεραίας.

Στο σχήμα 4.48 εμφανίζεται το παραγόμενο Layout με τον μετασχηματιστή λ/4.



Σχήμα 4.48 Layout κεραίας με $MΣ \lambda/4$

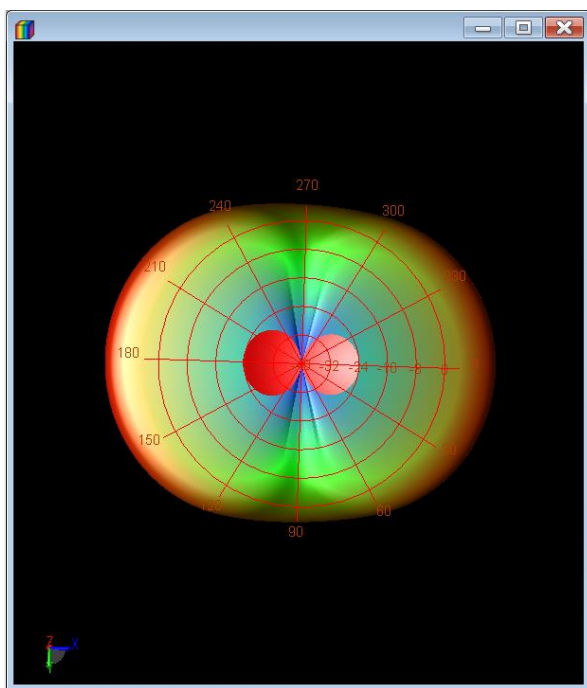
Εφόσον έχουμε καθορίσει τις ιδιότητες της πλακέτας από “Substrate Editor” και έχουμε θέσει τις κατάλληλες παραμέτρους στο “EM Simulation Settings”, γίνεται προσομοίωση του Layout. Στο σχήμα 4.49 εμφανίζεται το διάγραμμα RL.



Σχήμα 4.49 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Παρατηρούμε ότι στο αποτέλεσμα του Layout υπάρχει μια απόκλιση στη συχνότητα σε σχέση με αυτό του σχηματικού. Το πιο σημαντικό είναι, όμως, ότι οι απώλειες επιστροφής έχουν μέγεθος κοντά στα -9dB, πολύ λιγότερο από αυτό του σχηματικού. Συνεπώς, αυτό το αποτέλεσμα δεν μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλο για μια κεραία μικροταινίας.

Τα σχήματα 4.50 και 4.51 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.35GHz. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας δεν διαφέρει και πολύ από αυτά της κεραίας χωρίς $MΣ \lambda/4$ και χωρίς βελτιστοποίηση(κεραία #0). Από την άλλη πλευρά, τα χαρακτηριστικά της κεραίας είναι καλύτερα από την κεραία #0. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση της κεραίας είναι λίγο καλύτερη, γύρω στο 40%.



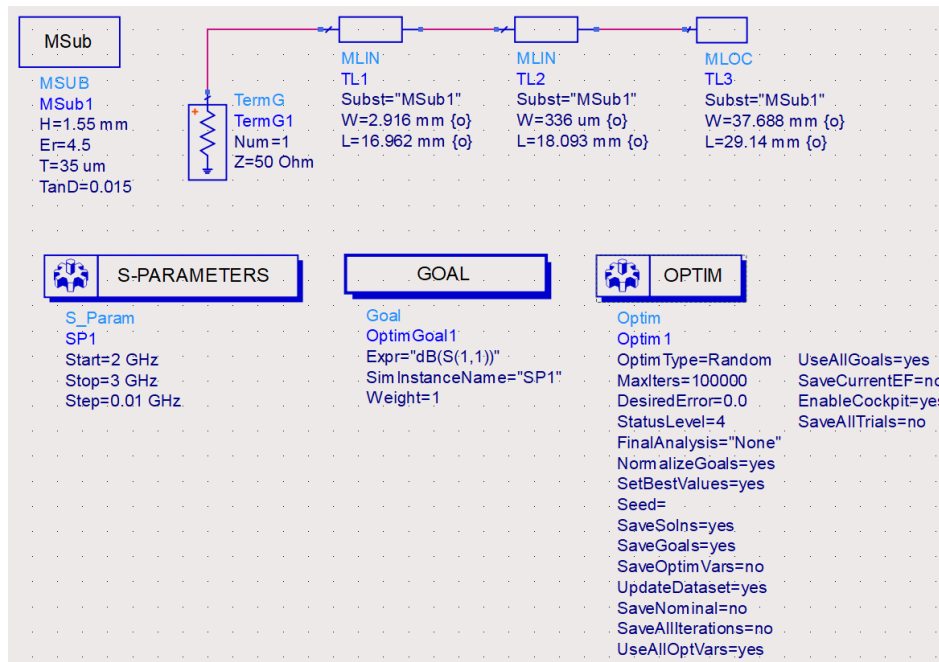
Σχήμα 4.50 Διάγραμμα ακτινοβολίας με ΜΣ λ/4

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.35
Input power (Watts)	0.00215702
Radiated power (Watts)	0.000868895
Directivity(dBi)	6.26636
Gain (dBi)	2.3175
Radiation efficiency (%)	40.2823

Σχήμα 4.51 Χαρακτηριστικά κεραίας με ΜΣ λ/4

4.8 Βελτιστοποίηση ορθογώνιας κεραίας με ΜΣ λ/4

Όπως και στην περίπτωση της ορθογώνιας κεραίας χωρίς προσαρμογή, έτσι και σε αυτόν τον τύπο κεραίας θα χρειαστεί να γίνει βελτιστοποίηση μέσω του ADS. Έχοντας θέσει τις ίδιες παραμέτρους στο στοιχείο “GOAL” και “OPTIM” όπως κάναμε και στην παράγραφο 4.4, καταλήγουμε στο σχηματικό του σχήματος 4.52.



Σχήμα 4.52 Σχηματικό βελτιστοποίησης κεραίας με ΜΣ λ/4

Έπειτα, στο παράθυρο του “Simulation Variables Setup...”, επιλέγουμε την καρτέλα “Optimization”. Όπως δείχνει το σχήμα 4.53 επιλέγουμε και τα τρία στοιχεία της κεραίας.

Name	Optimize	Value	Unit	Format	Min/+/-	Unit	Max	Unit	Step	Unit
HighFreqForTanD	<input type="checkbox"/>	1.0	THz	min/max						
TL3										
W	<input checked="" type="checkbox"/>	37.688	mm	min/max	18.8	mm	56.5	mm		
L	<input checked="" type="checkbox"/>	29.14	mm	min/max	14.6	mm	43.7	mm		
Wall1	<input type="checkbox"/>	1.0E+30	mil	min/max						
Wall2	<input type="checkbox"/>	1.0E+30	mil	min/max						
TL2										
W	<input checked="" type="checkbox"/>	336	um	min/max	168	um	504	um		
L	<input checked="" type="checkbox"/>	18.093	mm	min/max	9.05	mm	27.1	mm		
Wall1	<input type="checkbox"/>	1.0E+30	mil	min/max						
Wall2	<input type="checkbox"/>	1.0E+30	mil	min/max						
TL1										
W	<input checked="" type="checkbox"/>	2.916	mm	min/max	1.46	mm	4.37	mm		
L	<input checked="" type="checkbox"/>	16.962	mm	min/max	8.48	mm	25.4	mm		
Wall1	<input type="checkbox"/>	1.0E+30	mil	min/max						
Wall2	<input type="checkbox"/>	1.0E+30	mil	min/max						

Σχήμα 4.53 Simulation Variables Setup

4.9 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με ΜΣ λ/4

Για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος, χρειάστηκαν να γίνουν πολλές δοκιμές βελτιστοποίησης ανάλογα με το εύρος των διαστάσεων στις στήλες “Min” και “Max” και των τριών στοιχείων της κεραίας. Εν τέλει, μετά από αρκετές δοκιμές στο ADS, καταγράφηκαν τρεις βελτιστοποιημένες κεραίες. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται αυτές οι τρεις κεραίες (#8-#10) μαζί με την κεραία με ΜΣ λ/4 όπως προέκυψε από τη θεωρητική σχεδίαση (κεραία #7 χωρίς βελτιστοποίηση) για σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 4.2 Συγκεντρωτικός πίνακας διαστάσεων κεραιών με $MΣ \lambda/4$

№ κεραιών	“TL3” W (mm)	“TL3” L (mm)	“TL2” W (μm)	“TL2” L (mm)	“TL1” W (mm)	“TL1” L (mm)
#7	37.688	29.14	336	18.093	2.916	16.962
#8	59.98	29.72	492	26.012	4.23	30
#9	50	30.14	687.9	16.86	2.58	27
#10	37.56	28.52	510.3	18.09	2.85	20.6

4.9.1 Βελτιστοποιημένη κεραία #8

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων για την κεραία:

α) Όσον αφορά το στοιχείο TL3 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 25mm και 60mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 20mm και 45mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

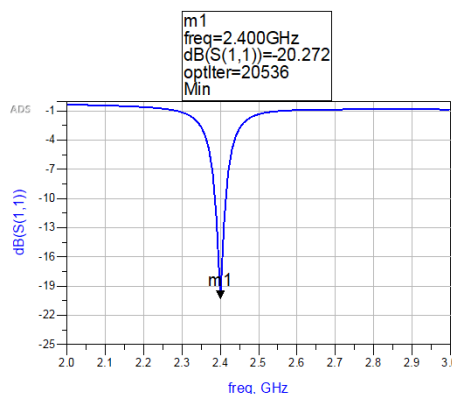
β) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 200μm και 700μm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 7mm και 32mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

γ) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

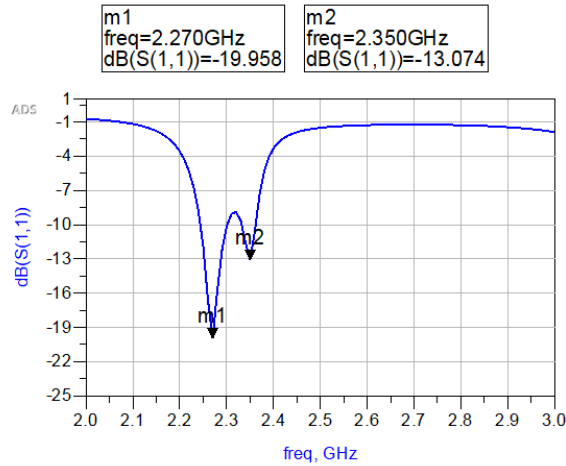
- για W: 2.5mm και 6mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 5mm και 30mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, προέκυψαν οι διαστάσεις που υπάρχουν στον πίνακα 4.2. Στο σχήμα 4.54 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού. Είναι αξιοσημείωτο ότι το διάγραμμα είναι πολύ καλύτερο από τα προηγούμενα διαγράμματα σχηματικών και χωρίς μετατόπιση συχνότητας.



Σχήμα 4.54 Διάγραμμα RL σχηματικού

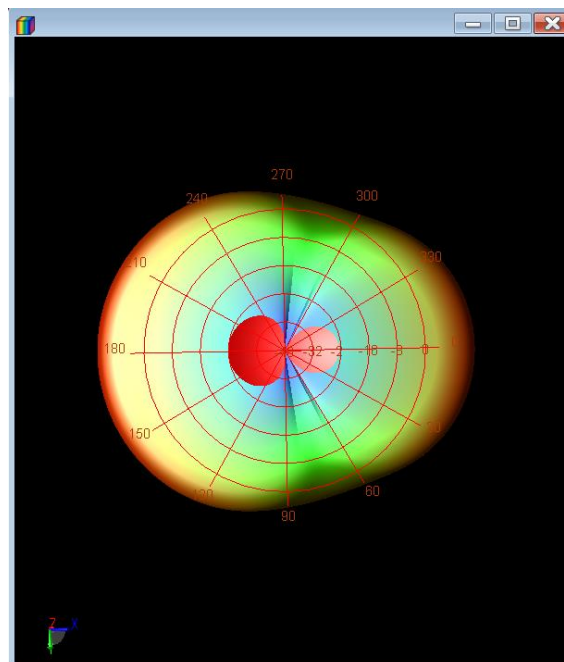
Στο σχήμα 4.55 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.



Σχήμα 4.55 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Σε αυτή την περίπτωση, το Layout δύο βυθίσματα. Το ένα βρίσκεται στη συχνότητα των 2.27 GHz ενώ το άλλο στην συχνότητα των 2.35 GHz. Το μέγεθος των απωλειών επιστροφής και στις δύο συχνότητες είναι συγκρίσιμο. Άρα, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτή η κεραία λειτουργεί και στις δύο συχνότητες. Κατά συνέπεια, αυτή η κεραία δεν θεωρείται κατάλληλη για κατασκευή.

Στα σχήματα 4.56 και 4.57 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.27GHz. Από τα δύο αυτά σχήματα παρατηρούμε ότι η κεραία είναι περισσότερο κατευθυντική και έχει μεγαλύτερο κέρδος από την κεραία #0. Συνεπώς, έχει μεγαλύτερη απόδοση ακτινοβολίας, κοντά στο 45%.



Σχήμα 4.56 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #8

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.27
Input power (Watts)	0.00247675
Radiated power (Watts)	0.00112909
Directivity(dBi)	7.01615
Gain (dBi)	3.60462
Radiation efficiency (%)	45.5877

Σχήμα 4.57 Χαρακτηριστικά κεραίας #8

4.9.2 Βελτιστοποιημένη κεραία #9

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων για την κεραία:

α) Όσον αφορά το στοιχείο TL3 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 30mm και 40mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 29mm και 40mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

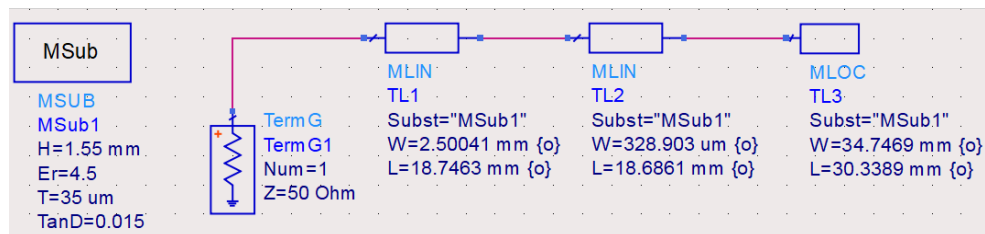
β) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 250μm και 350μm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 18mm και 25mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

γ) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

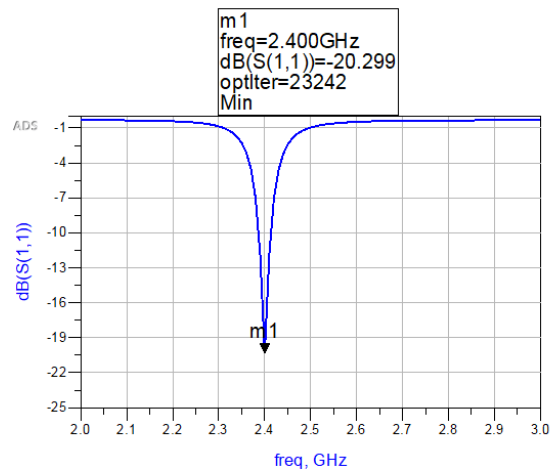
- για W: 2.5mm και 6mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 15mm και 25mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Στο σχήμα 4.58 παρουσιάζεται το σχηματικό με τις νέες διαστάσεις μετά την βελτιστοποίηση που έγινε.



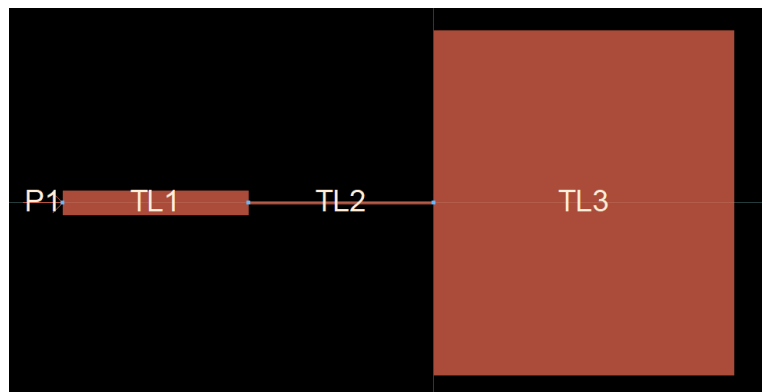
Σχήμα 4.58 Σχηματικό κεραίας #9

Στο σχήμα 4.59 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού. Είναι αξιοσημείωτο ότι το διάγραμμα του σχηματικού είναι παρόμοιο με αυτό του σχηματικού της κεραίας #8.



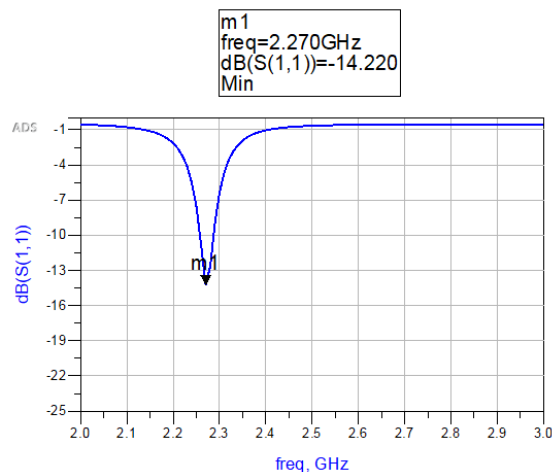
Σχήμα 4.59 Διάγραμμα RL σχηματικού

Στο σχήμα 4.60 παρουσιάζεται το Layout της κεραίας #9.



Σχήμα 4.60 Layout κεραίας #9

Στο σχήμα 4.61 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.

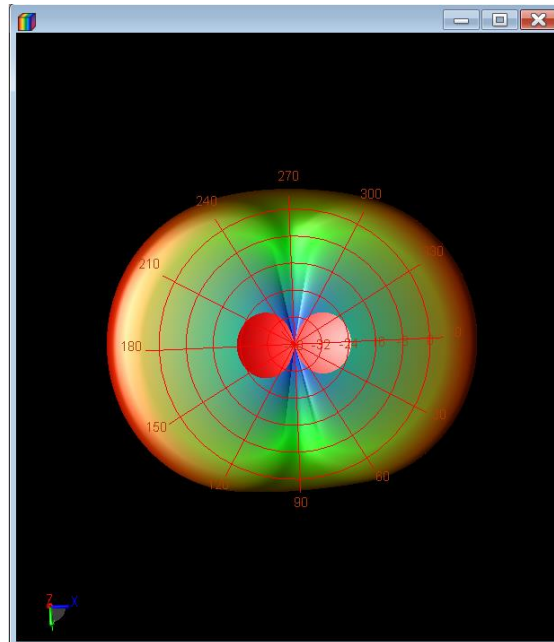


Σχήμα 4.61 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Σε αυτή την περίπτωση, το Layout έχει ένα βύθισμα στη συχνότητα των 2.27GHz και γύρω στα -14dB ως απώλειες επιστροφής. Αν και η συχνότητα δεν είναι πολύ κοντά στα 2.4GHz, η κεραία δεν έχει κάποιο άλλο βύθισμα σε κάποια άλλη συχνότητα. Επίσης, οι διαστάσεις αυτής της κεραίας είναι σχετικά

κοντά με την κεραία #0, δηλαδή είναι κοντά στις θεωρητικές τιμές που προέκυψαν από τους μαθηματικούς τύπους. Για αυτό, θα είχε ένα ενδιαφέρον να κατασκευαστεί η συγκριμένη κεραία.

Στα σχήματα 4.62 και 4.63 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας στην συχνότητα των 2.27GHz. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα χαρακτηριστικά της κεραίας #9 είναι παρόμοια με αυτά της κεραίας #7. Η διαφορά τους βρίσκεται στο κέρδος, όπου το κέρδος (άρα και η απόδοση) είναι λίγο μικρότερο από αυτό της της κεραίας #7.



Σχήμα 4.62 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #9

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.27
Input power (Watts)	0.00237702
Radiated power (Watts)	0.000905146
Directivity(dBi)	6.16968
Gain (dBi)	1.97654
Radiation efficiency (%)	38.079

Σχήμα 4.63 Χαρακτηριστικά κεραίας #9

4.9.3 Βελτιστοποιημένη κεραία #10

Σε αυτήν την κεραία επιλέχθηκαν τα εξής εύρη διαστάσεων:

α) Όσον αφορά το στοιχείο TL3 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 20mm και 60mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 14mm και 45mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

β) Όσον αφορά το στοιχείο TL2 έγινε η εξής επιλογή:

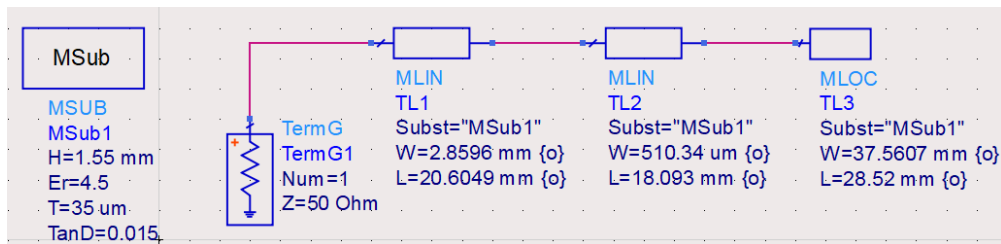
- για W: 250μm και 800μm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και
- για L: 10mm και 28mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

γ) Όσον αφορά το στοιχείο TL1 έγινε η εξής επιλογή:

- για W: 2.5mm και 8mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα και

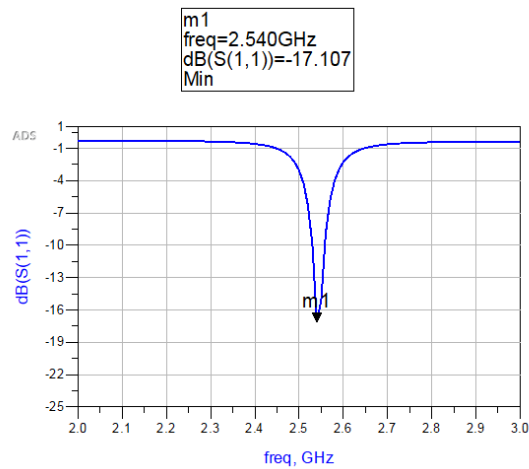
- για L: 8.5mm και 25mm στα “Min” και “Max” αντίστοιχα

Στο σχήμα 4.64 παρουσιάζεται το σχηματικό με τις νέες διαστάσεις μετά την βελτιστοποίηση που έγινε.



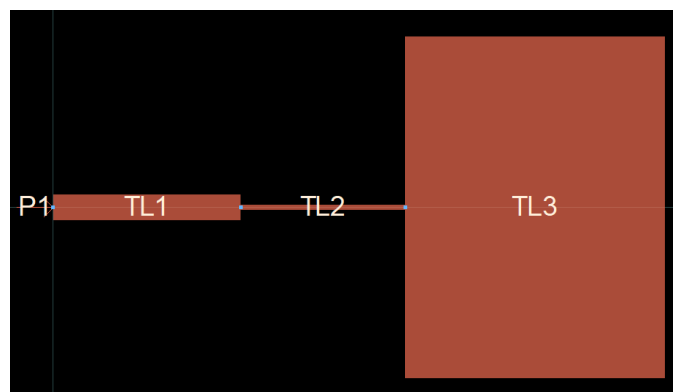
Σχήμα 4.64 Σχηματικό κεραίας #10

Στο σχήμα 4.65 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του σχηματικού.



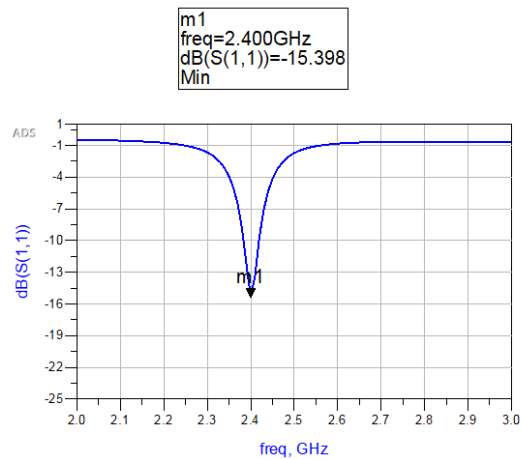
Σχήμα 4.65 Διάγραμμα RL σχηματικού

Σε αυτή την περίπτωση το διάγραμμα RL δεν πετυχαίνει τη συχνότητα των 2.4GHz. Παρ' όλα αυτά, εξάγουμε το Layout. Στο σχήμα 4.66 παρουσιάζεται το Layout της κεραίας #10.



Σχήμα 4.66 Layout κεραίας #10

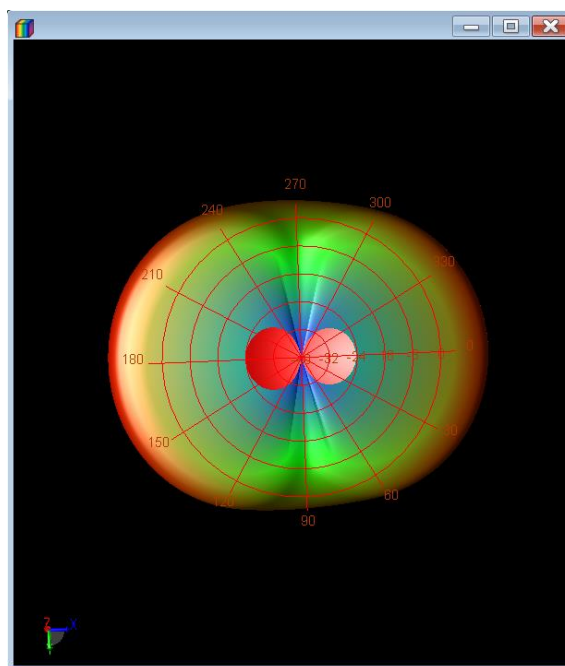
Στο σχήμα 4.67 εμφανίζεται το διάγραμμα RL του Layout.



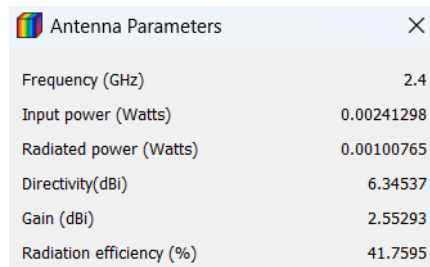
Σχήμα 4.67 Διάγραμμα RL μέσω Layout

Σε αυτή την περίπτωση, το Layout δίνει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα όσον αφορά την συχνότητα και το μέγεθος απωλειών επιστροφής. Το βύθισμα βρίσκεται ακριβώς στη συχνότητα των 2.4GHz και φτάνει τα -15.3dB. Ως αποτέλεσμα, η κεραία #10 θεωρείται κατάλληλη και μπορεί να υλοποιηθεί.

Στα σχήματα 4.68 και 4.69 δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας αντίστοιχα στην συχνότητα των 2.4GHz. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι παρόμοιο με αυτό της κεραίας #7 και #9. Από την άλλη, το κέρδος, η κατευθυντικότητα και η απόδοση ακτινοβολίας διαφέρουν λίγο από την κεραία #8. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο που η κεραία #10 έχει ποσοστό απόδοσης κοντά στο 40% και στην συχνότητα 2.4 GHz.



Σχήμα 4.68 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας #10



Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.4
Input power (Watts)	0.00241298
Radiated power (Watts)	0.00100765
Directivity(dBi)	6.34537
Gain (dBi)	2.55293
Radiation efficiency (%)	41.7595

Σχήμα 4.69 Χαρακτηριστικά κεραίας #10

Έχοντας αναλύσει τις παραπάνω κεραίες, βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι κεραίες με ΜΣ λ/4 που αξίζει να κατασκευαστούν είναι οι κεραίες #9 και #10 καθώς αυτές βγάζουν ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα κοντά στη συχνότητα των 2.4 GHz. Όσον αφορά τις διαστάσεις των κεραιών είναι ενδιαφέρον ότι οι κεραίες #8 και #9 διαφέρουν αρκετά από την κεραία #7 χωρίς βελτιστοποίηση. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι η βελτιστοποίηση συχνά φτάνει τα όρια στα εύρη των διαστάσεων που έχουν τεθεί. Από την άλλη πλευρά, είναι αξιοσημείωτο ότι η κεραία #10 καταφέρνει και βγάζει ένα πολύ καλό αποτέλεσμα χωρίς να διαφοροποιείται αρκετά από τις διαστάσεις της κεραίας #7.

Κεφάλαιο 5ο: Κατασκευή και μέτρηση τυπωμένων ορθογωνικών κεραιών

5.1 Κατασκευή κεραιών και ρύθμιση φασματικού αναλυτή

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των βελτιστοποιημένων κεραιών με ή χωρίς ΜΣ $\lambda/4$, οι κατάλληλες κεραιές για υλοποίηση είναι αυτές που καταγράφονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας κεραιών προς κατασκευή

<u>№ κεραιάς</u>	<u>Συχνότητα (GHz)</u> (σύμφωνα με το Layout)	<u>RL (dB)</u> (σύμφωνα με το Layout)
#1	2.38	21.94
#2	2.43	10.83
#3	2.29	21.48
#9	2.27	14.22
#10	2.4	15.39

Η κατασκευή των κεραιών γίνεται σε πλακέτα FR4 διπλής όψης της Bungard. Πρόκειται για μια φωτοευαίσθητη πλακέτα με τις εξής ιδιότητες:

- Διηλεκτρική σταθερά υποστρώματος $\epsilon_r = 4.5$
- Πάχος χαλκού $\tau = 35\mu m$
- Πάχος διηλεκτρικού $h = 1.55m$
- Απώλειες διηλεκτρικού $\tan \delta = 0.015$

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή των κεραιών στις πλακέτες είναι η εκτύπωση του κάθε Layout σε φιλμ. Επειδή αυτή η διαδικασία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του ADS, γίνεται η εξαγωγή του αρχείου Layout από το ADS σε μορφή DXF. Κατόπιν, μέσω του προγράμματος AutoCAD αποθηκεύεται σε μορφή pdf και τέλος δίνεται για εκτύπωση.

Το δεύτερο βήμα είναι η τύπωση των Layout πάνω στις πλακέτες. Αρχικά, η κάθε πλακέτα της κάθε κεραιάς τροχίζεται και κόβεται σε συγκεκριμένες διαστάσεις σύμφωνα με τις σχέσεις (3.12) και (3.13) της παραγράφου 3.4. Μετά, τοποθετείται το φιλμ πάνω στην πλακέτα και τοποθετείται η πλακέτα με το φιλμ ανάμεσα σε δύο γυάλινες πλάκες. Έπειτα, οι δύο γυάλινες πλάκες εισέρχονται σε μια στεγανή κατασκευή η οποία έχει μέσα μια λάμπα υπεριώδους ακτινοβολίας (UV). Για περίπου 5 λεπτά, η λάμπα UV ακτινοβολεί την πλακέτα με σκοπό την φωτοδιάλυση. Στη συνέχεια, η πλακέτα βυθίζεται διαδοχικά σε δύο ειδικές λεκάνες οι οποίες περιέχουν ειδικά χημικά και έτσι προκαλείται η αποχάλκωση της πλακέτας. Τέλος, στεγνώνεται και καθαρίζεται.

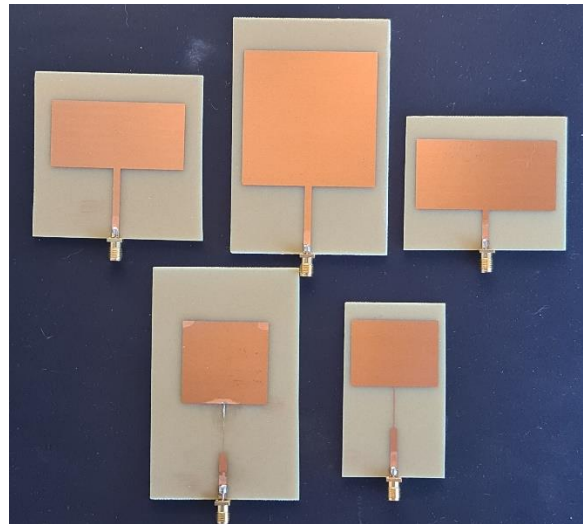
Το τρίτο βήμα είναι η σύνδεση της κάθε κεραιάς (πλακέτας) με έναν κονέκτορα. Ο κονέκτορας που χρησιμοποιείται είναι τύπου SMA – θηλυκός όπως δείχνει το σχήμα 5.1. Ο συγκεκριμένος κονέκτορας είναι κατάλληλος για σύνδεση με γραμμή μικροταινίας/ μεταφοράς 50Ω και έχει εξωτερική διάμετρο 5

mm με συχνότητα λειτουργίας μέχρι τα 6 GHz. Πριν την σύνδεση του κονέκτορα τροχίζονται τα δύο πάνω ακριανά ποδαράκια του. Για την ένωση του SMA κονέκτορα πάνω στην γραμμή μικροταινίας 50 Ω της κάθε κεραίας χρησιμοποιείται καλάι και κολλητήρι με μεγάλη προσοχή για την αποφυγή βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 5.1 Θηλυκός κονέκτορας SMA

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι 5 κεραίες που κατασκευάστηκαν.



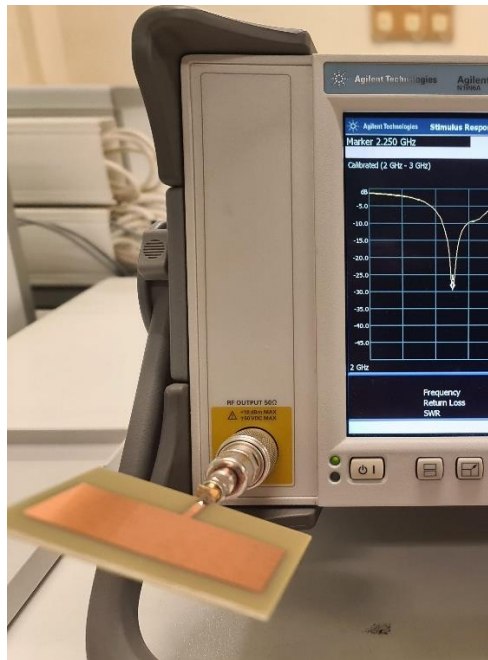
Σχήμα 5.2 Ορθογώνιες κεραίες μικροταινίας

Ο φασματικός αναλυτής που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των απωλειών επιστροφής RL (συντελεστής ανάκλασης), του λόγου στάσιμου κύματος (VSWR) και του εύρους ζώνης (BW) είναι της εταιρίας Agilent. Η μέτρηση πραγματοποιείται ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Για να θέσουμε τον αναλυτή σε λειτουργία μέτρησης του συντελεστή ανάκλασης, πιέζουμε το πλήκτρο **“Mode”, “Stimulus/Response”, “Meas”, “Return Loss”**.
- Ορίζουμε την αρχική και τελική συχνότητα. Όσον αφορά την αρχική συχνότητα, πιέζουμε το πλήκτρο **“FREQ Channel”, “Start Freq”** και πληκτρολογούμε 2 GHz. Παρόμοια, για την τελική συχνότητα πιέζουμε το πλήκτρο **“FREQ Channel”, “Stop Freq”** και πληκτρολογούμε 3 GHz.
- Απενεργοποιείται η λειτουργία Averaging πιέζοντας το πλήκτρο **“Meas Setup”, “Avg Mode”, “Off”**.
- Πραγματοποιείται η διαδικασία της βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση είναι απαραίτητη για έγκυρες μετρήσεις. Η εν λόγω διαδικασία πραγματοποιείται συνδέοντας στον αναλυτή, διαδοχικά, «πρότυπα» φορτία για τα οποία είναι γνωστή, θεωρητικά, η απόκριση. Ο αναλυτής ρυθμίζει έτσι τις εσωτερικές παραμέτρους του, ώστε να εκτελεί ακριβείς μετρήσεις για τα «γνωστά» αυτά φορτία. Στη συνέχεια, είναι σε θέση να εκτελεί ακριβείς μετρήσεις και για άλλα, «άγνωστα», φορτία. Για την

βαθμονόμηση πιέζουμε το πλήκτρο “**FREQ Channel**”, “**Calibrate**” και ακολουθούμε τις οδηγίες που εμφανίζονται στην οθόνη. Συνδέουμε διαδοχικά στον αναλυτή τα 3 πρότυπα φορτία (ανοιχτό κύκλωμα, βραχυκύκλωμα και 50Ω) που περιλαμβάνονται στο σετ βαθμονόμησης (calibration kit). Με το τέλος της διαδικασίας βαθμονόμησης εμφανίζεται στο πάνω αριστερό μέρος της οθόνης η ένδειξη «Calibrated» και δίπλα, σε παρένθεση, η περιοχή συχνοτήτων (2-3 GHz).

Εφόσον έχουν γίνει τα παραπάνω βήματα, συνδέεται η κάθε κεραία στην έξοδο “RF OUTPUT 50Ω” του αναλυτή όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε κεραία ξεχωριστά.

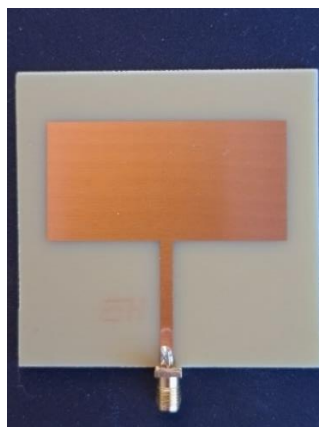


Σχήμα 5.3 Τρόπος μέτρησης σε φασματικό αναλυτή

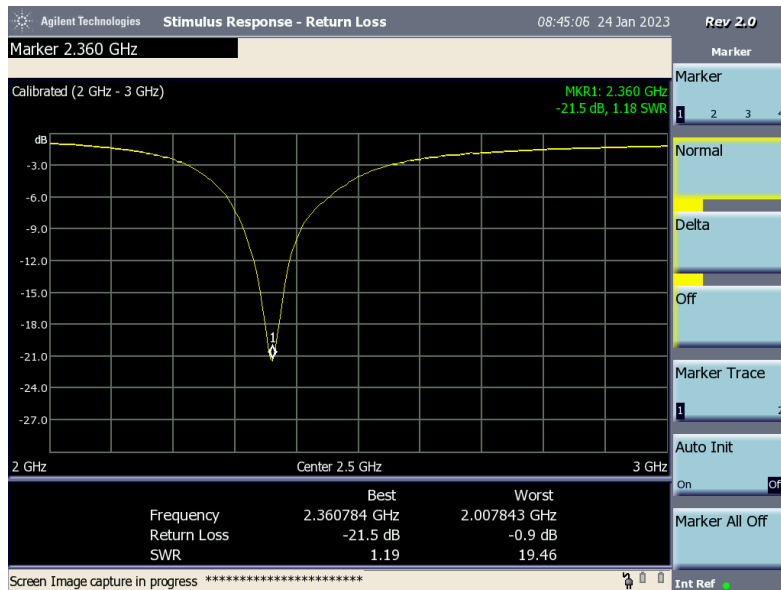
5.2 Μετρήσεις κεραιών

5.2.1 Κεραία #1

Στο σχήμα 5.4 απεικονίζεται η κεραία #1, ενώ το σχήμα 5.5 δείχνει το διάγραμμα RL της κεραίας #1 όπως μετρήθηκε από τον αναλυτή.



Σχήμα 5.4 Κεραία #1

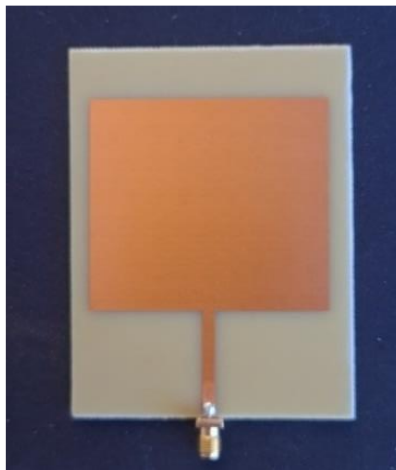


Σχήμα 5.5 Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή

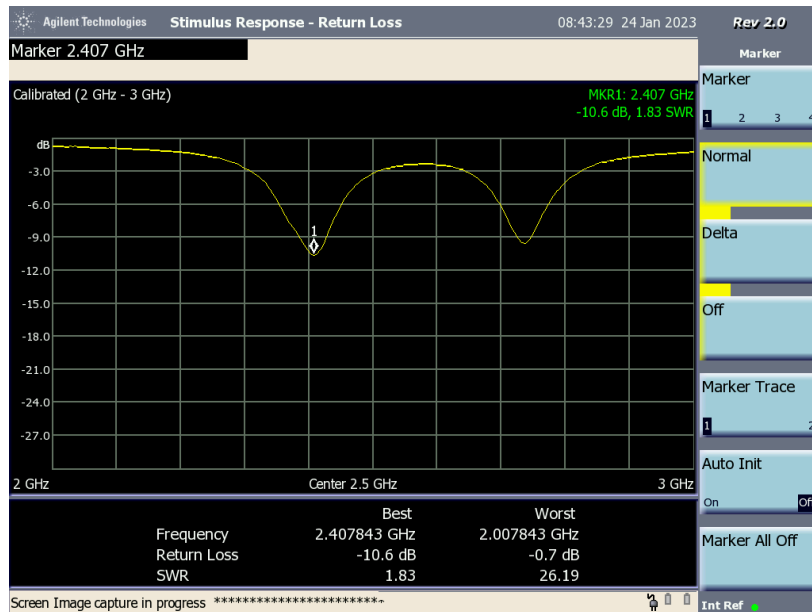
Σύμφωνα με το σχήμα 5.5, η κεραία λειτουργεί στα 2.36 GHz με τις απώλειες επιστροφής να ισούνται με -21.5dB. Ο λόγος στάσιμου κύματος (VSWR) είναι ίσος με 1.19 στη συχνότητα λειτουργίας. Τα αποτελέσματα κρίνονται πολύ ικανοποιητικά δεδομένου ότι η κατασκευή της κεραίας είναι ερασιτεχνική και πραγματοποιήθηκε με αποχάλκωση και όχι με χαράκτη πλακετών που είναι η ενδεδειγμένη μέθοδος για τέτοιες κεραίες. Το εύρος ζώνης της κεραίας (ορίζοντάς το ως την περιοχή συχνοτήτων όπου $RL < -10dB$) προκύπτει λίγο μικρότερο από 100MHz, το οποίο είναι επίσης ικανοποιητικό αφού είναι γνωστό ότι τέτοιες κεραίες έχουν γενικά στενό εύρος ζώνης[2]. Σύμφωνα με την σχέση (2.29), το ποσοστό στενής ζώνης ισούται με 3.6%. Συγκρίνοντας το σχήμα 5.5 με το διάγραμμα RL του ADS (σχήμα 4.18), τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν τόσο πολύ. Υπάρχει μια μικρή μετατόπιση της συχνότητας κατά 0.2GHz περίπου. Αντίθετα, όπως και στην περίπτωση του Layout, το διάγραμμα RL του αναλυτή διαφέρει αρκετά από αυτό του σχηματικού.

5.2.2 Κεραία #2

Στο σχήμα 5.6 απεικονίζεται η κεραία #2 και στο σχήμα 5.7 φαίνεται το διάγραμμα RL της κεραίας #2 όπως μετρήθηκε από τον αναλυτή.



Σχήμα 5.6 Κεραία #2

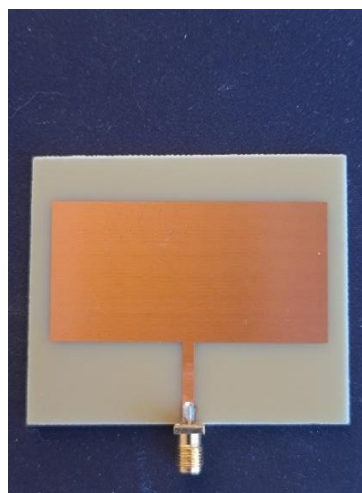


Σχήμα 5.7 Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή

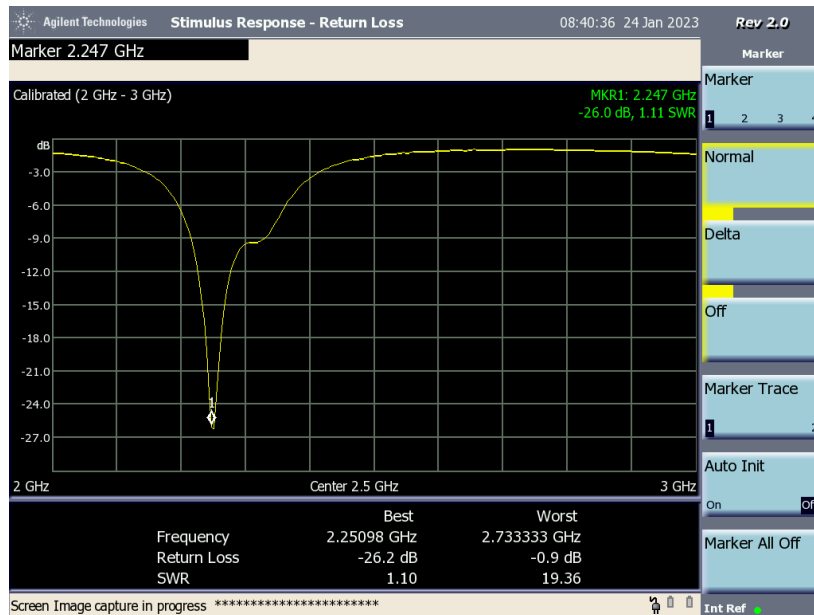
Όπως είναι αναμενόμενο από τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από την προσομοίωση με το ADS, η κεραία εμφανίζει δύο βυθίσματα: στα 2.4 GHz με τις απώλειες επιστροφής να ισούνται με -10.6dB και στη συχνότητα των 2.73GHz με τον συντελεστή ανάκλασης να ισούται με -9.5dB. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά που προέκυψαν από το ADS(σχήμα 4.24). Ωστόσο, οι τιμές αυτές για τις απώλειες επιστροφής είναι οριακά παραδεκτές. Πρακτικά, για την κεραία αυτή δεν μπορεί να οριστεί καν εύρος ζώνης δεδομένου ότι δεν υπάρχουν τιμές του RL μικρότερες από -10dB. Συνεπώς, επαληθεύεται το συμπέρασμα ότι η κεραία δεν είναι κατάλληλη για λειτουργία.

5.2.3 Κεραία #3

Στο σχήμα 5.8 απεικονίζεται η κεραία #3 και στο σχήμα 5.9 φαίνεται το διάγραμμα RL της κεραίας #3 όπως μετρήθηκε από τον αναλυτή.



Σχήμα 5.8 Κεραία #3

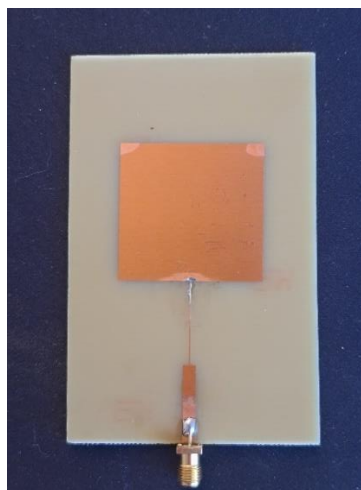


Σχήμα 5.9 Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.9, η κεραία #3 λειτουργεί στα 2.25 GHz με τις απώλειες επιστροφής να ισούνται με -26.2dB, περίπου 5dB περισσότερο από την τιμή του RL του ADS (σχήμα 4.30). Επίσης, υπάρχει και μια μετατόπιση 0.05 GHz σε σχέση με το ADS όπως δείχνει και ο πίνακας 5.1. Ο λόγος στάσιμου κύματος (VSWR) είναι ίσος με 1.10 στη συχνότητα λειτουργίας. Το εύρος της κεραίας προκύπτει λίγο μικρότερο από 75MHz, λίγο πιο στενό από την κεραία #1. Σύμφωνα με την σχέση (2.29), το ποσοστό στενής ζώνης ισούται με 3.33%.

5.2.4 Κεραία #9

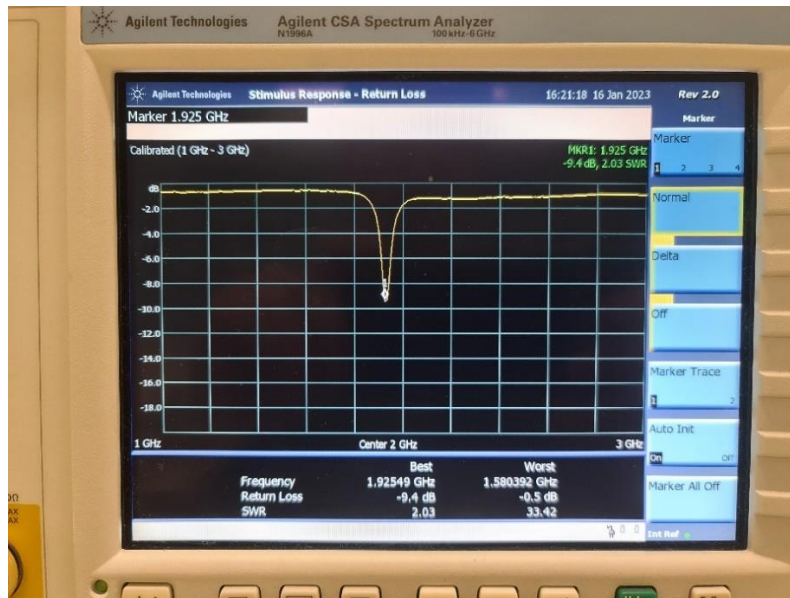
Στο σχήμα 5.10 απεικονίζεται η κεραία #9.



Σχήμα 5.10 Κεραία #9

Σε αυτήν την κεραία υπήρξε ένα πρόβλημα στο τελικό σχέδιο όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10. Μετά την κατασκευή της κεραίας παρατηρήθηκε διακοπή της συνέχειας στη γραμμή μικροταινίας του ΜΣ λ/4, οπότε ήταν πρακτικά ανοιχτό κύκλωμα. Αυτό συνέβη γιατί το πλάτος αυτής της γραμμής είναι πολύ μικρό. Ως αποτέλεσμα, δεν μπόρεσε η UV ακτινοβολία να αποτυπώσει πλήρως τον ΜΣ λ/4. Το μόνο

που μπόρεσε να γίνει ήταν η ένωση αυτού του σημείου με την υπόλοιπη κεραία μέσω καλάι. Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα RL της κεραίας #9 μετά την διόρθωση.

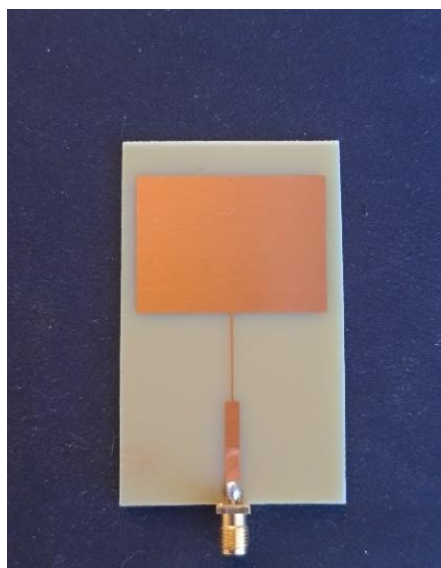


Σχήμα 5.11 Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.11, η κεραία #9 δεν λειτουργεί σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ADS (σχήμα 4.61). Οι απώλειες επιστροφής οριακά αγγίζουν τα -10dB και αυτό σε συχνότητα πολύ μακριά από τα 2.4GHz. Βέβαια, αυτό είναι κάτι το αναμενόμενο αφού με την επιπρόσθετη κόλληση στον μετασχηματιστή $\lambda/4$ αλλάζουν οι ιδιότητες της κεραίας, ανεξάρτητα από τις διαστάσεις της. Επομένως, η κεραία αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι πληροί τις στοιχειώδεις προδιαγραφές για λειτουργία.

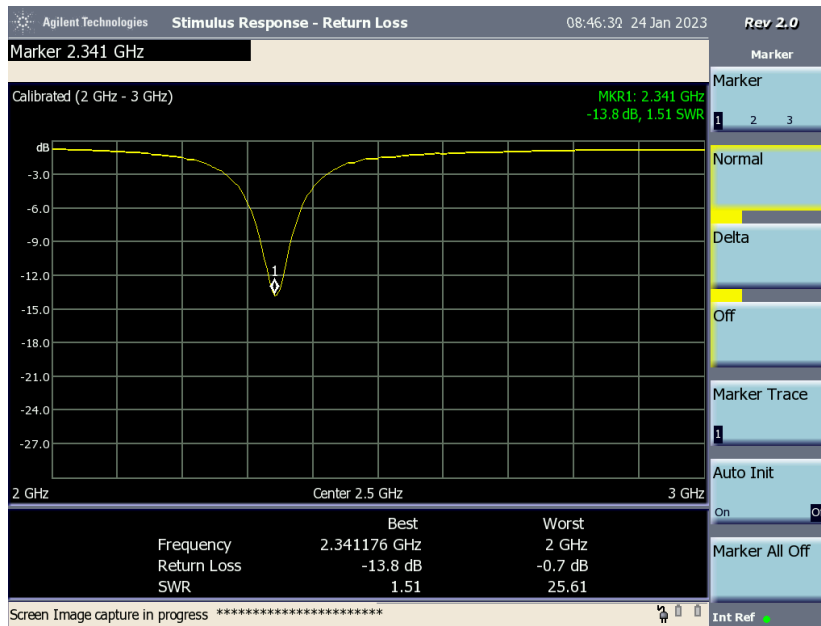
5.2.5 Κεραία #10

Στο σχήμα 5.12 απεικονίζεται η κεραία #10.



Σχήμα 5.12 Κεραία #10

Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα RL της κεραίας #10.



Σχήμα 5.13 Διάγραμμα RL μέσω αναλυτή

Στη μέτρηση με τον αναλυτή, τα αποτελέσματα διαφέρουν λίγο με αυτά του ADS (σχήμα 4.67). Η κεραία δεν λειτουργεί ακριβώς στα 2.4 GHz αλλά στα 2.34 GHz. Επίσης, οι απώλειες RL είναι -13.8dB εν αντιθέσει με τις απώλειες του ADS που είναι στα -15.49 dB. Παρ' όλα αυτά, είναι σημαντικό που δεν υπήρξε κάποιο θέμα με τον ΜΣ $\lambda/4$ όπως στην παράγραφο 5.2.4. Ο λόγος στάσιμου κύματος (VSWR) είναι ίσος με 1.51 στη συχνότητα λειτουργίας. Το εύρος της κεραίας ισούται περίπου με 50MHz, πιο στενό από τις κεραίες #1 και #3. Σε αυτή την κεραία, σύμφωνα με την σχέση (2.29), το ποσοστό στενής ζώνης ισούται με 1.7%. Τέλος, είναι αξιοσημείωτο που αυτή η κεραία πετυχαίνει αυτό το αποτέλεσμα με τις συγκεκριμένες διαστάσεις, οι οποίες είναι κοντά στις θεωρητικές τιμές που είχαν υπολογιστεί στις παραγράφους 4.2 και 4.6.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Στην εργασία αυτή, μελετήθηκε η κεραία μικροταινίας και σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν διάφορες τυπωμένες ορθογωνικές κεραίες με σκοπό την λειτουργία τους στη συχνότητα 2.4GHz. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις: (α) κεραία με γραμμή μεταφοράς χωρίς προσαρμογή και (β) κεραία με γραμμή μεταφοράς και παρεμβολή προσαρμοστικής διάταξης για την οποία επιλέχθηκε ένας μετασχηματιστής $\lambda/4$.

Αρχικά, υπολογίστηκαν μέσω μαθηματικών σχέσεων από την βιβλιογραφία οι διαστάσεις της κεραίας και της γραμμής τροφοδοσίας για την εν λόγω συχνότητα. Έπειτα, ακολούθησε η προσομοίωση της κεραίας/γραμμής μέσω του πακέτου λογισμικού ADS με στόχο την απεικόνιση του διαγράμματος RL. Αυτό το διάγραμμα έκρινε τον βαθμό ορθής λειτουργίας της κεραίας στην συχνότητα των 2.4 GHz. Ακολούθησε η διαδικασία της βελτιστοποίησης (optimization) με αποτέλεσμα τη δημιουργία κεραίων με πιο διευρυμένες διαστάσεις από τις θεωρητικές. Με αυτόν τον τρόπο, επιτεύχθηκαν καλύτερες τιμές του συντελεστή ανάκλασης και σε συχνότητες σχετικά κοντά στα 2.4 GHz. Στη συνέχεια, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή μεταξύ της κεραίας και της γραμμής τροφοδοσίας, παρεμβλήθηκε ανάμεσά τους σε σειρά, ένας μετασχηματιστής $\lambda/4$. Η συνολική διάταξη, σχεδιάστηκε, προσομοιώθηκε και βελτιστοποιήθηκε εκ νέου. Τέλος, από όλες τις κεραίες που σχεδιάστηκαν και προσομοιώθηκαν επιλέχθηκαν για κατασκευή πέντε, εκείνες με τα πιο ελπιδοφόρα χαρακτηριστικά. Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε σε φωτοευαίσθητη πλακέτα FR-4. Οι μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες ολοκληρώθηκαν με τη χρήση φασματικού αναλυτή.

Ένα από τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε είναι ότι, κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, οι τιμές του συντελεστή ανάκλασης RL που προκύπτουν από το σχηματικό (schematic) του ADS σε σύγκριση με εκείνες του Layout διαφέρουν αρκετά. Αυτό, όπως αναφέρθηκε λεπτομερέστερα στην παράγραφο 4.3, σχετίζεται με τον διαφορετικό τρόπο υπολογισμού στην κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση του σχηματικού, η τιμή του RL προκύπτει από συγκεκριμένες μαθηματικές εξισώσεις (συνήθως ημι-εμπειρικές) ενώ στην περίπτωση του Layout χρησιμοποιείται αριθμητική μέθοδος που «κατακερματίζει» τη συγκεκριμένη κεραία σε πολύ μικρά τμήματα και έτσι υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα απαιτούμενα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη, λαμβάνοντας υπόψη και επιπρόσθετες αλληλεπιδράσεις της πλακέτας και των άκρων. Είναι ενδιαφέρον ότι τα διαγράμματα του συντελεστή ανάκλασης που προκύπτουν από τη μέτρηση των κεραίων με φασματικό αναλυτή προσεγγίζουν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Layout στο ADS.

Σε ό,τι αφορά τη βελτιστοποίηση, παρατηρήθηκε ότι χρειάστηκαν να γίνουν πολλές δοκιμές, με ποικίλα εύρη διαστάσεων, για την εύρεση μιας κεραίας με παραδεκτές προδιαγραφές. Όπως προαναφέρθηκε, επιλέχθηκε να κατασκευαστούν πέντε (διαφορετικές) κεραίες, ενώ τρεις από αυτές (κεραίες #1, #3, #10) έδωσαν αρκετά καλά αποτελέσματα και στις μετρήσεις. Είναι όμως αξιοσημείωτο ότι οι τρεις αυτές κεραίες, διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους στις διαστάσεις. Παρόλο που υπήρχε μια μεγαλύτερη μετατόπιση στη συχνότητα, η κεραία #3 παρείχε ένα ικανοποιητικό διάγραμμα RL δεδομένου ότι οι διαστάσεις της κεραίας είχαν κάποια κοινά με τις διαστάσεις των θεωρητικών υπολογισμών. Αντίθετα, η κεραία #1 πέτυχε καλύτερη απόκριση στη συχνότητα αλλά οι διαστάσεις της διέφεραν αρκετά από αυτό της κεραίας που προέκυψε από θεωρητικούς υπολογισμούς. Από την άλλη πλευρά, η κεραία #10 είχε μια σχετικά καλή απόκριση κοντά στην συχνότητα των 2.4 GHz με διαστάσεις πολύ κοντά στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Συνεπώς, έγινε φανερό πως ο ΜΣ $\lambda/4$ παίζει καθοριστικό ρόλο στην προσαρμογή μιας κεραίας μικροταινίας χωρίς να επαναπροσδιορίζει το φυσικό μέγεθος της.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τέτοιες κεραιές κατασκευάζονται συνήθως με χαράκτη πλακετών αντί φωτοευαίσθητης πλακέτας. Με χρήση του χαράκτη, θα μπορούσαν να υλοποιηθούν κεραιές με πολύ μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις, καθώς και γραμμές τροφοδοσίας με πολύ μικρά πλάτη. Όπως διαπιστώθηκε κατά την κατασκευή των κεραιών με ΜΣ $\lambda/4$, όσο πιο μικρό το πλάτος μιας γραμμής μικροταινίας τόσο πιο δύσκολο είναι να αποτυπωθεί σε φωτοευαίσθητη πλακέτα όπως είναι η FR-4. Οπότε, θα παρουσίαζε ίσως ενδιαφέρον η σχεδίαση και υλοποίηση των κεραιών της εργασίας αυτής με χρήση χαράκτη πλακετών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., Ittipiboon, A., *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, Inc, 2001.
- [2] Balanis, C.A., *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [3] Y. Huang, K. Boyle, *Antennas: From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008
- [4] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc, 2012
- [5] W.L. Stutzman, G.A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, Inc, 1998
- [6] Kumar G., Ray K.P, *Broadband Microstrip Antennas*, Artech House, Inc, 2003
- [7] Qian Y., “A Microstrip Patch Antenna using novel photonic bandgap structures”, *Microwave J.*, Vol 42, Jan 1999, pp 66-76
- [8] Sharma S., Tripathi C.C., Rishi R., “Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna”, *Indian Journal of Science and Technology.*, Vol 10 (28), July 2017, pp 8,9
- [9] Hammerstad, E.O., “Equations for Microstrip Circuit Design,” *Proc. Fifth European Microwave Conf.*, pp. 268-272, September 1975.
- [10] Bungard, “Original Bungard presensitized base material FR4”, *FR4 Technical Data*, Feb. 2021.