



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση και σχεδίαση τυπωμένης κεραίας με ένθετη
μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας»



Του φοιτητή
Μπάμπη Πέτρου
Αρ. Μητρώου: 2019/109

Επιβλέπουσα
Ιωαννίδου Μελίνα
Καθηγήτρια

Ημερομηνία: 28/05/2024

Τίτλος Δ.Ε.: Ανάλυση και σχεδίαση τυπωμένης κεραίας με ένθετη μικροταινιακή γραμμή
τροφοδοσίας

Κωδικός Δ.Ε.: 24115

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Μπάμπης Πέτρος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Ιωαννίδου Μελίνα

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 01/02/2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 28/05/2024

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 Μπάμπη Πέτρου 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 οποιοδήποτε 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.

«Σε όσους βοήθησαν να γραφτεί η εργασία αυτή.»

Πρόλογος

Οι κεραιές είναι ένα αναπόσπαστο μέρος των συστημάτων ασυρμάτων επικοινωνιών και τηλεμετρίας, καθώς αυτή είναι η διάταξη που κάνει την μετάδοση πληροφορίας δυνατή, μέσω της ικανότητάς τους να διαδίδουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον χώρο. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των τυπωμένων πλακετών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων είχε σαν συνέπεια την αύξηση της δημοτικότητας της χρήσης των κεραιών μικροταινίας. Πλέον, οι εφαρμογές που υλοποιούνται χάρις σε αυτές είναι αναρίθμητες. Η διαστημική τηλεμετρία, η βιοϊατρική τεχνολογία τα ασύρματα δίκτυα Wi-Fi και τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών είναι μόνο λίγες από τις εφαρμογές που αξιοποιούν τα άφθονα πλεονεκτήματά τους. Οι διαστάσεις των κεραιών μικροταινίας καθορίζονται από τη συχνότητα λειτουργίας και από το υλικό του διηλεκτρικού υποστρώματος, ενώ μικρές παρεκκλίσεις στις διαστάσεις μίας τέτοιας κεραιάς μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στη λειτουργία της. Επίσης σημαντικός παράγοντας για τον επιτυχή σχεδιασμό των κεραιών μικροταινίας, είναι ο τρόπος με τον οποίο αυτή τροφοδοτείται. Για την εργασία αυτή επιλέχθηκε ο τρόπος της ένθεσης γραμμής μικροταινίας στην ενεργή επιφάνεια της κεραιάς. Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, κατανοήθηκε λεπτομερώς ο τρόπος λειτουργίας των κεραιών μικροταινίας, αλλά και οι μεθοδολογίες σχεδίασής τους με ικανοποιητικά χαρακτηριστικά.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει διεξοδικά και με μεθοδικότητα την ανάλυση και τον σχεδιασμό τυπωμένων κεραιών με ένθετη μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας. Οι κεραιές μικροταινίας, φημισμένες κυρίως για την ευκολία κατασκευής και την απρόσκοπτη ενσωμάτωσή τους σε τυπωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, αποτελούν το επίκεντρο του ενδιαφέροντος της εργασίας αυτής. Επιπρόσθετα, μελετάται σε βάθος η τεχνική τροφοδοσίας με ένθετη γραμμή μικροταινίας, η οποία προτιμήθηκε, μεταξύ άλλων τεχνικών τροφοδοσίας, λόγω της κατασκευαστικής της απλότητας και της ικανοποιητικής προσαρμογής που προσφέρει. Κατά την εργασία αυτήν, μελετήθηκαν και σχεδιάστηκαν τυπωμένες κεραιές με ένθετη μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας για τη συχνότητα λειτουργίας 2.4 GHz. Επίσης, για ανάγκες επαναληψιμότητας και περεταίρω εξοικείωσης, μελετήθηκαν και σχεδιάστηκαν κεραιές ίδιου τύπου και για τη συχνότητα λειτουργίας 1.8 GHz. Το θεωρητικό πλαίσιο της ανάλυσής τους αναπτύχθηκε, αντλώντας πληροφορίες από τη σχετική διεθνή βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά υπολογίστηκαν θεωρητικά οι διαστάσεις του ορθογωνίου, ενεργού μέρους της κεραιάς, της γραμμής μικροταινίας και της ένθεσής της. Έπειτα, μέσω του πακέτου λογισμικού για σχεδίαση μικροκυματικών κυκλωμάτων και ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων Advanced Design System (ADS) της Keysight, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και βελτιστοποίηση των διαστάσεων της κεραιάς, με σκοπό την εξαγωγή κατάλληλων κεραιών που θα λειτουργούν στις προαναφερθείσες συχνότητες. Κατά τη διαδικασία αυτή, υπολογίστηκαν μέσω κατάλληλα ρυθμισμένων προσομοιώσεων τα διαγράμματα απωλειών επιστροφής των κεραιών, καθώς και τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους. Οι κεραιές, για τις οποίες τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά κατασκευάστηκαν με φωτοχημική μέθοδο σε πλακέτες FR-4 διπλής όψης. Με χρήση του τον αναλυτή φάσματος του εργαστηρίου Ασυρμάτων Επικοινωνιών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙΠΑΕ, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του συντελεστή ανάκλασης, του λόγου στασίμου κύματος και του εύρους ζώνης των υλοποιημένων κεραιών. Για την διεξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων, τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Analysis and design of inset-fed microstrip patch antennas

Bampis Petros

Abstract

The present thesis meticulously and methodically examines the analysis and the design of inset-fed microstrip patch antennas. Microstrip antennas, mainly known for their ease of fabrication and their seamless integration with electronic circuits, serve as the focal point of this thesis. In addition, the inset-fed microstrip feeding technique is studied in depth, having been preferred over other feeding techniques due to its simplicity and its adequate impedance matching. In this work, inset-fed microstrip patch antennas were studied and designed for the operating frequency of 2.4 GHz. Moreover, for repeatability purposes and further familiarity, antennas of the same type were studied and designed for the operating frequency of 1.8 GHz. The theoretical framework of their analysis was carefully developed, drawing information from the pertinent international literature. Firstly, the dimensions of the rectangular, active part of the antenna, as well as the dimensions of the microstrip line and those of the inset were calculated theoretically. Subsequently, through the Advanced Design System (ADS) software package by Keysight for the design of microwave circuits and electromagnetic simulations, simulations and optimizations of the antenna dimensions were conducted, in order to produce suitable antennas for the aforementioned frequencies. During the design process, the return loss diagrams and the radiation characteristics of the antennas were calculated through appropriately configured simulations. The antennas, whose results were deemed as satisfactory, were fabricated using a photochemical method on double-sided FR-4 boards. By using the spectrum analyzer at the Wireless Communications Laboratory of the Department of Information and Electronic Systems Engineering, IHU, measurements of the reflection coefficient, the standing wave ratio (SWR) and the bandwidth (BW) of the antennas were conducted. For the final conclusions, the measurement results were compared with the simulation results.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω εγκάρδια την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγήτρια κα. Ιωαννίδου Μελίνα, για την πολύτιμη καθοδήγηση και την εξαιρετική επικοινωνία κατά τη διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής της εργασίας αυτής. Ευχαριστώ επίσης τον Επίκουρο Καθηγητή, κο. Γιακουμή Άγγελο, για τη συμβολή του στην κατασκευή των κεραιών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που στάθηκαν κοντά μου κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου για την αμέριστη υποστήριξή τους.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συνομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	1
1.3 Δομή της εργασίας	2
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρία κεραιών και γραμμών μεταφοράς.....	3
2.1 Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση δίπολου	3
2.1.1 Μηχανισμός ακτινοβολίας κεραίας.....	3
2.1.2 Περιοχές πεδίου.....	4
2.1.3 Σφαιρικές συντεταγμένες και στερεακτίνο	6
2.1.4 Ακτινοβολία στοιχειώδους δίπολου στο μακρινό πεδίο.....	7
2.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας.....	9
2.2.1 Κατευθυντικότητα.....	10
2.2.2 Κέρδος κεραίας	11
2.2.3 Απόδοση κεραίας	12
2.3 Τερματισμός γραμμής μεταφοράς.....	12
2.3.1 Ανακλώμενο κύμα.....	12
2.3.2 Αντίσταση εισόδου γραμμής μεταφοράς.....	14
2.3.3 Ροή ισχύος σε γραμμή μεταφοράς.....	15
2.3.4 Λόγος στασίμου κύματος (SWR).....	16
2.4 Μητρώο σκέδασης	17
Κεφάλαιο 3ο: Κεραίες μικροταινίας	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2 Ανάλυση λειτουργίας ορθογωνικής κεραίας μικροταινίας	20
3.3 Τροφοδοσία με ένθετη γραμμή μεταφοράς.....	23

3.4	Ακτινοβολία και κατευθυντικότητα κεραιών μικροταινίας	27
Κεφάλαιο 4ο:	Ανάλυση και βελτιστοποίηση των κεραιών	29
4.1	Θεωρητική ανάλυση τυπωμένης κεραίας με ένθετη μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας ..	29
4.1.1	Θεωρητική ανάλυση κεραίας σε συχνότητα λειτουργίας 2.4 GHz	29
4.1.2	Θεωρητική ανάλυση κεραίας σε συχνότητα λειτουργίας 1.8 GHz	31
4.2	Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #1	32
4.3	Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #2	37
4.4	Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #3	39
4.5	Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #4 (1.8 GHz)	41
4.6	Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #5 (Βελτιστοποιημένη κεραία #1)	43
4.7	Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #6 (Βελτιστοποιημένη κεραία #2)	46
4.8	Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #7 (Βελτιστοποιημένη κεραία #3)	49
4.9	Σύγκριση χαρακτηριστικών των κεραιών	52
4.9.1	Σύγκριση χαρακτηριστικών των κεραιών με επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας τα 2.4 GHz	52
4.9.2	Σύγκριση χαρακτηριστικών των κεραιών με επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας τα 1.8 GHz	53
Κεφάλαιο 5ο:	Κατασκευή και μετρήσεις των κεραιών	55
5.1	Μεθοδολογία κατασκευής των κεραιών	55
5.2	Ο αναλυτής φάσματος	57
5.3	Αποτελέσματα μετρήσεων	58
5.3.1	Μετρήσεις κεραίας #2	59
5.3.2	Μετρήσεις κεραίας #5	61
5.3.3	Μετρήσεις κεραίας #6	64
5.3.4	Μετρήσεις κεραίας #7	66
Κεφάλαιο 6ο:	Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	70
6.1	Συμπεράσματα	70
6.2	Σύγκριση με μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία	70
6.3	Μελλοντική έρευνα	72
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές στη γραμμή μεταφοράς.....	4
Σχήμα 2.2: Δημιουργία κυμάτων ελεύθερου χώρου	4
Σχήμα 2.3: Περιοχές πεδίου κεραίας.....	5
Σχήμα 2.4: Σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων.....	6
Σχήμα 2.5: Στερεά γωνία και στερεακτίνο.....	7
Σχήμα 2.6: Υπολογισμός πεδίου δίπολου Herz.....	8
Σχήμα 2.7: Λοβοί ακτινοβολίας.....	10
Σχήμα 2.8: Τερματισμένη γραμμής μεταφοράς	12
Σχήμα 2.9: Αυθαίρετο μικροκυματικό δίκτυο N-θυρών	17
Σχήμα 3.1: Διάταξη κεραίας μικροταινίας.....	19
Σχήμα 3.2: Σχήματα ταινίας ακτινοβολίας.....	20
Σχήμα 3.3: Το φαινόμενο των κροσσών ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών.....	21
Σχήμα 3.4: Ενεργός διηλεκτρική σταθερά (α), ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές (β).....	22
Σχήμα 3.5: Το φυσικό και ενεργό μήκος της ορθογώνιας κεραίας μικροταινίας.....	23
Σχήμα 3.6: Τυπικοί τρόποι τροφοδοσίας κεραίας μικροταινίας	24
Σχήμα 3.7: Τροφοδοσία κεραίας μικροταινίας με μικροταινιακή γραμμή και μετασχηματιστή $\lambda/4$	26
Σχήμα 3.8: Τροφοδοσία κεραίας μικροταινίας με ένθετη μικροταινιακή γραμμή.....	26
Σχήμα 3.9: Τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας στο E-επίπεδο (α) και στο H-επίπεδο (β).....	28
Σχήμα 4.1: Κυκλωματική διάταξη κεραίας #1 σε σχηματικό.	33
Σχήμα 4.2: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #1.	33
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής από το σχηματικό της κεραίας #1.....	34
Σχήμα 4.4: Γεωμετρία της κεραίας #1 στο Layout.	34
Σχήμα 4.5: Η γεωμετρία του υποστρώματος.....	35
Σχήμα 4.6 Ρυθμίσεις EM προσομοίωσης στο Layout.....	35
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #1 από τον σχεδιασμό στο Layout.	36
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας #1, (α) στον χώρο και (β) στο οριζόντιο επίπεδο... ..	36
Σχήμα 4.9: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας #1 στα 2.41 GHz	37
Σχήμα 4.10: Οι διαστάσεις της κεραίας #2 ως global μεταβλητές.....	38
Σχήμα 4.11: Γεωμετρία της κεραίας #2 στο Layout.	38
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #2 από τον σχεδιασμό στο Layout.	39
Σχήμα 4.13: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #3.	40
Σχήμα 4.14: Γεωμετρία της κεραίας #3 στο Layout.	40
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #3 από τον σχεδιασμό στο Layout.	41
Σχήμα 4.16: Οι διαστάσεις της κεραίας #4 ως global μεταβλητές.....	41
Σχήμα 4.17: Γεωμετρία της κεραίας #4 στο Layout	42
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #4 από τον σχεδιασμό στο Layout.	42
Σχήμα 4.19: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #5.	43
Σχήμα 4.20: Παράμετροι βελτιστοποίησης της κεραίας #5	44
Σχήμα 4.21: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #5, μετά τη βελτιστοποίηση.	44
Σχήμα 4.22: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #5 στο Layout	45
Σχήμα 4.23: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας #5, (α) στον χώρο και (β) στο οριζόντιο επίπεδο.	46
Σχήμα 4.24: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας #5 στα 2.39 GHz.	46
Σχήμα 4.25: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #6, μετά τη βελτιστοποίηση	47
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #6 στο Layout	48

Σχήμα 4.27: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας #6, (α) στον χώρο και (β) στο οριζόντιο επίπεδο.	49
Σχήμα 4.28: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας #6 στα 2.42 GHz	49
Σχήμα 4.29: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #7, μετά τη βελτιστοποίηση.	50
Σχήμα 4.30: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #7 στο Layout	50
Σχήμα 4.31: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας #7, (α) στον χώρο και (β) στο οριζόντιο επίπεδο..	51
Σχήμα 4.32: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας #7 στα 1.795 GHz.	52
Σχήμα 5.1: Εκτύπωση των layout σε φιλμ.	56
Σχήμα 5.2: Κονέκτορες SMA-Female εξωτερικής διαμέτρου 5mm.....	57
Σχήμα 5.3: Οι τυπωμένες κεραίες μικροταινίας με ένθετη γραμμή τροφοδοσίας, (α) από την όψη του στοιχείου ακτινοβολίας και (β) από την όψη της γείωσης του.....	57
Σχήμα 5.4: Ο αναλυτής φάσματος του εργαστηρίου Ασυρμάτων Επικοινωνιών του τμήματος σε λειτουργία βαθμονόμησης.....	58
Σχήμα 5.5: Ο αναλυτής φάσματος του εργαστηρίου Ασυρμάτων Επικοινωνιών του τμήματος σε λειτουργία μέτρησης με συνδεδεμένο φορτίο κεραίας	59
Σχήμα 5.6: Κεραία #2.....	59
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #2 από τον αναλυτή φάσματος	60
Σχήμα 5.8: Κεραίες #5, (α) #5.α και (β) #5.β.....	61
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #5.α από τον αναλυτή φάσματος	62
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #5.β από τον αναλυτή φάσματος	63
Σχήμα 5.11: Κεραία #6.....	64
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #6 από τον αναλυτή φάσματος	65
Σχήμα 5.13: Κεραίες #7, (α) #7.α και (β) #7.β.....	66
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #7.α από τον αναλυτή φάσματος	67
Σχήμα 5.15: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #7.β από τον αναλυτή φάσματος	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά της πλακέτας διπλής όψης FR-4 της Bungard	29
Πίνακας 4.2: Αντιστοίχιση των τιμών των στοιχείων της κεραίας #1 στο σχηματικό με τις θεωρητικές τιμές.....	32
Πίνακας 4.3: Οι τιμές των στοιχείων του σχηματικού συναρτήσεως των A, B.....	39
Πίνακας 4.4: Σύγκριση μεγεθών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.....	45
Πίνακας 4.5: Σύγκριση μεγεθών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.....	48
Πίνακας 4.6: Σύγκριση μεγεθών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.....	51
Πίνακας 4.7: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραίων συχνότητας λειτουργίας 2.4 GHz.....	52
Πίνακας 4.8: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραίων συχνότητας λειτουργίας 2.4 GHz.....	52
Πίνακας 4.9: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραίων συχνότητας λειτουργίας 1.8 GHz.....	53
Πίνακας 4.10: Σύγκριση κατευθυντικότητας, κέρδους και λόγου απόδοσης ακτινοβολίας των κεραίων συχνότητας λειτουργίας 1.8 GHz.....	53
Πίνακας 5.1: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραίων που κρίθηκαν ικανοποιητικές για κατασκευή	55

Πίνακας 5.2: Σύγκριση κατευθυντικότητας, κέρδους και λόγου απόδοσης ακτινοβολίας των κεραιών που κρίθηκαν ικανοποιητικές για κατασκευή	55
Πίνακας 5.3: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #2	61
Πίνακας 5.4: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #5.α	62
Πίνακας 5.5: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #5.β	63
Πίνακας 5.6: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραιών #5.α και #5.β.....	64
Πίνακας 5.7: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #6	65
Πίνακας 5.8: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #7.α	67
Πίνακας 5.9: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #7.β	68
Πίνακας 5.10: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραιών #7.α και #7.β	69
Πίνακας 6.1: Σύγκριση των διαστάσεων της κεραίας #5 με παρόμοιες κεραίες της διεθνούς βιβλιογραφίας.....	71
Πίνακας 6.2: Σύγκριση των χαρακτηριστικών της κεραίας #5 με παρόμοιες κεραίες της διεθνούς βιβλιογραφίας.....	71

Συντομογραφίες

ADS	Advanced Design System
SWR	Standing Wave Ratio
RL	Return Loss
dB	Decibel
dB _i	Decibel isotropic
ΔΠΙΑΕ	Decibel isotropic
TEM	Transverse Electromagnetic Mode
EM	Electromagnetic
FR-4	Flame Retardant - 4
PCB	Printed Circuit Board
DXF	Drawing Exchange Format
PDF	Portable Document Format
SMA	SubMiniature version A
UV	Ultraviolet

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Με την εδραίωση των ασύρματων συστημάτων υψηλών επιδόσεων στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και της τηλεπισκόπησης, η ανάπτυξη αποτελεσματικών διατάξεων κεραιών είναι επιτακτική. Οι κεραιές είναι ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις, που επιτρέπουν τη διάδοση κατευθυνόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον χώρο και ο ρόλος τους είναι καίριος στην ανάπτυξη ασύρματων συστημάτων, καθώς χωρίς αυτές οποιαδήποτε διάταξη επεξεργασίας σήματος σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνίας χάνει την αξία του. Οι κεραιές μικροταινίας αποτελούν από τους πιο διαδεδομένους τύπους κεραιών για υψηλές συχνότητες και ξεχωρίζουν λόγω των ισχυρών πλεονεκτημάτων τους, όπως η ευελιξία που προσφέρουν σε συχνότητα συντονισμού, πόλωση, διάγραμμα ακτινοβολίας και κυρίως λόγω της ευκολίας στην κατασκευή τους και της εύκολης ενσωμάτωσής τους σε τυπωμένες ηλεκτρονικές διατάξεις. Οι τρόποι που μπορεί να τροφοδοτηθεί μία κεραιά μικροταινίας ποικίλουν και το ποια θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται τόσο από το σχήμα της ενεργής περιοχής της κεραιάς, όσο και από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η επίδοση και τα χαρακτηριστικά τυπωμένης κεραιάς με ένθετη γραμμή τροφοδοσίας μέσω θεωρητικής ανάλυσης, προσομοιώσεων και σχεδιασμού. Με τη μέθοδο τροφοδοσίας που επιλέχθηκε εξασφαλίζεται ευκολία στην κατασκευή και πολύ ικανοποιητική προσαρμογή. Η εργασία αυτή συνείσφερε στην βαθύτερη κατανόηση της ανάλυσης και την κατασκευή των κεραιών μικροταινίας, αλλά ακόμα συνέβαλλε στην εξοικείωση με το πακέτο λογισμικού Advance Design System (ADS), με τον αναλυτή φάσματος και με τη μέθοδο της φωτολιθογραφίας.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Μία πρώτη εισαγωγή των σημαντικότερων εννοιών των κεραιών και της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων γίνεται στα βιβλία του C.A. Balanis [1] και των Κωττή Παναγιώτη Γ. και Αράπογλου Παντελή-Δανιήλ Μ. [2]. Επίσης, στο βιβλίο των Γιούλτση Τραϊανού Β. και Κριεζή Εμμανουήλ Ε. [3] αναλύονται εκτενώς θεμελιώδεις ορισμοί των γραμμών μεταφοράς και των μικροταινιών. Οι αρχές λειτουργία, οι εφαρμογές και οι μέθοδοι τροφοδοσίας των κεραιών μικροταινίας αναλύονται λεπτομερώς στα βιβλία του C.A. Balanis [1], του James R. James [4] και των Y. Huang, K. Boyle [5π]. Επίσης, από τη σχετική διεθνή βιβλιογραφία προσφέρονται πολλές εργασίες που έχουν σκοπό την ανασκόπηση των υπάρχοντων μελετών πάνω στις κεραιές μικροταινίας [6,7].

Στη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχουν πολλές δημοσιευμένες μελέτες πάνω στην ανάλυση και την σχεδίαση τυπωμένων κεραιών με ένθετη μικροταινιακή γραμμής τροφοδοσίας σε μία ποικιλία εφαρμογών. Συγκεκριμένα, στη μελέτη [8] γίνεται αναφορά σε φορετές (wearable) κεραιές μικροταινίας με τον συγκεκριμένο τρόπο τροφοδοσίας, ενώ στις [9, 10, 11, 12] για χρήση σε εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων. Στις συγκεκριμένες δημοσιεύσεις γίνεται αναλυτική ανάλυση των κεραιών με κατάλληλο πακέτο λογισμικού και δημοσιεύονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από όμοιες μελέτες, όπως οι [8, 11, 12, 13].

1.3 Δομή της εργασίας

Για την πλήρη κατανόηση της απαραίτητης θεωρητικής ανάλυσης θεμελιωδών εννοιών, της μεθοδολογίας ανάλυσης, βελτιστοποίησης και σχεδίασης των κεραιών, αλλά και για τις ανάγκες συνεκτικότητας, επιλέχθηκε η δομή της εργασίας να αποτελείται από συγκεκριμένες ενότητες.

Με το πέρας του πρώτου κεφαλαίου, στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε βασικές έννοιες από τη θεωρία κεραιών και των γραμμών μεταφοράς, που κρίθηκαν απαραίτητες για την καλύτερη κατανόηση εννοιών που εξετάζονται στην ανάλυση και στον σχεδιασμό των κεραιών.

Το 3^ο Κεφάλαιο περιέχει όλες τις κομβικές θεωρητικές έννοιες των κεραιών μικροταινίας, καθώς και της τροφοδοσίας με ένθετη γραμμή τροφοδοσίας. Επιπρόσθετα, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται λόγος για τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται αργότερα στη θεωρητική ανάλυση των κεραιών.

Στη συνέχεια, στο 4^ο Κεφάλαιο περιέχεται ο θεωρητικός υπολογισμός των διαστάσεων των κεραιών για τυπωμένες κεραίες με ένθετη μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας σε συχνότητες λειτουργίας 2.4 GHz και 1.8 GHz. Ακόμα, στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται λεπτομερώς οι διαδικασίες ανάλυσης και βελτιστοποίησης των κεραιών με χρήση του πακέτου λογισμικού ADS (Advanced Design System) της Keysight. Τέλος, τα μοντέλα των κεραιών που προέκυψαν συγκρίνονται ως προς τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών τους.

Στο 5^ο Κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία κατασκευής των κεραιών σε PCB και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη χρήση του αναλυτή φάσματος, στο εργαστήριο Ασυρμάτων Επικοινωνιών του οικείου Τμήματος. Στην συνέχεια, τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις διαδικασίες ανάλυσης, βελτιστοποίησης και σχεδίασης των κεραιών, και παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

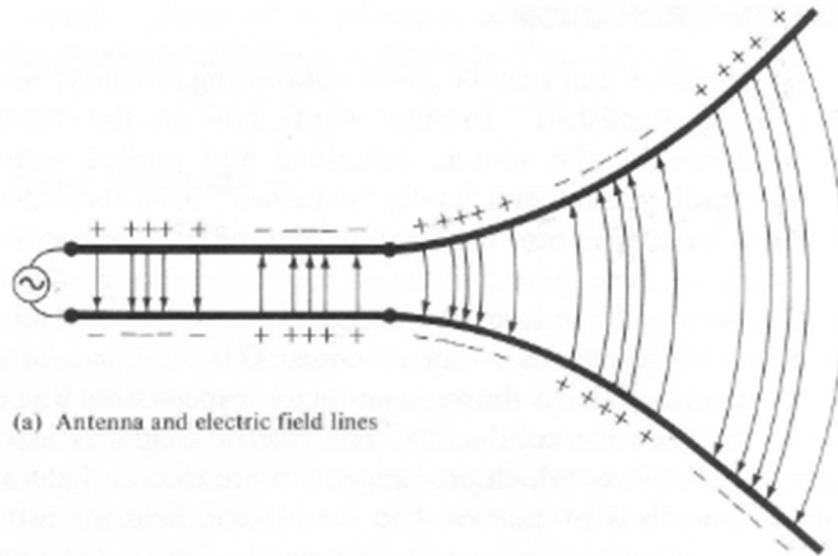
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρία κεραιών και γραμμών μεταφοράς

2.1 Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση δίπολου

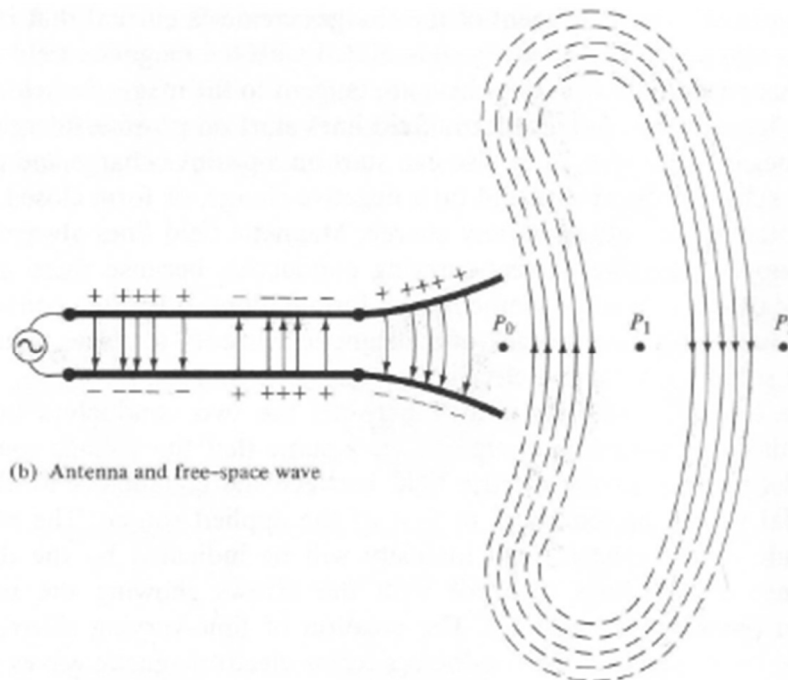
2.1.1 Μηχανισμός ακτινοβολίας κεραίας

Έστω μία πηγή μεταβαλλόμενης τάσης που συνδέεται σε μία γραμμή μεταφοράς δύο συρμάτων και τροφοδοτεί έτσι μία κεραία. Η παρουσία της διαφοράς δυναμικού στα άκρα της γραμμής μεταφοράς, δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των αγωγών. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου εφάπτονται του ηλεκτρικού πεδίου και η πυκνότητά τους είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές αναγκάζουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στον αγωγό να κινηθούν και η κατευθυνόμενη αυτή κίνηση στον αγωγό δημιουργεί ηλεκτρικό εναλλασσόμενο ρεύμα και συνεπώς μαγνητικό πεδίο, του οποίου οι δυναμικές γραμμές, κατά αντιστοιχία με αυτές του ηλεκτρικού πεδίου, εφάπτονται του μαγνητικού πεδίου. Σύμφωνα με το νόμο τους νόμους Gauss και Faraday, οι γραμμές μπορούν να ξεκινούν από ένα θετικό φορτίο και να καταλήγουν στο άπειρο, να ξεκινούν από το άπειρο και να καταλήγουν σε αρνητικό φορτίο ή να ξεκινούν από τα θετικά φορτία και καταλήγουν στα αρνητικά. Σύμφωνα με τον νόμο του Gauss για τον μαγνητισμό, δεν υπάρχουν μαγνητικά φορτία και οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές σχηματίζουν πάντα κλειστούς βρόγχους που περικλείουν ρευματοφόρους αγωγούς. Αν η πηγή τάσης που τροφοδοτεί τη γραμμή μεταφοράς είναι ημιτονοειδής, τότε και το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των αγωγών θα είναι ημιτονοειδές με περίοδο ίση με αυτή της πηγής. Το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από την πυκνότητα των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών και η διεύθυνση του πεδίου μεταβάλλεται σύμφωνα με τη φορά της ημιτονοειδούς τάσης. Τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μεταξύ των δύο αγωγών δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που οδεύουν κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται αυτή η διάδοση των κυμάτων κατά μήκος των δύο αγωγών. Όταν ένα τμήμα της κεραίας αποσπαστεί, τότε τα ανοιχτά άκρα των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών και εμφανίζονται περιοδικά κύματα ελεύθερου χώρου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 Το σημείο σταθερής φάσης P_0 τώρα διαδίδεται προς τα έξω, με την ταχύτητα του φωτός, και καλύπτει απόσταση $\lambda/2$ μέχρι το P_1 σε χρόνο ίσο με το μισό της περιόδου του.

Η ηλεκτρική διαταραχή που προκαλείται από την ημιτονοειδή πηγή, δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα που οδεύουν προς τη γραμμή μεταφοράς, έπειτα στην κεραία και τελικά εκπέμπονται ως κύματα ελεύθερου χώρου. Τα κύματα αυτά συνεχίζουν να διαδίδονται ακόμα και αν αυτή η διαταραχή παύσει, όπως και τα κύματα μίας υδάτινης επιφάνειας συνεχίζουν να διαδίδονται ακόμα και αν η διαταραχή της επιφάνειας δεν είναι συνεχής. Αν η ηλεκτρική διαταραχή, συνεπώς, είναι διαρκής, τότε δημιουργούνται συνεχώς νέα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που ακολουθούν τα άλλα. Τα πεδία, συμπερασματικά, συνεχίζουν να υπάρχουν ακόμα και όταν τα απαραίτητα για τη διέγερση των πεδίων φορτία απουσιάζουν.



Σχήμα 2.1: Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές στη γραμμή μεταφοράς



Σχήμα 2.2: Δημιουργία κυμάτων ελεύθερου χώρου [1]

2.1.2 Περιοχές πεδίου

Ο χώρος γύρω από μία κεραία χωρίζεται στο κοντινό και στο μακρινό πεδίο (near- και far-field). Συγκεκριμένα, το κοντινό πεδίο διαιρείται σε δύο περιοχές [2]. Την περιοχή εγγύς πεδίου φανταστικής αντίστασης και την περιοχή εγγύς πεδίου ακτινοβολίας ή περιοχή Fresnel. Η περιοχή μακρινού πεδίου λέγεται και περιοχή Fraunhofer. Ο χαρακτηρισμός των περιοχών υποδηλώνει και τη δομή του πεδίου σε αυτές. Οι διαφορές των περιοχών είναι διακριτές, χωρίς όμως να υπονοείται πως στα όρια των περιοχών παρατηρούνται απότομες μεταβολές του πεδίου στα όρια των περιοχών.

Η περιοχή του εγγύς πεδίου φανταστικής αντίστασης (reactive near field region) είναι η περιοχή, όπου υπάρχει απουσία ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τον ακτινοβολητή. Η περιοχή αυτή περιορίζεται χωρικά στο εσωτερικό σφαιράς με ακτίνα, που περιβάλλει το στοιχείο που ακτινοβολεί ίση με

$$R_1 = 0.62 \left(\frac{D^3}{\lambda} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

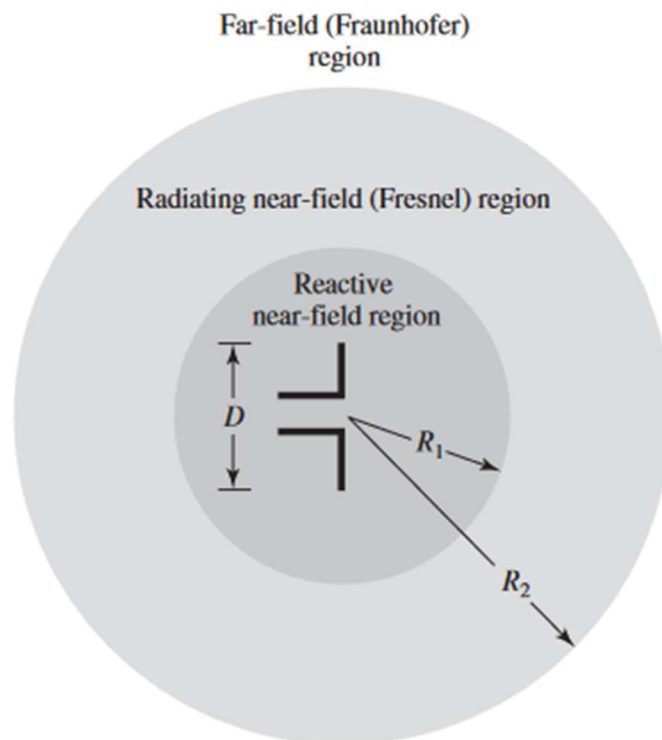
όπου D είναι η μέγιστη διάσταση του ακτινοβολητή και λ το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας.

Η περιοχή του εγγύς πεδίου ακτινοβολίας ή περιοχή Fresnel (radiating near field region) ανήκει επίσης στην κατηγορία περιοχών στο κοντινό πεδίο και εκτείνεται στο χώρο μεταξύ των σφαιρών που περιβάλλουν τον ακτινοβολητή, με ακτίνες R_1 και R_2 , η τελευταία των οποίων είναι ίση με

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

Σε περίπτωση που η μέγιστη διάσταση D του στοιχείου που ακτινοβολεί δεν είναι μεγάλη συγκριτικά με το μήκος κύματος, η περιοχή αυτή μπορεί και να μην υπάρχει.

Η μακρινή περιοχή ή περιοχή Fraunhofer (far-field) περιλαμβάνει τα σημεία του χώρου, που δεν ανήκουν στις σφαίρες με ακτίνα R_1 και R_2 . Συνεπώς, η περιοχή της εκτείνεται σε απόσταση μεγαλύτερη του $\frac{2D^2}{\lambda}$, από τον ακτινοβολητή, για $D \gg \lambda$. Στη μακρινή περιοχή οι εγκάρσιες συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ανεξάρτητες από την ακτινική συνιστώσα. Οι οδηγούσες συνιστώσες δηλαδή, του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, είναι 0 ($E_z = H_z = 0$). Το σχήμα 2.3 δείχνει τα όρια των περιοχών πεδίου.



Σχήμα 2.3: Περιοχές πεδίου κεραιάς [1].

2.1.3 Σφαιρικές συντεταγμένες και στερεακτίνο

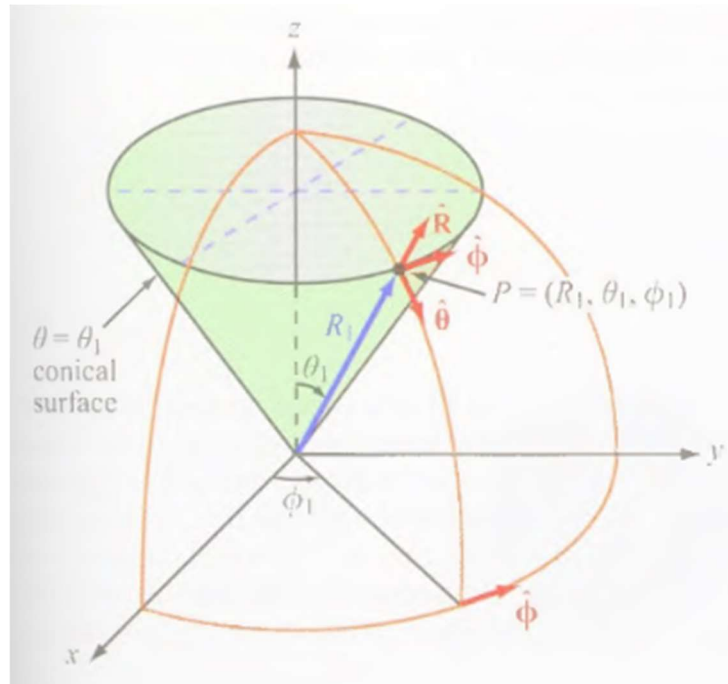
Το σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων είναι το σύστημα αναφοράς του χώρου (Σχήμα 2.4), που τα διαγράμματα ακτινοβολίας συνήθως αποτυπώνονται. Η θέση κάθε σημείου προσδιορίζεται από τρεις αριθμούς. Την ακτινική απόσταση $r \geq 0$ του σημείου από το κέντρο των αξόνων $O(0,0)$, τη γωνία ανύψωσης ή πολική γωνία $0 \leq \theta \leq \pi$ που μετράται από τη σταθερή κατεύθυνση του άξονα z και το αζιμούθιο $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, που είναι η γωνία προβολής του σημείου στο επίπεδο, από κάποια σταθερή κατεύθυνση στο επίπεδο. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες προκύπτουν από τις σφαιρικές συντεταγμένες από τις εξισώσεις

$$x = r \cos \theta \sin \varphi \quad (2.3)$$

$$y = r \sin \theta \cos \varphi \quad (2.4)$$

$$z = r \cos \theta \quad (2.5)$$

Υποθέτοντας πως η διεύθυνση διάδοσης είναι ο άξονας x , τότε το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου προβάλλεται στο επίπεδο xz (επίπεδο ανύψωσης) και το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου στο πεδίο xy (επίπεδο αζιμούθιου).



Σχήμα 2.4: Σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων [14].

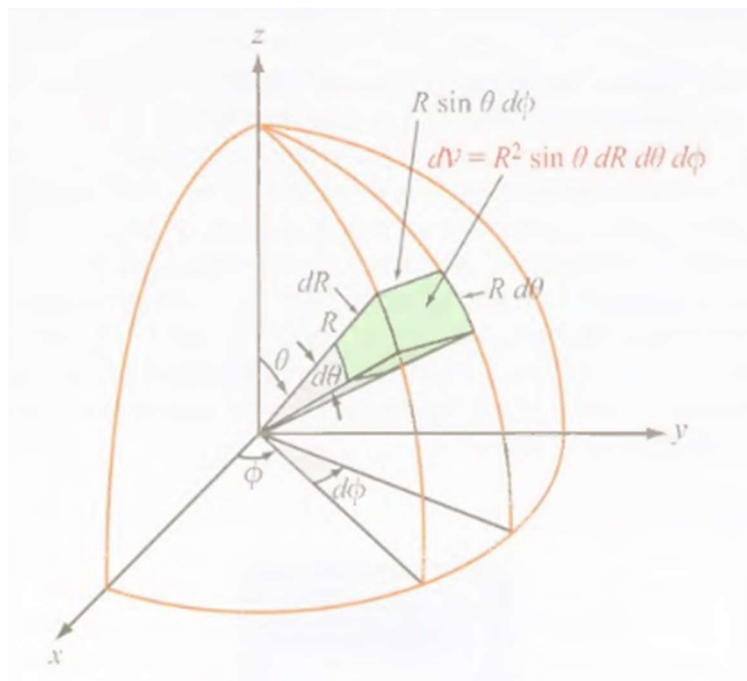
Στο επίπεδο, το μέτρο μίας γωνίας είναι το ακτίνο (radian, rad), του οποίου οι μονάδες μέτρησης είναι το rad. Το ακτίνο ορίζεται ως η επίπεδη γωνία που έχει την κορυφή της στο κέντρο ενός κύκλου ακτίνας R και υποτείνεται σε ένα τόξο μήκους R . Ένας πλήρης κύκλος έχει 2π rad. Αντίστοιχα, στον τρισδιάστατο χώρο, το μέτρο μίας στερεάς γωνίας είναι το στερεακτίνο (steradian, sr). Το στερεακτίνο ορίζεται ως η στερεά γωνία που έχει την κορυφή της στο κέντρο μίας σφαίρας ακτίνας R και υποτείνεται σε μία σφαιρική επιφάνεια που έχει το εμβαδόν ενός τετραγώνου πλευράς r , όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5. Αφού η επιφάνεια μίας σφαίρας ακτίνας r είναι $A = 4\pi R^2$, μία σφαίρα έχει $4\pi R^2 / R^2 = 4\pi$ sr.

Αφού η ικωβιανή ορίζουσα για τις σφαιρικές συντεταγμένες είναι $R^2 \sin \theta$ και ο στοιχειώδης όγκος μίας σφαίρας είναι $dV = dx dy dz = R^2 \sin \theta dR d\theta d\varphi$ η στοιχειώδης επιφάνεια αυτής είναι

$$dA = \frac{dV}{dR} = R^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.6)$$

επομένως, η στοιχειώδης στερεά γωνία μίας σφαίρας είναι

$$d\Omega = \frac{dA}{R^2} = \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.7)$$

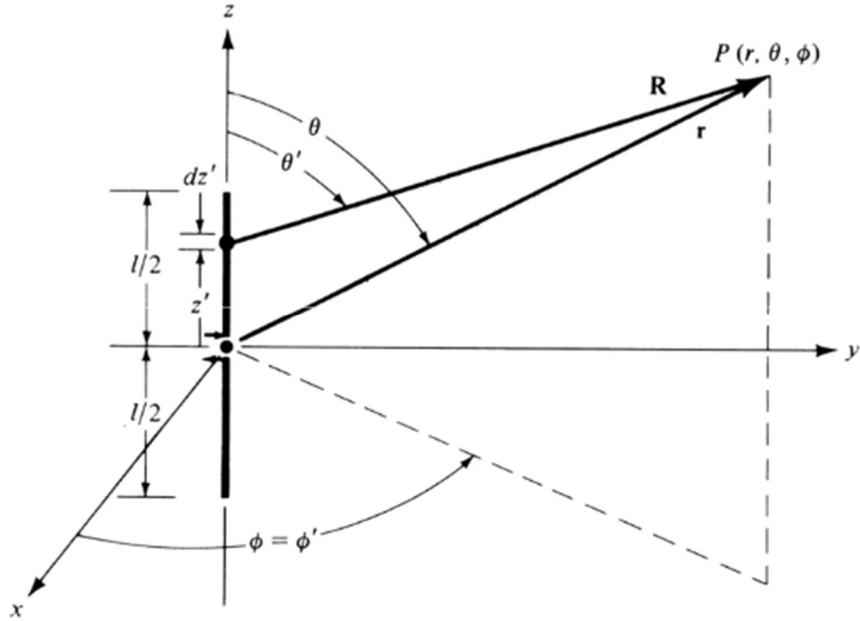


Σχήμα 2.5: Στερεά γωνία και στερεακτίνο [14].

2.1.4 Ακτινοβολία στοιχειώδους δίπολου στο μακρινό πεδίο

Η πιο απλή δομή ενός στοιχείου ακτινοβολίας είναι ένας ευθύγραμμος αγωγός μήκους $l \ll \lambda$, που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και η ρευματική κατανομή είναι σταθερή σε όλο το μήκος του. Η διάταξη αυτή αποκαλείται ως στοιχειώδες ηλεκτρικό δίπολο ή δίπολο Herz [3]. Κάθε σύστημα ακτινοβολίας μπορεί να αναλυθεί με τη θεώρηση πως η διάταξη είναι μία υπέρθεση τέτοιων στοιχειωδών τμημάτων.

Θεωρείται δίπολο μήκους l του σχήματος 2.6, με διεύθυνση τον άξονα z και αναζητείται το ηλεκτρικό πεδίο σε απόσταση $r \gg \lambda$.



Σχήμα 2.6: Υπολογισμός πεδίου δίπολου Herz [1]

Ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου διευκολύνεται με τη χρήση των σφαιρικών συντεταγμένων. Οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου σε σφαιρικές συντεταγμένες που προκύπτουν είναι

$$E_r = -j \frac{\eta_0 I_0 l}{2\pi} e^{-jkr} \left(j \frac{1}{r^2} + \frac{1}{kr^3} \right) \cos \theta \quad (2.8)$$

$$E_\theta = -j \frac{\eta_0 I_0 l}{4\pi} e^{-jkr} \left(-\frac{k}{r} + j \frac{1}{r^2} + \frac{1}{kr^3} \right) \sin \theta \quad (2.9)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.10)$$

Επειδή, συνήθως η μακρινή περιοχή είναι αυτή που παρουσιάζει ενδιαφέρον η συμπεριφορά των διατάξεων ακτινοβολίας, οι όροι ανώτερης τάξης μπορούν να παραληφθούν. Κρατώντας μόνο τους όρους ης μορφής $\frac{1}{r}$, είναι

$$E_r \cong 0 \quad (2.11)$$

$$E_\theta = j \frac{\eta_0 I_0 k l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin \theta \quad (2.12)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.13)$$

Αντίστοιχα, με την ίδια παραδοχή, οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου σε σφαιρικές συντεταγμένες είναι

$$H_r \cong 0 \quad (2.14)$$

$$H_\theta = 0 \quad (2.15)$$

$$H_\phi = j \frac{I_0 k l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin \theta \quad (2.16)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, οι επιφάνειες σταθερής φάσης έχουν τη μορφή σφαίρας με κέντρο το δίπολο. Το ακτινοβολούμενο κύμα είναι σφαιρικό και μη ομοιόμορφο και ισχύει, στο μακρινό πεδίο, πως

$$\frac{E_\theta}{H_\phi} = \eta_0 = 120\pi \Omega \quad (2.17)$$

Ο λόγος, δηλαδή, των εγκάρσιων προς τη διεύθυνση διάδοσης πεδιακών συνιστωσών είναι ίσος με τη χαρακτηριστική κυματική αντίσταση του κενού. Συμπερασματικά, στο μακρινό πεδίο, το σφαιρικό κύμα έχει χαρακτηριστικά επίπεδου κύματος, καθώς για αποστάσεις πολύ μακριά από το δίπολο και σε περιορισμένη έκταση στο χώρο, οι σφαιρικές ισοφασικές επιφάνειες προσεγγίζονται με επίπεδα.

Η πυκνότητα ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μακρινό πεδίο υπολογίζεται από το πραγματικό μέρος του μιγαδικού διανύσματος Poynting, δηλαδή

$$S_r = \frac{1}{2} \text{Re}\{\vec{E} \times \vec{H}^*\} = \frac{1}{2} \text{Re}\{E_\theta H_\phi^*\} \hat{r} \quad (2.18)$$

και η πυκνότητα ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας είναι ίση με

$$P_r = \frac{1}{2} \text{Re}\{E_\theta H_\phi^*\} = \frac{n_0 I_0 k^2 l^2}{32\pi^2 r^2} \sin^2 \theta \quad (2.19)$$

και η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς υπολογίζεται από το επιφανειακό ολοκλήρωμα

$$W_r = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta}^{\pi} (P_r r^2 \sin \theta) d\theta d\phi = \frac{n_0 I_0 k^2 l^2}{12\pi} \quad (2.20)$$

και είναι ανεξάρτητο από την ακτίνα της σφαίρας. Η ένταση ακτινοβολίας προς μία ορισμένη κατεύθυνση είναι η ισχύς που ακτινοβολείται τη διάταξη ακτινοβολίας ανά μονάδα στερεάς γωνίας και είναι ίση με.

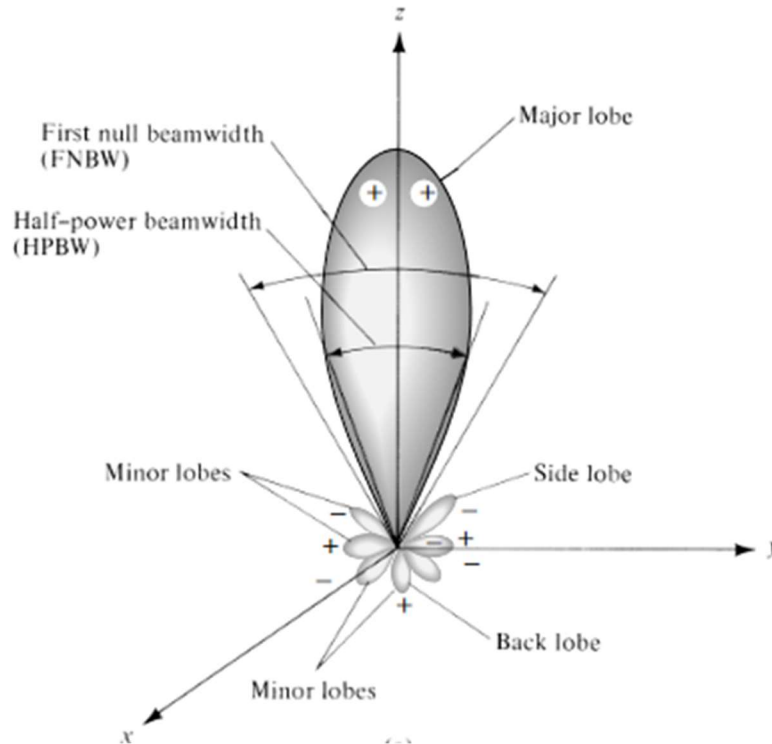
$$U = \frac{n_0 I_0 k^2 l^2}{32\pi^2 r^2} r^2 \sin^2 \theta = \frac{n_0 I_0 k^2 l^2}{32\pi^2} \sin^2 \theta \quad (2.21)$$

2.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας (radiation patterns) είναι γραφήματα που απεικονίζουν τη μεταβολή του πεδίου ή της ισχύος στο χώρο, σε μορφή πολικών γραφημάτων του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορα χαρακτηριστικά επίπεδα. Στις περισσότερες περιπτώσεις το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται για τη μακρινή περιοχή μίας κεραίας. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αναπαράστασης διαγραμμάτων ακτινοβολίας είναι σε σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων, με κέντρο χαρακτηριστικό σημείο της κεραίας. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, για την περιγραφή του τρόπου ακτινοβολίας της κεραίας αρκεί να σχεδιαστούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας θ για συγκεκριμένες τιμές της γωνίας ϕ και τα διαγράμματα συναρτήσει της γωνίας ϕ για συγκεκριμένες τιμές της γωνίας θ . Η απεικόνιση τέτοιων διαγραμμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς συλλέγονται πληροφορίες για τις διευθύνσεις μέγιστης ακτινοβολίας και τον τρόπο μεταβολής του πεδίου προς τις άλλες διευθύνσεις.

Η κύρια δέσμη του διαγράμματος ακτινοβολίας μίας κεραίας, αποκαλούμενη και συχνά ως ο κύριος λοβός (major lobe) του διαγράμματος είναι ο λοβός ακτινοβολίας εκείνος, του οποίου το εύρος γωνιών περιέχει τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας του στοιχείου. Οι υπόλοιποι λοβοί που εμφανίζονται στα διαγράμματα ακτινοβολίας είναι μικρότεροι από τον κύριο (minor lobes). Ως πλευρικοί λοβοί (side lobes) χαρακτηρίζονται οι λοβοί που προσανατολίζεται σε διεύθυνση διαφορετική από την επιθυμητή και συνήθως γειτνιάζει με τον κύριο λοβό. Ο λοβός που σχηματίζει γωνία περίπου ίση με 180° με τον κύριο λοβό ονομάζεται οπίσθιος λοβός (back lobe) [2]. Το Σχήμα 2.7 δείχνει τους πιθανούς λοβούς σε ένα συμμετρικό τρισδιάστατο πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Το γωνιακό εύρος

μισής ισχύος (Half-power beamwidth) είναι το εύρος γωνιών εκατέρωθεν της κύριας δέσμης του διαγράμματος, κατά το οποίο η ένταση ακτινοβολίας είναι η μισή (-3 dB) της μέγιστης. Τέλος το γωνιακό εύρος πρώτου μηδενισμού (First null beamwidth) αναφέρεται στη γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πρώτων μηδενικών του διαγράμματος.



Σχήμα 2.7 Λοβοί ακτινοβολίας [1]

Γενικά, οι πλευρικοί λοβοί αντιπροσωπεύουν ακτινοβολία σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις και κατά την ανάλυση και τον σχεδιασμό πρέπει να ληφθεί υπόψιν η ελαχιστοποίησή τους. Η στάθμη των μικρότερων από τον κύριο λοβό εκφράζεται ως ο λόγος της πυκνότητας ισχύος τους προς την πυκνότητα ισχύος του κύριου λοβού ή ως η διαφορά τους, όταν αυτές εκφράζονται σε dB. Ο λόγος αυτός αναφέρεται στη βιβλιογραφία συνήθως ως λόγος ή στάθμη πλευρικού λοβού και στις περισσότερες εφαρμογές αποτελέσματα μικρότερα των -20 dB είναι αποδεκτά.

2.2.1 Κατευθυντικότητα

Ένα μέγεθος που μπορεί να βελτιώσει την περιγραφή των ιδιοτήτων ακτινοβολίας ενός στοιχείου ακτινοβολίας είναι η ικανότητά του να συγκεντρώνει την εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του σε ορισμένες διευθύνσεις έναντι άλλων [3]. Αυτό ακριβώς εκφράζει ο όρος της συνάρτησης κατευθυντικότητας. Η συνάρτηση κατευθυντικότητας εκφράζει την ικανότητα μίας κεραίας να συγκεντρώσει την ακτινοβολία σε μία ορισμένη διεύθυνση γωνίας ανύψωσης θ και πολικής γωνίας ϕ . Η συνάρτηση αυτή ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διεύθυνση (θ, ϕ) προς τη μέση πυκνότητα ισχύος σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις και γράφεται

$$D(\theta, \phi) = \frac{P_r(\theta, \phi)}{P_{r,av}} \quad (2.22)$$

Πιο γενικά όμως, η πυκνότητα ισχύος σε μία σφαιρική επιφάνεια είναι ο λόγος της ακτινοβολούμενης ισχύος προς την επιφάνεια της εν λόγω σφαίρας και η γενική συνάρτηση κατευθυντικότητας δίνεται από τη σχέση

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi r^2 P_r(\theta, \phi)}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta}^{\pi} (P_r r^2 \sin \theta) d\theta d\phi} = \frac{4\pi P_r(\theta, \phi)}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta}^{\pi} (P_r \sin \theta) d\theta d\phi} \quad (2.23)$$

Η συνάρτηση κατευθυντικότητας όμως πολλές φορές αναφέρεται και ως ο λόγος έντασης ακτινοβολίας μίας κεραίας προς την ένταση ακτινοβολίας ενός ιστροπικού στοιχείου ακτινοβολίας, U_0 , και γράφεται

$$D(\theta, \phi) = \frac{P_r(\theta, \phi)}{U_0} = \frac{4\pi P_r(\theta, \phi)}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta}^{\pi} (P_r \sin \theta) d\theta d\phi} \quad (2.24)$$

ενώ μετριέται σε dBi. Γενικά, ο όρος ιστροπικό στοιχείο ακτινοβολίας αναφέρεται σε έναν ακτινοβολητή που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις διευθύνσεις του χώρου. Τέτοιου είδους ακτινοβολία μπορεί να επιτύχει μόνο η σημειακή πηγή. Συνήθως όμως περιγράφεται ως μία υποθετική μορφή κεραίας που χρησιμοποιείται ως στοιχείο αναφοράς για τον προσδιορισμό της κατευθυντικότητας πραγματικών κεραιών.

Στις περισσότερες εφαρμογές η διεύθυνση ενδιαφέροντος είναι αυτή του μεγίστου και, ως αποτέλεσμα, η πιο χρήσιμη παράμετρος που μπορεί να κοιτάξει κανείς είναι αυτή της κατευθυντικότητας. Τον λόγο δηλαδή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος προς τη μέση πυκνότητα ισχύος και ισούται με

$$D = \frac{P_{r,max}}{W_r/(4\pi r^2)} = \frac{4\pi P_{r,max}}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta}^{\pi} (P_r \sin \theta) d\theta d\phi} \quad (2.25)$$

Σημαντικά συμπεράσματα για την κατευθυντικότητα μίας διάταξης ακτινοβολίας μπορούν να εξαχθούν από το σχετικό διάγραμμα ακτινοβολίας.

2.2.2 Κέρδος κεραίας

Ένα άλλο συχνά αναφερόμενο μέγεθος κατά την ανάλυση και σχεδίαση των κεραιών είναι το κέρδος ισχύος ή απολαβή της κεραίας, συνάρτηση των γωνιών θ και ϕ και γράφεται

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi P_{r,max}}{P_{in}} \quad (2.26)$$

όπου P_{in} η ισχύς τροφοδότησης της κεραίας. Η συνάρτηση κέρδους διαφέρει από τη συνάρτηση της κατευθυντικότητας με την έννοια πως λαμβάνει υπόψιν την ισχύ τροφοδότησης, αντί για την ισχύ ακτινοβολίας και, στην ουσία, είναι ένα μέτρο αποδοτικότητας της τροφοδοσίας μίας κεραίας. Όπως και με τη συνάρτηση κατευθυντικότητας, έτσι και εδώ, στις περισσότερες εφαρμογές το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διεύθυνση στην οποία το κέρδος έχει τη μέγιστη τιμή του και, κατά αντιστοιχία με την κατευθυντικότητα, ονομάζεται κέρδος [2]. Υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$G = \frac{4\pi P_{r,max}}{P_{in}} \quad (2.27)$$

Η ισχύς ακτινοβολίας είναι ανάλογη με την ισχύ τροφοδότησης κατά έναν παράγοντα e , δηλαδή ισχύει πως

$$P_{rad} = eP_{in} \quad (2.28)$$

όπου e είναι ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας που περιγράφει τις απώλειες της κεραίας, χωρίς όμως να συμπεριλαμβάνονται οι ανακλάσεις λόγω έλλειψης προσαρμογής. Συνεπώς ισχύει η σχέση που συνδέει την απολαβή της κεραίας με την κατευθυντικότητα της

$$G(\theta, \phi) = eD(\theta, \phi) \quad (2.29)$$

και ανάλογα, η μέγιστή τιμή της συνάρτησης απολαβής συνδέεται με τη μέγιστη τιμή της συνάρτησης κατευθυντικότητας

$$G = eD \quad (2.30)$$

2.2.3 Απόδοση κεραίας

Η ολική απόδοση μίας κεραίας (efficiency) είναι ένα μέγεθος που εκφράζει τις απώλειες στους ακροδέκτες εισόδου, αλλά και μέσα στη δομή της κεραίας [1]. Οι απώλειες αυτές μπορούν να οφείλονται σε ανακλάσεις μη προσαρμογής μεταξύ της γραμμής μεταφοράς και της κεραίας ή/και σε διηλεκτρικές απώλειες και απώλειες αγωγιμότητας. Η απόδοση μίας κεραίας e_0 υπολογίζεται από την εξίσωση

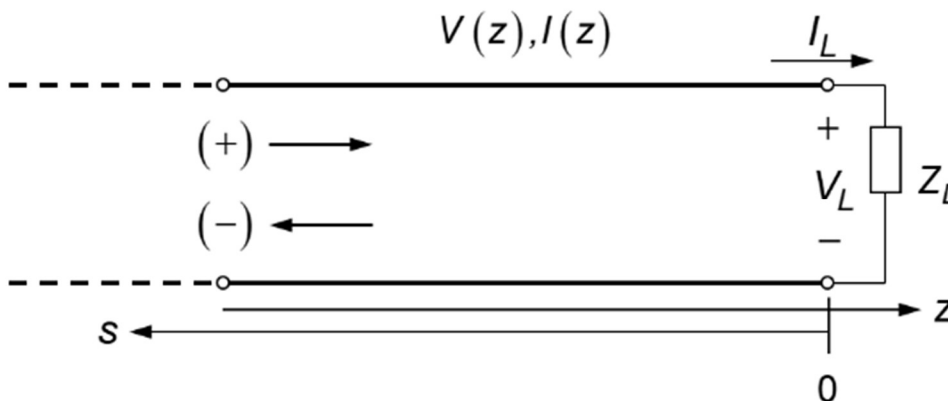
$$e_0 = e_r e_c e_d D \quad (2.31)$$

όπου e_r είναι η απόδοση ανακλάσεων λόγω αποπροσαρμογής, e_c η απόδοση αγωγιμότητας και e_d η διηλεκτρική απόδοση. Οι αποδόσεις $e_c e_d$ συχνά αναφέρονται ως απόδοση ακτινοβολίας, e_{cd} , της κεραίας και η παραπάνω εξίσωση συχνά παίρνει τη μορφή

$$e_0 = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2)D \quad (2.32)$$

2.3 Τερματισμός γραμμής μεταφοράς

Μία γραμμή μεταφοράς τροφοδοτεί με ροή ισχύος ένα φορτίο, όπως μία κεραία. Ουσιαστικά, το φορτίο αυτό μπορεί να αποτυπωθεί με μία σύνθετη αντίσταση Z_L . Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, η σχέση της σύνθετης αντίστασης του φορτίου με τη χαρακτηριστική αντίσταση επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά της ροής ισχύος στη γραμμή. Για την παρακάτω ανάλυση γίνεται η παραδοχή πως οι απώλειες στην εξεταζόμενη γραμμή είναι αμελητέες. Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται η κυκλωματική αναπαράσταση μίας τερματισμένης γραμμής μεταφοράς.



Σχήμα 2.8: Τερματισμένη γραμμής μεταφοράς [3].

2.3.1 Ανακλώμενο κύμα

Έστω πως, πριν από την γραμμή μεταφοράς παράγεται ένα σήμα της μορφής $V^+e^{-j\beta z}$. Υποθέτοντας άπειρη γραμμή, η χαρακτηριστική της αντίσταση Z_0 σε κάθε σημείο της θα ισούται με τον λόγο της τάσης προς το ρεύμα. Αν όμως η γραμμή τερματίζεται σε ένα φορτίο με χαρακτηριστική αντίσταση Z_L , τότε ο λόγος αυτός, αναγκαστικά, θα ισούται με Z_L . Η τάση και το ρεύμα στην γραμμή μεταφοράς περιγράφονται από τις εξισώσεις

$$V(z) = V^+e^{-\gamma z} + V^-e^{\gamma z} D \quad (2.39)$$

και

$$I(z) = \frac{Y}{R + j\omega L} (V^+e^{-\gamma z} + V^-e^{\gamma z}) D \quad (2.40)$$

αντίστοιχα.

Στην θεωρία των γραμμών μεταφοράς συνήθως, χρησιμοποιείται μεταβλητή μήκους $s = -z$, με κατεύθυνση από το φορτίο προς την πηγή. Τελικά, η μορφή των εξισώσεων της τάσης και του ρεύματος συναρτήσει της απόστασης από το φορτίο είναι

$$V(s) = V^+e^{j\beta s} + V^-e^{-j\beta s} \quad (2.41)$$

και

$$I(s) = \frac{1}{Z_0} (V^+e^{j\beta s} - V^-e^{-j\beta s}) \quad (2.42)$$

αντίστοιχα.

Σε απόσταση από το φορτίο $s = 0$ η σχέση τάσης και ρεύματος είναι από τις (προηγούμενες εξισώσεις).

$$V(0) = Z_L I(0) \quad (2.43)$$

ή

$$V^+ + V^- = Z_L \frac{1}{Z_0} (V^+ - V^-) \quad (2.44)$$

Επομένως, ο λόγος του πλάτους του ανακλώμενου σήματος προς το πλάτος του προσπίπτοντος σήματος στο φορτίο ($s = 0$), δηλαδή ο συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient) στο φορτίο, είναι

$$\Gamma_L = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.45)$$

Σύμφωνα με αυτό, η σύνθετη αντίσταση του φορτίου μπορεί να γραφεί συναρτήσει του συντελεστή ανάκλασης Γ_L

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \quad (2.46)$$

Εν τέλει, γράφονται οι εξισώσεις της τάσης και του ρεύματος στην γραμμή

$$V(s) = V^+ (e^{j\beta s} + \Gamma_L e^{-j\beta s}) \quad (2.47)$$

και

$$I(s) = \frac{V^+}{Z_0} (e^{j\beta s} - \Gamma e^{-j\beta s}) \quad (2.48)$$

αντίστοιχα.

Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί πως συμβαίνει υπέρθεση του ανακλώμενου κύματος με ένα ίσο σε πλάτος μέρος του προσπίπτοντος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός στάσιμου κύματος. Συνεπώς, το κύμα στη γραμμή μεταφοράς θα είναι με τη σειρά του η υπέρθεση ενός οδεύοντος κύματος και ενός στάσιμου κύματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ρεύμα και η τάση στην γραμμή μεταφοράς να μην είναι σταθερά, αλλά να παρουσιάζουν ταλάντωση. Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις γραμμών μεταφοράς το στάσιμο κύμα είναι ανεπιθύμητο. Πρέπει δηλαδή, ο συντελεστής ανάκλασης στο φορτίο, Γ , να είναι 0 και άρα η σύνθετη αντίσταση φορτίου θα πρέπει να ισούται με τη σύνθετη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Όταν αυτό επιτευχθεί, λέγεται πως υπάρχει προσαρμογή (matching) ή, διαφορετικά λέγεται πως το φορτίο είναι προσαρμοσμένο στη γραμμή. Για λόγους προτυποποίησης, οι γραμμές που χρησιμοποιούνται έχουν συγκεκριμένες τιμές χαρακτηριστικής αντίστασης (συνήθως 50, 75, 300 Ω), ωστόσο η σύνθετη αντίσταση ενός φορτίου μπορεί να έχει κάποια αυθαίρετη τιμή. Για τον λόγο αυτό, ανάμεσα στην γραμμή μεταφοράς και στο φορτίο, παρεμβάλλονται κυκλώματα κατάλληλα για να επιτύχουν την προσαρμογή των δύο. Τα κυκλώματα αυτά λέγονται κυκλώματα προσαρμογής (matching circuits) [3].

2.3.2 Αντίσταση εισόδου γραμμής μεταφοράς

Η αντίσταση εισόδου της γραμμής μεταφοράς εξαρτάται και από τον τερματισμό της και από το μήκος της. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, επειδή το κύμα στη γραμμή μεταφοράς είναι η υπέρθεση ενός οδεύοντος κύματος και ενός στάσιμου κύματος, η τάση και το ρεύμα κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς παρουσιάζουν μεταβολή. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με την αντίσταση εισόδου της γραμμής. Στην είσοδο της γραμμής ($s = l$), l το μήκος της, η αντίσταση που βλέπει το υπόλοιπο, προς τα αριστερά της γραμμής, κύκλωμα, εξαρτώμενη από τον συντελεστή ανάκλασης Γ και του ηλεκτρικού της μήκους βl , είναι

$$Z_{in} = \frac{V(l)}{I(l)} = Z_0 \frac{V^+(e^{j\beta l} + \Gamma e^{-j\beta l})}{V^+(e^{j\beta l} - \Gamma e^{-j\beta l})} = Z_0 \frac{1 + \Gamma e^{-2j\beta l}}{1 - \Gamma e^{-2j\beta l}} \quad (2.49)$$

Συσχετίζοντας τις εξισώσεις (για Z_L και Z_{in}), μπορεί να γενικευθεί η έννοια του συντελεστή ανάκλασης, ορίζοντάς τον σε οποιαδήποτε θέση της γραμμής μεταφοράς και, εννοείται, στη είσοδό της ως

$$\Gamma(s) = \frac{V^- e^{-j\beta l}}{V^+ e^{-j\beta l}} = \Gamma e^{-2j\beta s} \quad (2.50)$$

και

$$\Gamma_{in} = \Gamma e^{-2j\beta l} \quad (2.51)$$

όπου Γ ο συντελεστής ανάκλασης στο φορτίο. Σε κάθε σημείο της γραμμής και στην είσοδό της, η ισodύναμη αντίσταση σχετίζεται με τον συντελεστή ανάκλασης στο σημείο αυτό από την σχέση

$$Z(s) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(s)}{1 - \Gamma(s)} \quad (2.52)$$

ή

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}} \quad (2.53)$$

αντίστοιχα. Παρατηρείται πως σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής μεταφοράς, ανάμεσα στην ισοδύναμη αντίσταση και τον συντελεστή ανάκλασης, υπάρχει πάντα η ίδια σχέση μετασχηματισμού. Στα μικροκυματικά κυκλώματα, ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να μετρηθεί άμεσα, σε αντίθεση με την αντίσταση εισόδου, που χρειάζεται, μέσω της σχέσης (τελευταία) να μετρηθεί έμμεσα. Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιείται περισσότερο, μπορεί εύκολα να προκύψει από την χρήση της παραπάνω εξίσωσης για τον συντελεστή ανάκλασης:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(Z_L + Z_0)e^{j\beta l} + (Z_L - Z_0)e^{-j\beta l}}{(Z_L + Z_0)e^{j\beta l} - (Z_L - Z_0)e^{-j\beta l}} = Z_0 \frac{Z_L \cos \beta l + jZ_0 \sin \beta l}{Z_0 \cos \beta l + jZ_L \sin \beta l}$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.54)$$

Αυτή είναι η γενική σχέση για τη σύνθετη αντίσταση εισόδου γραμμής μεταφοράς με μηδενικές ή αμελητέες απώλειες.

2.3.3 Ροή ισχύος σε γραμμή μεταφοράς

Στην περίπτωση που υπάρχει ανακλώμενο κύμα και, συνεπώς, δεν υπάρχει προσαρμογή, η ροή ισχύος προς το φορτίο επηρεάζεται. Η μέση χρονική τιμή της ισχύος σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής μεταφοράς είναι

$$P_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}\{V(s)I^*(s)\}$$

$$P_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}\{V^+(e^{j\beta s} + \Gamma e^{-j\beta s}) \frac{(V^+)^*}{Z_0} (e^{-j\beta s} - \Gamma^* e^{j\beta s})\}$$

$$P_{av} = \frac{|V^+|^2}{2Z_0} \text{Re}\{1 - |\Gamma|^2 + 2j\text{Im}\Gamma e^{-2j\beta s}\} \quad (2.55)$$

και τελικά η ισχύς που δίνεται στο φορτίο είναι ίση με

$$P_{av} = \frac{|V^+|^2}{2Z_0} (1 - |\Gamma|^2) = \frac{|V^+|^2}{2Z_0} - \frac{|\Gamma|^2 |V^+|^2}{2Z_0} \quad (2.56)$$

όπου και διακρίνονται δύο όροι ισχύος. Ένας όρος της ισχύος του προσπίπτοντος κύματος στο φορτίο $\left(\frac{|V^+|^2}{2Z_0}\right)$ και ένας της ισχύος του ανακλώμενου κύματος $\left(\frac{|\Gamma|^2 |V^+|^2}{2Z_0}\right)$. Από την σχέση αυτή, συμπεραίνεται πως για να υπάρχει μέγιστη ροή ισχύος στο φορτίο, θα πρέπει να υπάρχει προσαρμογή ($\Gamma = 0$). Στην περίπτωση που το $|\Gamma| = 1$ δεν υπάρχει καθόλου μεταφορά ισχύος στο φορτίο και το κύμα είναι εξ ολοκλήρου στάσιμο. Επομένως, επιθυμείται η ελαχιστοποίηση του συντελεστή ανάκλασης. Αξίζει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί, πως τα παραπάνω ισχύουν σε περίπτωση που δεν υπάρχει ανάκλαση από οτιδήποτε βρίσκεται από τα αριστερά της γραμμής μεταφοράς (συνήθως γεννήτρια).

Συνοψίζοντας, όταν το φορτίο δεν είναι προσαρμοσμένο στη γραμμή μεταφοράς, η παραγόμενη από τη γεννήτρια ισχύς δεν παρέχεται εξ ολοκλήρου στο φορτίο. Υπάρχει μία ποσότητα ισχύος, μία “απώλεια” ισχύος, οφειλόμενη στο ανακλώμενο κύμα και ονομάζεται απώλεια επιστροφής (return loss) και εκφράζεται σε dB από την σχέση.

$$RL = 10 \log|\Gamma|^2 = 20 \log|\Gamma| \text{ (dB)} \quad (2.57)$$

Στο σημείο αυτό είναι θεμιτό γίνει εισαγωγή του όρου του εύρους ζώνης (bandwidth, BW). Ως εύρος ζώνης μίας κεραίας ορίζεται ως η συχνοτική περιοχή, μέσα στην οποία ορισμένα χαρακτηριστικά της κεραίας ικανοποιούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Συγκεκριμένα, είναι η περιοχή συχνοτήτων εκείνη, εκατέρωθεν της συχνότητας συντονισμού όπου χαρακτηριστικά της κεραίας, όπως το διάγραμμα επιστροφής απωλειών ή η σύνθετη αντίσταση εισόδου έχουν τιμές αποδεκτές σε σχέση με αυτές στη συχνότητα συντονισμού. Συνήθως γίνεται διάκριση μεταξύ των μεταβολών του διαγράμματος επιστροφής απωλειών και στις περισσότερες περιπτώσεις, το αποδεκτό κατώφλι δεξιά και αριστερά της συχνότητας συντονισμού είναι τα -10 dB. Στην περίπτωση αυτήν γίνεται λόγος για εύρος ζώνης RL και μπορεί να υπολογιστεί ποσοστιαία από τον λόγο

$$BW(\%) = \left[\frac{f_H - f_L}{f_r} \right] \cdot 100 \quad (2.58)$$

όπου f_H και f_L η ανώτερη και κατώτερη αποδεκτή συχνότητα αντίστοιχα.

2.3.4 Λόγος στασίμου κύματος (SWR)

Προηγουμένως καλύφθηκε πως το πλάτος της τάσης στη γραμμή, σε περίπτωση που δεν υπάρχει προσαρμογή, δεν είναι σταθερό, σε αντίθεση με την περίπτωση που υπάρχει προσαρμογή, που το μέτρο της τάσης είναι σταθερό και ίσο με $|V(s)| = |V^+ e^{j\beta s}| = |V^+|$. Από εξίσωση για την τάση στη γραμμή, στην γενική περίπτωση ισχύει

$$\begin{aligned} |V(s)| &= |V^+| |e^{j\beta s} + \Gamma e^{-j\beta s}| \\ |V(s)| &= |V^+| |e^{j\beta s}| |1 + \Gamma e^{-2j\beta s}| = |V^+| |1 + |\Gamma| e^{j(\psi - 2\beta s)}| \end{aligned} \quad (2.59)$$

όπου ψ είναι η φάση του συντελεστή ανάκλασης ($\Gamma = |\Gamma| e^{j\psi}$). Επομένως το πλάτος της τάσης παρουσιάζει περιοδική κυμάτωση κατά το μήκος της γραμμής μεταφοράς. Το μέγιστο πλάτος που μπορεί να έχει η τάση στην γραμμή είναι

$$V_{max} = |V^+| (1 + |\Gamma|) \quad (2.60)$$

όταν δηλαδή ο όρος της φάσης ($e^{j(\psi - 2\beta s)}$) έχει τιμή 1. Αντίθετα, όταν ο όρος της φάσης έχει τιμή ίση με -1, τότε το ελάχιστο πλάτος που μπορεί να έχει η τάση είναι

$$V_{min} = |V^+| (1 - |\Gamma|) \quad (2.61)$$

Αφού ο όρος $e^{j(\psi - 2\beta s)}$ έχει περιοδικότητα 2π , η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ελαχίστων (ή δύο διαδοχικών μεγίστων) είναι $\lambda/2$, καθώς για $2\beta s = 2\pi$ ή $2(2\pi/\lambda)s = 2\pi$, προκύπτει $s = \lambda/2$. Άρα η μικρότερη απόσταση μεταξύ μεγίστου-ελαχίστου είναι $\lambda/4$.

Ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη σε μία γραμμή μεταφοράς, είναι ο λόγος στασίμου κύματος (standing wave ratio, SWR) ή λόγος στασίμου κύματος τάσης (voltage standing wave ratio, VSWR). Αυτό το μέγεθος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τάσης κατά το μήκος της γραμμής προς την ελάχιστη

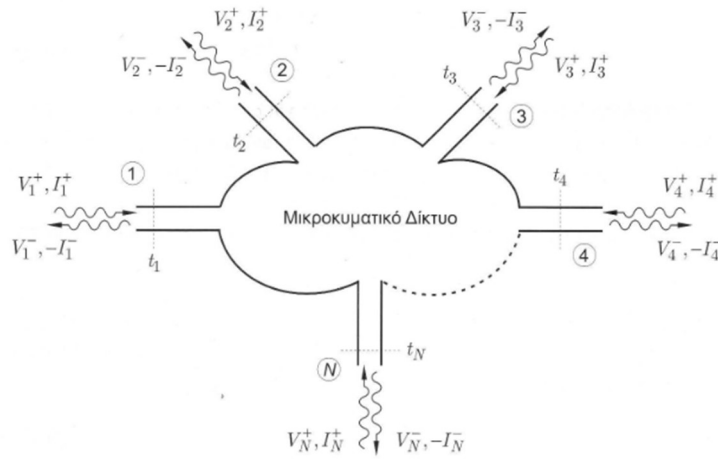
$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.62)$$

Η σημαντικότητα του μεγέθους αυτού έγκειται στο ότι είναι μία εύκολα και άμεσα μετρήσιμη ποσότητα στα μικροκυματικά κυκλώματα, σε αντίθεση με μεγέθη όπως η αντίσταση εισόδου μιας γραμμής, που η μέτρησή της σε μεγάλες συχνότητες είναι αρκετά δύσκολη. Το SWR πρακτικά είναι ένα μέτρο της προσαρμογής ανάμεσα στη γραμμή μεταφοράς και το φορτίο. Όταν υπάρχει προσαρμογή ($|\Gamma| = 0$),

τότε $SWR = 1$, ενώ όσο προσεγγίζονται συνθήκες πλήρους απώλειας προσαρμογής ($|Γ| = 1$), το SWR τείνει στο άπειρο. Συνεπώς διακρίνεται πως το πεδίο τιμών του SWR είναι $[1, \infty)$. Σε πραγματικά κυκλώματα, τιμές μέχρι $1.5 - 2$ dB θεωρούνται αποδεκτές.

2.4 Μητρώο σκέδασης

Στα μικροκυματικά κυκλώματα, εμπλεκόμενα μεγέθη όπως οι συνολικές τάσεις και ρεύματα δεν αποτελούν απευθείας μετρήσιμα μεγέθη. Τα μεγέθη ωστόσο που μπορούν να μετρηθούν άμεσα είναι οι συντελεστές ανάκλασης (ή συντελεστές μετάδοσης), και κατ' επέκταση τα πλάτη και οι φάσεις των σκεδαζόμενων κυμάτων, αυτών δηλαδή που εξέρχονται από το μικροκυματικό δίκτυο. Στο Σχήμα 2.9 τα κύματα αυτά σημειώνονται με V_i^- .



Σχήμα 2.9: Αυθαίρετο μικροκυματικό δίκτυο N-θυρών [3].

Λόγω της γραμμικής συσχέτισης των σκεδαζόμενων κυμάτων με τα προσπίπτοντα κύματα, τα σκεδαζόμενα κύματα, μπορούν να γραφούν σαν γραμμικός μετασχηματισμός των προσπιπτόντων κυμάτων σε μορφή πινάκων. Ο πίνακας $[S]$, S από την λέξη scattering, σκέδαση, που συσχετίζει τα κύματα που εισέρχονται στις θύρες του δικτύου V_i^+ με τα κύματα που εξέρχονται από αυτές V_i^- ονομάζεται πίνακας ή μητρώο σκέδασης. Ο πίνακας ορίζεται ως

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}$$

$$[V^-] = [S][V^+] \quad (2.63)$$

και τα στοιχεία αυτού του πίνακα ορίζονται σύμφωνα με την εξίσωση

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \Big|_{V_j^+ = 0 \text{ για } i \neq j} \quad (2.64)$$

με $i = 1, 2, \dots, N$ & $i \neq j$.

Κεφάλαιο 2

Με την εξίσωση αυτή εννοείται πως το στοιχείο S_{ij} μπορεί να βρεθεί οδηγώντας την θύρα j με την προσπίπτουσα τάση V_j^+ και μετρώντας το σκεδαζόμενο κύμα V_i^- που εξέρχεται από την θύρα i . Το στοιχείο S_{ij} ονομάζεται συντελεστής μετάδοσης από την θύρα j στη θύρα i . Για να μην συμβάλλουν επιπλέον ανακλάσεις ευθυνόμενες από τις υπόλοιπες θύρες του μικροκυματικού δικτύου, όλες οι υπόλοιπες θύρες τερματίζονται σε προσαρμοσμένα φορτία. Συνεπώς, σε ένα μητρώο σκέδασης, τα στοιχεία S_{ii} που βρίσκονται στην κύρια διαγώνιο του πίνακα είναι οι συντελεστές ανάκλασης, κοιτώντας στη θύρα i , όταν το προσπίπτον κύμα σε όλες τις άλλες θύρες έχει τεθεί ίσο με το μηδέν. Πρακτικά, συνηθίζεται τα στοιχεία αυτά να εκφράζονται σε dB.

$$|S_{ij}|(dB) = 20 \log S_{ij} \quad (2.65)$$

Η μέτρηση των παραμέτρων σκέδασης πραγματοποιείται με αναλυτή δικτύου ή αναλυτή κυκλωμάτων (network analyzer). Ένα εμφανές πλεονέκτημα του πίνακα σκέδασης είναι πως οι μετρήσεις των στοιχείων του πραγματοποιούνται υπό συνθήκες προσαρμογής στις θύρες που αποτελούν το μικροκυματικό δίκτυο.

Η ροή της ισχύος που εισέρχεται και εξέρχεται από τη θύρα i ορίζεται από τις εξισώσεις

$$P_n^+ = \frac{1}{2} \frac{|V_i^+|^2}{Z_{0,i}} \quad (2.66)$$

και

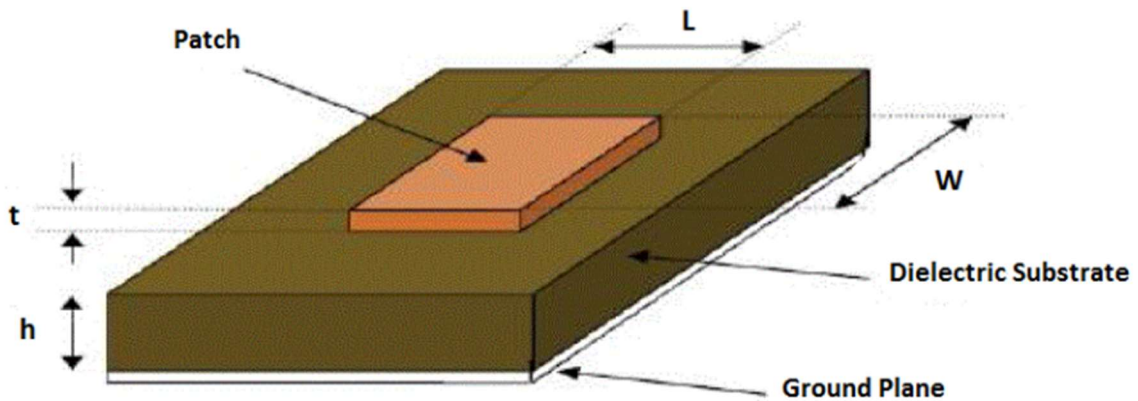
$$P_n^- = \frac{1}{2} \frac{|V_i^-|^2}{Z_{0,i}} \quad (2.67)$$

Η τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης για τις θύρες ομοαξονικών γραμμών μεταφοράς ή γραμμών μικροταινίας στις θύρες του μικροκυματικού δικτύου είναι ίδια και ίση με 50Ω .

Κεφάλαιο 3ο: Κεραίες μικροταινίας

3.1 Εισαγωγή

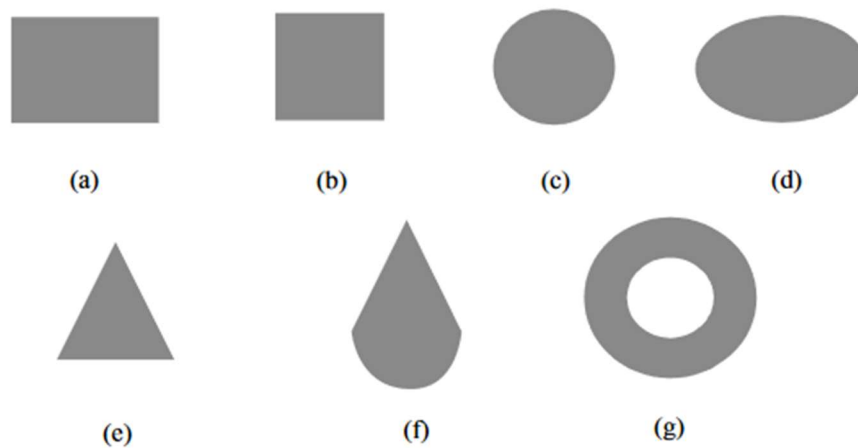
Η χρήση των κεραιών μικροταινίας έχει επεκταθεί, από την περίοδο της πρώτης εμφάνισής τους, σε μία ποικιλία εφαρμογών. Η συμβατότητά τους με επίπεδες ή μη επιφάνειες, η απλότητά τους, η μηχανική αντοχής τους και η ευκολία κατασκευής τους με τη βοήθεια της σύγχρονης τεχνολογίας τυπωμένων κυκλωμάτων είναι χαρακτηριστικά που καθιστούν τις κεραίες τέτοιου τύπου πολυχρηστικές ως προς τη συχνότητα συντονισμού, το διάγραμμα ακτινοβολίας, την πόλωση και τη σύνθετη αντίσταση [1]. Το 1953 προτάθηκε για πρώτη φορά από τον G.A. Deschamps η ιδέα των κεραιών μικροταινίας και το 1955 οι H. Gutton και G. Baissinot έλαβαν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την εργασία τους πάνω στις κεραίες μικροταινίας. Οι πρώτες μελέτες σχετικά με τις κεραίες μικροταινίας ξεκίνησαν να δημοσιεύονται δύο δεκαετίες αργότερα [15].



Σχήμα 3.1: Διάταξη κεραίας μικροταινίας [9].

Οι διηλεκτρικές σταθερές των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές κεραιών μικροταινίας έχουν τυπικές τιμές $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Στις περισσότερες περιπτώσεις, καλύτερες επιδόσεις έχουν οι κεραίες με παχύτερα υποστρώματα και διηλεκτρική σταθερά κοντά στο κατώτερο όριο της προαναφερόμενης περιοχής. Παρόλο που έτσι το μέγεθος των κεραιών αυξάνεται, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί ανεπιθύμητο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερο εύρος ζώνης και χαλαρή σύνδεση μεταξύ των πεδίων για ακτινοβολία στο χώρο. Σκοπός του σχεδιασμού της μικροταινίας είναι η εμφάνιση του μεγίστου του διαγράμματος ακτινοβολίας κάθετα της ταινίας (εγκάρσια ακτινοβολία). Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας κατάλληλα τον τρόπο διέγερσης κάτω από την ταινία.

Τα στοιχεία ακτινοβολίας και τροφοδοσίας των μικροταινιακών κεραιών αποτυπώνονται πάνω στο διηλεκτρικό υπόστρωμα με φωτοχημικές διεργασίες ή χρησιμοποιούνται χάρακτες τυπωμένων πλακετών, για κεραίες που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες. Η ταινία ακτινοβολίας μπορεί να είναι τετραγωνικού, ορθογωνικού, κυκλικού, ελλειπτικού κλπ., όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Ωστόσο, επειδή το σχήμα της λωρίδας εξαρτάται από τις προδιαγραφές της κεραίας, αυτό μπορεί να γίνει αρκετά πιο περίπλοκο [6, 7].



Σχήμα 3.2: Σχήματα ταινίας ακτινοβολίας [1].

Το μικρό βάρος και ο όγκος, ταυτόχρονα με την προσαρμοστικότητα τους σε επίπεδες ή μη επίπεδες επιφάνειες και την ευελιξία τους σε συχνότητα συντονισμού, πόλωση, διάγραμμα ακτινοβολίας και σύνθετη αντίσταση εισόδου, καθιστούν τις κεραίες μικροταινίας εξαιρετικά ευέλικτες. Επιπλέον, η εύκολη ενσωμάτωσή τους σε ήδη έτοιμα μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Microwave Integrated Circuits, MIC), η δυνατότητα πολλαπλής και ευρείας συχνοτικής λειτουργίας (multiple and wideband) αλλά και η ευκολία δημιουργίας συστοιχίας κεραίων επεκτείνουν τις εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τέλος, το χαμηλό κόστος κατασκευής τους επιτρέπει τη μαζική παραγωγή τους.

Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, το στενό εύρος ζώνης, το χαμηλό κέρδος και η χαμηλή απόδοση ακτινοβολίας καθώς και η χαμηλή ικανότητα διαχείρισης ισχύος αποτελούν προβλήματα. Επιπλέον, η κατασκευή συστοιχιών κεραίων μπορεί να είναι μία διαδικασία εύκολη, αλλά προβλήματα όπως η κατασκευή περίπλοκων δομών τροφοδοσίας, οι υψηλές ωμικές απώλειες στο επίπεδο τροφοδοσίας τους, αλλά και τα υψηλά επίπεδα διασταυρούμενης πόλωσης (cross polarization), ειδικά σε κατασκευές συστοιχίας υψηλών συχνοτήτων, δεν είναι αμελητέα ζητήματα [1, 4, 15].

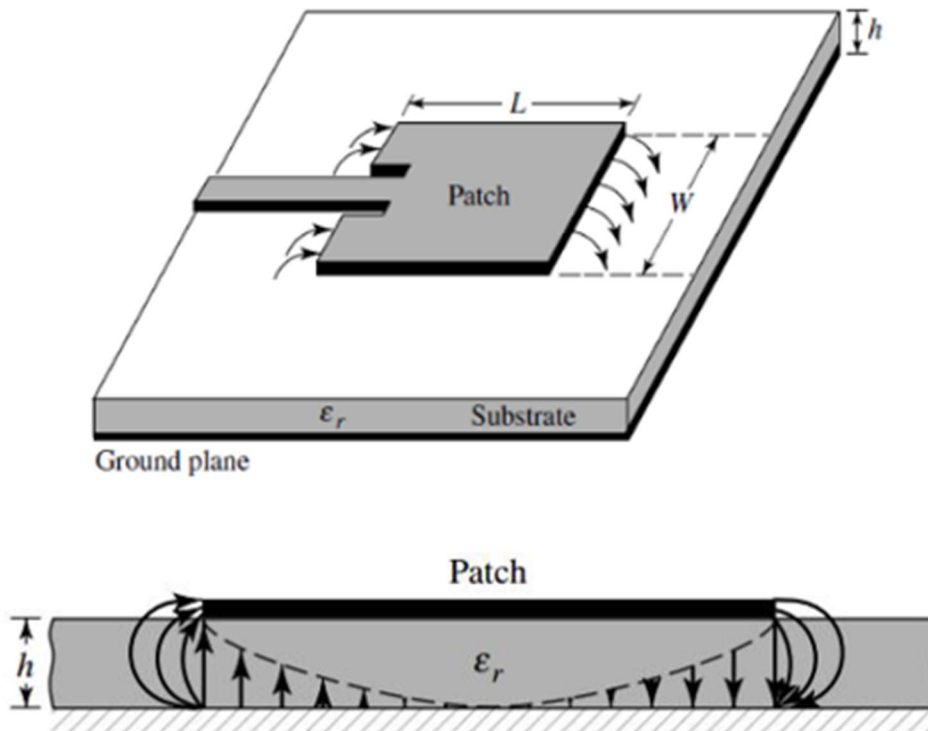
Λόγω των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι κεραίες μικροταινίας είναι πολύ δημοφιλείς σε εφαρμογές τηλεμετρίας και ασυρμάτων επικοινωνιών, όπως οι κινητές και οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα αλλά και σε βιοϊατρικά συστήματα [4, 15].

3.2 Ανάλυση λειτουργίας ορθογωνικής κεραίας μικροταινίας

Η λειτουργία της ορθογωνίας μικροταινίας αναλύεται στη βιβλιογραφία με διάφορα μοντέλα [1], ωστόσο το ευκολότερο στην απεικόνιση είναι το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς. Ουσιαστικά, στο μοντέλο της γραμμής μεταφοράς η κεραία μικροταινίας περιγράφεται ως ένα σύστημα δύο σχισμών που χωρίζονται από μία γραμμή μεταφοράς μήκους L και σύνθετης αντίστασης Z_c .

Επειδή οι διαστάσεις του πλάτους και του μήκους της λωρίδας δεν είναι άπειρες, οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές στα άκρα της σχηματίζουν κροσσούς. Το πλήθος των κροσσών εξαρτάται από το μήκος και το πλάτος της ταινίας και από το ύψος του υποστρώματος. Στο επίπεδο xy , το πλήθος των κροσσών εξαρτάται από το λόγο του μήκους της λωρίδας L προς το ύψος του υποστρώματος h και από τη διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος ϵ_r . Αυτό ακριβώς το φαινόμενο φαίνεται και στο Σχήμα

3.3. Αντίστοιχα, στο επίπεδο xz το πλήθος των κροσσών εξαρτάται από το λόγο του πλάτους της λωρίδας W προς το ύψος του υποστρώματος h και από τη διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος, ϵ_r . Αν και στις κεραίες μικροταινίας το φαινόμενο των κροσσών είναι περιορισμένο, αφού $L \gg h$ και $W \gg h$ είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψιν κατά την ανάλυση, διότι επηρεάζει τη συχνότητα συντονισμού της κεραίας.



Σχήμα 3.3: Το φαινόμενο των κροσσών ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών [1].

Η μικροταινιακή γραμμή στις κεραίες μικροταινίας είναι ανομοιογενής, αποτελείται δηλαδή από δύο διηλεκτρικά, το υπόστρωμα και τον αέρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.X. Μία τέτοια γραμμή μεταφοράς δεν είναι ικανή να υποστηρίξει ρυθμό διάδοσης TEM και, αφού υπάρχουν δύο διαφορετικά υλικά, δεν είναι ξεκάθαρο ποιο από τα δύο θα καθορίζει τη σταθερά διάδοσης.

Ένα σύστημα που δεν χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός ομογενούς διηλεκτρικού, μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς TM, TE ή και υβριδικό, αλλά όχι TEM [3]. Σε ορισμένες συνθήκες ωστόσο, ο επικρατέστερος ρυθμός μπορεί να παρουσιάζει κατά προσέγγιση τα χαρακτηριστικά του ρυθμού TEM. Ένας τέτοιος ρυθμός χαρακτηρίζεται ως σχεδόν-TEM (quasi-TEM) ρυθμός. Στον σχεδόν TEM ρυθμό οι αξονικές συνιστώσες του κύματος είναι κατά μέτρο μικρότερες από τις εγκάρσιες και η συχνότητα αποκοπής προσεγγίζει το μηδέν. Για να αποφευχθεί η παραμόρφωση του σήματος λόγω της διαφορετικής ταχύτητας διάδοσης των επιμέρους ρυθμών, είναι αναγκαίο η σχέση σταθεράς διάδοσης – συχνότητας να είναι σχεδόν γραμμική. Στον κενό χώρο, προσεγγιστικά, ο ρυθμός TM_0 είναι σχεδόν-TEM. Συμπερασματικά, το πάχος της πλακέτας πρέπει να είναι ένα πολύ μικρό μέρος του μήκους κύματος ($h \leq \frac{1}{20} \lambda$) ώστε η κανονικοποιημένη σταθερά διάδοσης (β/k_0) να είναι σχεδόν σταθερή.

Οι διατάξεις μικροταινίας είναι ικανές να υποστηρίξουν σχεδόν-TEM ρυθμούς με πολύ χαμηλή παραμόρφωση. Σε συνδυασμό με το γεγονός πως είναι πολύ εύκολο πλέον να κατασκευαστούν σε μαζικά, η χρήση τους είναι πολύ διαδεδομένη. Ως γενική αρχή ωστόσο, το πάχος της διηλεκτρικής

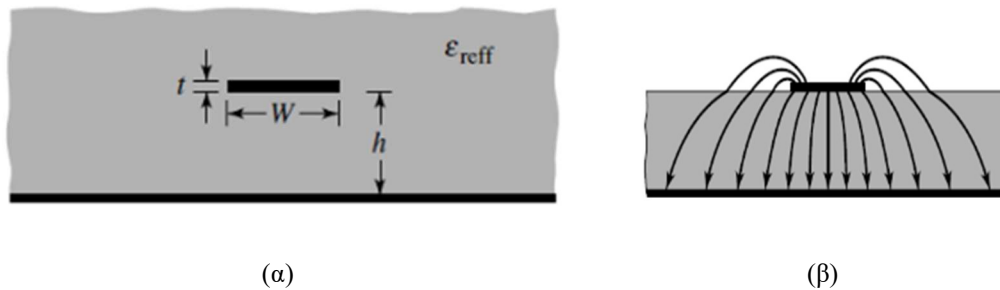
πλακέτας θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος. Ενώ, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι διατάξεις μικροταινίας ήταν γνωστές από την δεκαετία του 50, απέκτησαν αξία δύο δεκαετίες αργότερα, όταν διαπιστώθηκε η ανάγκη χρήσης πολύ λεπτών διηλεκτρικών στρωμάτων [3].

Λέγοντας όλα τα παραπάνω, οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές που βρίσκονται στον αέρα είναι ελάχιστες, ωστόσο η ύπαρξή τους κάνει τη λωρίδα να φαίνεται ηλεκτρικά μεγαλύτερη, σε σχέση με τις πραγματικές της διαστάσεις. Τελικά, για να επιλυθεί το προκείμενο πρόβλημα, εισάγεται η ενεργός διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_{r,eff}$, έτσι ώστε να υπολογιστούν οι κροσσοί και η διάδοση του κύματος στη γραμμή, που υπολογίζεται από τη σχέση

$$\epsilon_{r,eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.1)$$

όπου για μία γραμμή με αέρα πάνω από το υπόστρωμα, η ενεργός διηλεκτρική σταθερά έχει τιμή $1 < \epsilon_{r,eff} < \epsilon_r$. Στις περισσότερες εφαρμογές η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μονάδα και έτσι, συνήθως, η τιμή της ενεργού διηλεκτρικής σταθεράς είναι πιο κοντά στην τιμή της πραγματικής διηλεκτρικής σταθεράς του υποστρώματος.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας επηρεάζει την ενεργό διηλεκτρική σταθερά. Όσο η συχνότητα αυξάνεται, περισσότερες από τις ηλεκτρικές γραμμές συγκεντρώνονται στο υπόστρωμα, με αποτέλεσμα η μικροταινιακή γραμμή να συμπεριφέρεται περισσότερο ως ομοιογενής γραμμή από ένα υλικό (το υπόστρωμα) και η ενεργός διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_{r,eff}$ πλησιάζει την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του υποστρώματος, ϵ_r [1]. Στο Σχήμα 3.4.α απεικονίζεται η ενεργός διηλεκτρική σταθερά και στο Σχήμα 3.4.β οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές στην ορθογώνια κεραία μικροταινίας.



Σχήμα 3.4.: Ενεργός διηλεκτρική σταθερά (α), ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές (β) [1].

Το νέο μήκος κύματος προκύπτει από την εξίσωση

$$\lambda = \frac{c_0}{f_0 \sqrt{\epsilon_{r,eff}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{r,eff}}} \quad (3.2)$$

Υπολογίζοντας και τα παραπάνω μεγέθη, σε συνδυασμό με τα ήδη γνωστά (επιθυμητή συχνότητα συντονισμού, διηλεκτρική σταθερά υποστρώματος), μπορούν οι διαστάσεις της ορθογώνιας λωρίδας να υπολογιστούν. Το πλάτος της ορθογώνιας λωρίδας υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$W = \frac{1}{2f_0 \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (3.3)$$

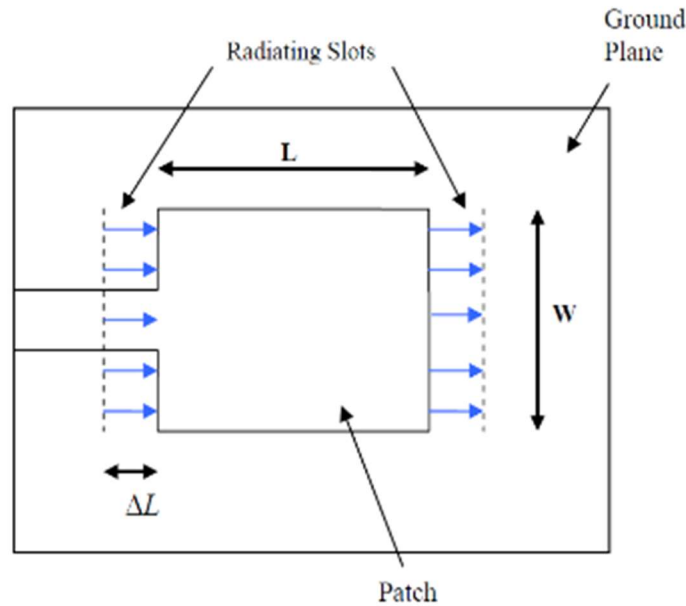
ενώ το μήκος της υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$L = \frac{1}{2f_0\sqrt{\epsilon_{r,eff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

όπου ΔL το πλεονάζον ενεργό μήκος της ταινίας που οφείλεται στο φαινόμενο των κροσσών και είναι ίσο με

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{r,eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{r,eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (3.5)$$

και απεικονίζεται, μαζί με το φυσικό μήκος της κεραίας στο Σχήμα 3.5.



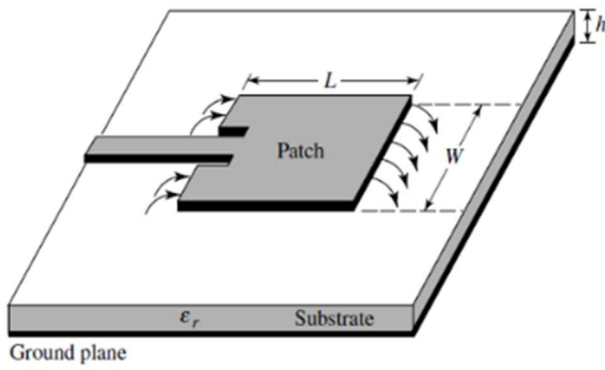
Σχήμα 3.5: Το φυσικό και ενεργό μήκος της ορθογώνιας κεραίας μικροταινίας [16].

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου της λωρίδας εξαρτάται από τις διαστάσεις της και τη διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο

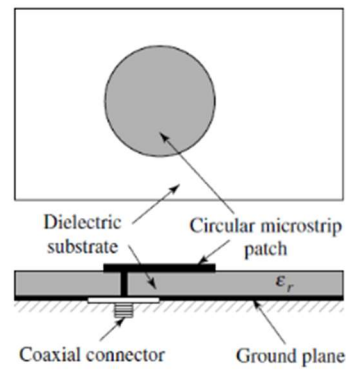
$$Z_L = \frac{90\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)^2 \quad (3.6)$$

3.3 Τροφοδοσία με ένθετη γραμμή μεταφοράς

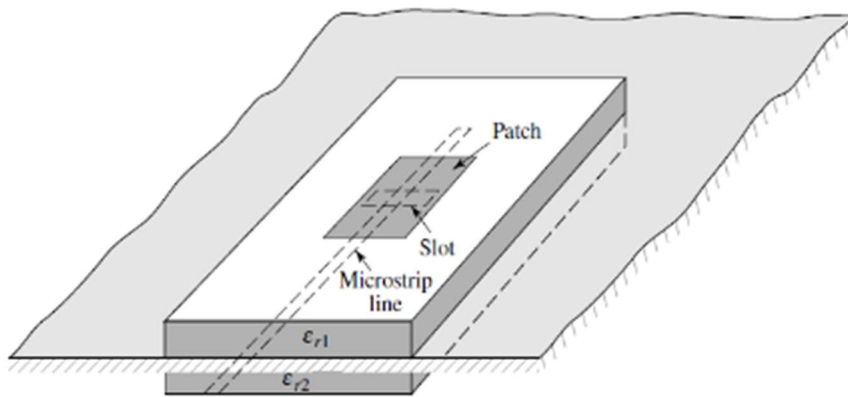
Αν και οι μέθοδοι που μπορεί να τροφοδοτηθεί μία κεραία μικροταινίας είναι αρκετοί, αυτοί που επιλέγονται συνήθως είναι η τροφοδοσία με γραμμή μικροταινίας (Σχήμα 3.6.α), με ομοαξονικό πρόβολο (coaxial probe) (Σχήμα 3.6.β), η σύζευξη μέσω ανοίγματος (Σχήμα 3.6.γ) και η άμεση σύζευξη (Σχήμα 3.6.δ). Η πιο συνηθισμένη μέθοδος από τις τέσσερεις είναι η τροφοδοσία με μικροταινιακή γραμμή, η οποία αποκαλείται συχνά και ως άμεση τροφοδοσία. Η σημαντικότητά της έγκειται στην ευκολία εκτύπωσης και κατασκευής [17].



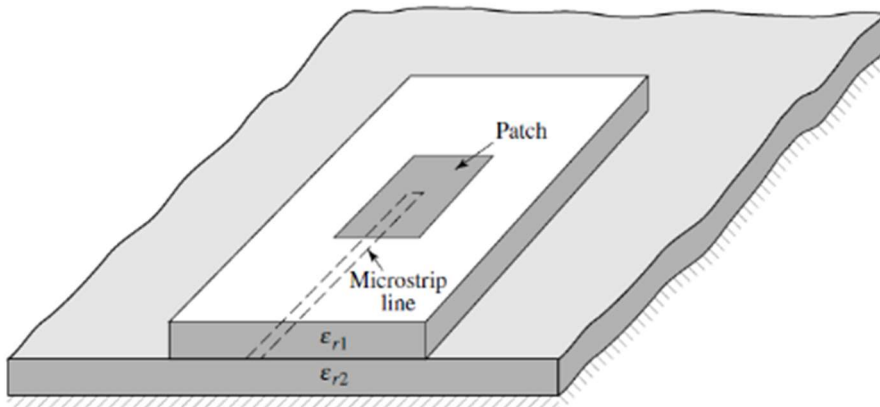
(α) Μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας



(β) Τροφοδοσία με ομοαξονικό πρόβολο



(γ) Τροφοδοσία με σύζευξη μέσω ανοίγματος



(δ) Τροφοδοσία με άμεση σύζευξη

Σχήμα 3.6: Τυπικοί τρόποι τροφοδοσίας κεραίας μικροταινίας [1].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μικροταινία είναι μία μη ομοιογενής γραμμή μεταφοράς, καθώς οι γραμμές του πεδίου δεν περιορίζονται στο εσωτερικό του διηλεκτρικού. Σε μία μικροταινία το κυριότερο μέρος των δυναμικών γραμμών βρίσκεται στο διηλεκτρικό και στην περιοχή της αγωγίμης λωρίδας, ενώ ένα μέρος τους εκτείνεται στον αέρα, έξω από τη διηλεκτρική πλάκα. Έστω πως το διηλεκτρικό απουσίαζε και το διηλεκτρικό ανάμεσα στους δύο αγωγούς της γραμμής ήταν ο αέρας.

Στην περίπτωση αυτήν ο βασικός ρυθμός θα ήταν TEM με σταθερά διάδοσης $\beta = k_0$. Ωστόσο, η ύπαρξη των δύο υλικών (διηλεκτρικό και αέρας) δεν επιτρέπει την υποστήριξη ρυθμού TEM και ακόμα δημιουργεί σύγχυση ως προς το ποιο από τα δύο θα καθορίσει τη σταθερά διάδοσης. Στην πραγματικότητα, στην πλειονότητα των εφαρμογών με μικροταινίες το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος, με αποτέλεσμα το κύμα να χαρακτηρίζεται ως σχεδόν TEM [3]. Σε περίπτωση όμως που το παραπάνω δεν ισχύει, χρειάζεται να γίνει πολύ περιπλοκότερη ανάλυση για να μελετηθούν τα πεδία του επικρατέστερου ρυθμού.

Για να υπολογιστεί το πλάτος της μικροταινίας με δεδομένη χαρακτηριστική αντίσταση, χρειάζεται να υπολογιστούν συγκεκριμένες σχέσεις σχεδίασης (design formulas). Στην περίπτωση αυτή θεωρείται πως η μικροταινία είναι στο ίδιο επίπεδο με το διηλεκτρικό υπόστρωμα. Το πλάτος της μικροταινίας υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$\frac{W_f}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & A > 1.52 \\ \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\}, & A \leq 1.52 \end{cases} \quad (3.7)$$

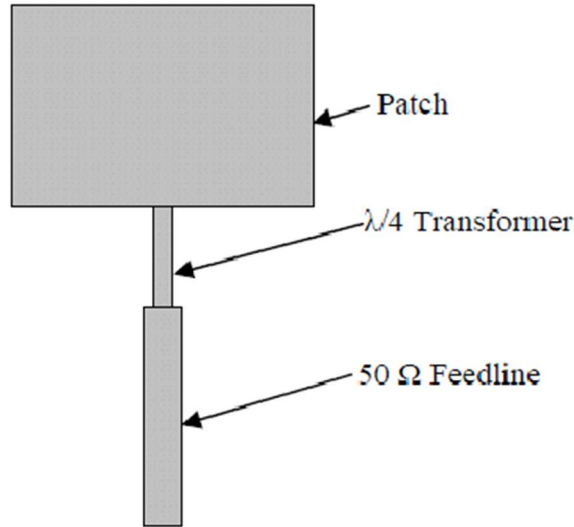
όπου

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right), B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.8)$$

Κατά αντιστοιχία, το πλάτος της μικροταινίας με δεδομένη χαρακτηριστική αντίσταση υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

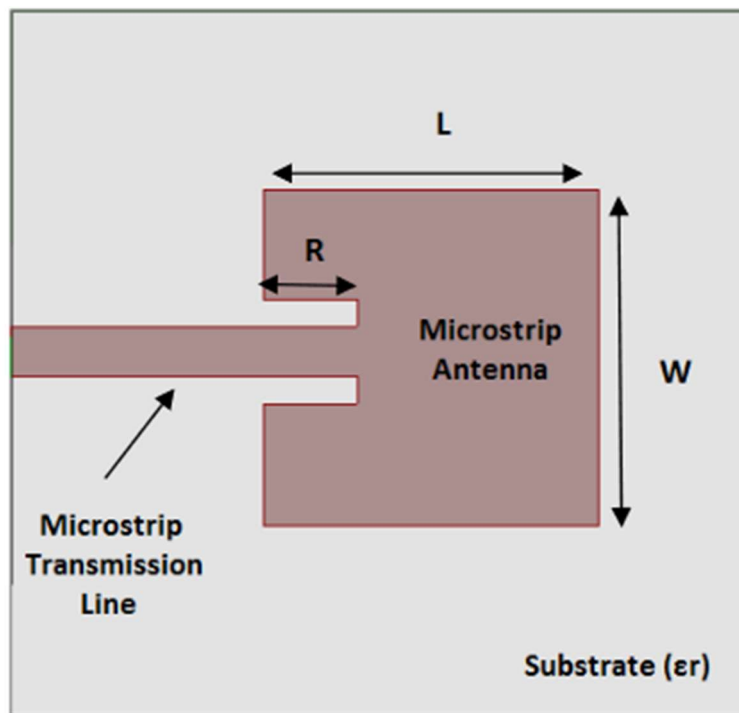
$$L_f = \frac{g \cdot c}{\omega \sqrt{\epsilon_{r,eff}}} = \frac{g \cdot c}{2\pi f \sqrt{\epsilon_{r,eff}}} = \frac{g \cdot \lambda_0}{2\pi \sqrt{\epsilon_{r,eff}}} \quad (3.9)$$

Η μικροταινιακή γραμμή, με την οποία επιλέχθηκε να τροφοδοτηθούν οι κεραίες στην εργασία αυτήν, είναι ομοεπίπεδη με τη λωρίδα και το ένα άκρο της έρχεται σε επαφή με τη λωρίδα σε κάποια από τις πλευρές της, συνήθως το πλάτος W , και το άλλο άκρο συνδέεται σε μία πηγή τροφοδοσίας. Κατά τη διαδικασία αυτή όμως, χρειάζεται να αντιμετωπισθεί ένα σημαντικό πρόβλημα. Η σύνδεση της γραμμής με κάποια πλευρά της λωρίδας της κεραίας ενδέχεται να προκαλέσει ασυνέχεια στη σύνθετη αντίσταση των 50 Ω της γραμμής με την τιμή αυτής στο άκρο της λωρίδας. Συνέπεια αυτής της ασυνέχειας είναι χειροτέρευση του συντελεστή ανάκλασης και τελικά η έλλειψη προσαρμογής. Για τη λύση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές. Κατά την πρώτη, η βελτίωση στην προσαρμογή οφείλεται στην χρήση μίας προσαρμοστικής διάταξης, τον μετασχηματιστή $\lambda/4$, ο οποίος παρεμβάλλεται ανάμεσα στη γραμμής τροφοδοσίας και της λωρίδας. Στο σχήμα 3.7. απεικονίζεται η εν λόγω διάταξη.



Σχήμα 3.7: Τροφοδοσία κεραίας μικροταινίας με μικροταινιακή γραμμή και μετασχηματιστή $\lambda/4$ [10].

Η δεύτερη τροποποίηση που χρησιμοποιείται συχνά, και αυτή που προτιμήθηκε για την ανάλυση και την κατασκευή των κεραιών, είναι η ένθεση της γραμμής τροφοδοσίας εντός της λωρίδας, μεταφέροντας έτσι το σημείο τροφοδοσίας εντός του επιθέματος. Η γραμμή τροφοδοσίας πρακτικά εντίθεται στη λωρίδα με την εισαγωγή δύο σχισμών δεξιά και αριστερά του σημείου επαφής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Τροφοδοσία κεραίας μικροταινίας με ένθετη μικροταινιακή γραμμή [18].

Το μήκος της ένθεσης της γραμμής υπολογίζεται από την προσεγγιστική εξίσωση

$$L_{\text{ένθεσης}} = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{Z_0}{\sqrt{Z_0 Z_L}}} \right) \quad (3.10)$$

όπου $Z_0 = 50 \Omega$ και Z_L η σύνθετη αντίσταση εισόδου της λωρίδας. Το πλάτος των σχισμών υπολογίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις εμπειρικά. Μία προσέγγιση για το πλάτος της σχισμής που χρησιμοποιείται συχνά είναι

$$W_{\text{ένθεσης}} = \frac{0.2W - W_f}{2} \quad (3.11)$$

για κάθε μία από τις σχισμές και το W_f είναι το πλάτος της γραμμής τροφοδοσίας που υπολογίζεται από την σχέση (X.X).

Η μέθοδος της άμεσης τροφοδοσίας με τις παραπάνω τροποποιήσεις αποτελούν ισχυρά εργαλεία για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων των θεωρητικών εκτιμήσεων και του σχεδιασμού της κεραίας, αλλά κυρίως όταν το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ λεπτό. Η αύξηση του πάχους του υποστρώματος είναι ανάλογη με το πλάτος της γραμμής τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα τα πιο χοντρά υποστρώματα να σημαίνουν και πιο πλατιές γραμμές τροφοδοσίας. Αυτό όμως συνεπάγεται στην αύξηση της ακτινοβολίας από την γραμμή τροφοδοσίας η οποία είναι ανεπιθύμητη, σε σύγκριση με την ακτινοβολία της λωρίδας και, τελικά, στη μείωση του εύρους ζώνης.

3.4 Ακτινοβολία και κατευθυντικότητα κεραιών μικροταινίας

Η ακτινοβολία στις κεραίες μικροταινίας προέρχεται από το φαινόμενο των κροσσών στα ανοιχτά άκρα της, που είναι ισοδύναμο με μία διάταξη δύο κεραιών εγκοπής σε απόσταση L [5]. Το ηλεκτρικό πεδίο στο μακρινό πεδίο εκφράζεται με την εξίσωση

$$E = E_0 \operatorname{sinc}\left(\frac{\beta W}{2} \sin \theta \sin \phi\right) \cos\left(\frac{\beta L}{2} \sin \theta \cos \phi\right) (\hat{\theta} \cos \phi - \hat{\phi} \cos \theta \sin \phi) \quad (3.12)$$

όπου β είναι η σταθερά διάδοσης.

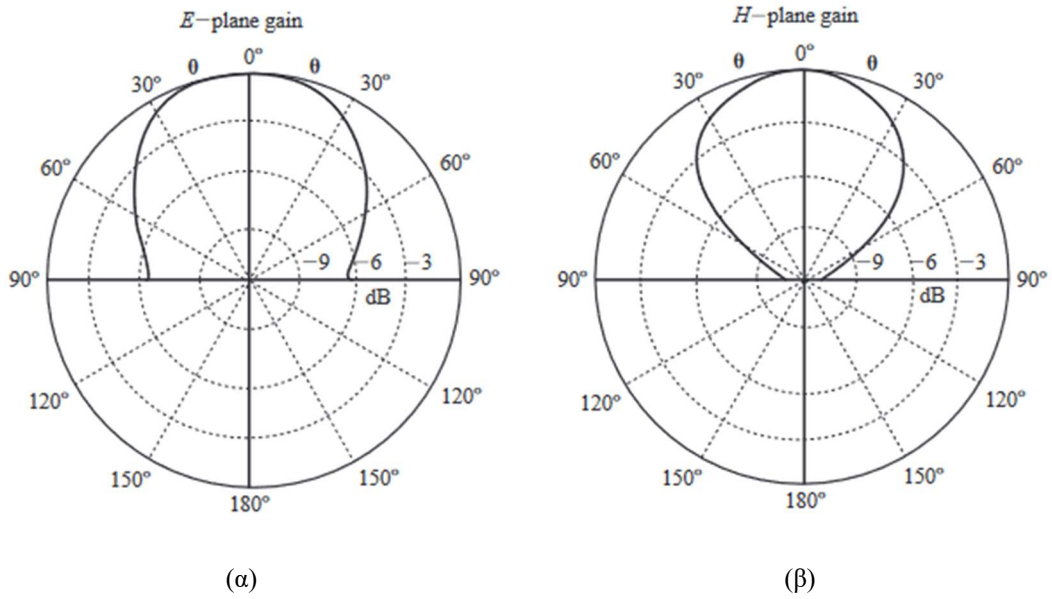
Τα διαγράμματα ακτινοβολίας στον χώρο περιγράφονται από τις εξισώσεις

$$E = \hat{\theta} E_0 \cos\left(\frac{\beta L}{2} \sin \theta\right) \quad (3.13)$$

για το πεδίο E ($\phi = 0$) και

$$E = -\hat{\phi} E_0 \operatorname{sinc}\left(\frac{\beta W}{2} \sin \theta\right) \cos \theta \quad (3.14)$$

για το πεδίο H ($\phi = \pi/2$). Τα σχετικά τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας φαίνονται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας στο E-επίπεδο (α) και στο H-επίπεδο (β) [5].

Γνωρίζοντας το πεδίο ακτινοβολίας, μπορεί να υπολογισθεί και η κατευθυντικότητα μίας κεραίας μικροταινίας, χρησιμοποιώντας τις προσεγγιστικές εξισώσεις

$$D = \begin{cases} 6.6, & W \ll \lambda \\ \frac{8w}{\lambda}, & W \gg \lambda \end{cases} \quad (3.15)$$

Είναι εμφανές πως για να επιτευχθεί μεγαλύτερη κατευθυντικότητα χρειάζεται να αυξηθεί το πλάτος της ορθογωνικής λωρίδας, αρκεί να κρατηθεί το ύψος της μικροταινίας μικρό.

Κεφάλαιο 4ο: Ανάλυση και βελτιστοποίηση των κεραιών

4.1 Θεωρητική ανάλυση τυπωμένης κεραιάς με ένθετη μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας

Το υλικό του διηλεκτρικού υποστρώματος που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και τον σχεδιασμό των κεραιών είναι το FR-4 (Flame Retardant-4). Το υλικό FR-4 είναι ένα σύνθετο υλικό, που συντίθεται από μία στρώση υαλοβάμβακα με εποξική ρητίνη. Τα ελάσματα FR-4 συνήθως χρησιμοποιούν βρώμιο, ένα μη αντιδραστικό αλογόνο, ώστε να είναι ανθεκτικά στη φλόγα. Το υλικό αυτό είναι ικανό να διατηρήσει τις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητές του τόσο σε ξηρό, όσο και σε υγρό περιβάλλον και συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σε κατασκευές PCB για την απομόνωση γειτονικών χάλκινων επιπέδων. Για την κατασκευή των κεραιών μικροταινιας συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε πλακέτα FR-4 διπλής όψης της εταιρίας Bungard [19]. Η πλακέτα αυτή προτιμήθηκε για το χαμηλό της βάρος, την συμπαγή κατασκευή της και την φωτοευαισθησία της. Τα χαρακτηριστικά αυτής της πλακέτας αναγράφονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά της πλακέτας διπλής όψης FR-4 της Bungard

Παράμετρος	Τιμή
Διηλεκτρική σταθερά υποστρώματος (ϵ_r)	33
Πάχος χαλκού (τ)	35 μm
Πάχος διηλεκτρικού (h)	1.55 mm
Απώλειες διηλεκτρικού ($\tan\delta$)	0.015

Η ανάλυση και οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με το πακέτο λογισμικού Advanced Design System (ADS) της Keysight Technologies (Έκδοση 2019). Για τη σχεδίαση της κεραιάς ελήφθησαν υπόψη τόσο η συμπεριφορά της ως στοιχείο κυκλώματος, όσο και τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της. Στην ενότητα αυτή καταγράφονται τρεις μεθοδολογίες σχεδιασμού που ακολουθήθηκαν στο λογισμικό ADS. Καταγράφεται, επίσης, η διαδικασία της βελτιστοποίησης των κεραιών. Στόχος της εργασίας ήταν η ανάλυση και ο σχεδιασμός τυπωμένων κεραιών με ένθετη μικροταινιακή γραμμή στη συχνότητα λειτουργίας 2.4 GHz. Ωστόσο, χάριν επαναληψιμότητας και περεταίρω εξοικείωσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σχεδιασμός κεραιών ίδιου τύπου, αλλά στην συχνότητα λειτουργίας 1.8 GHz.

4.1.1 Θεωρητική ανάλυση κεραιάς σε συχνότητα λειτουργίας 2.4 GHz

Το μήκος κύματος της κεραιάς στον αέρα της συχνότητας λειτουργίας $f_0 = 2.4 \text{ GHz}$ είναι

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (4.1)$$

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9} = 0.125 \text{ m}$$

Το πλάτος της λωρίδας υπολογίζεται σύμφωνα με την (3.3) και είναι ίσο με

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.5 + 1}} = 0.037688 \text{ m} = 37.688 \text{ mm}$$

Η ενεργός διηλεκτρική σταθερά από την εξίσωση (3.1) υπολογίζεται

$$\varepsilon_{r,eff} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{0.015}{0.037688} \right]^{-1/2} = 4.181$$

και, σύμφωνα με αυτό, καθορίζεται και νέο μήκος κύματος

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} \quad (4.2)$$

$$\lambda = \frac{0,125}{\sqrt{4.181}} = 0.61132m = 61.132mm$$

Το πλεονάζον ενεργό μήκος της λωρίδας που οφείλεται στο φαινόμενο των κροσσών υπολογίζεται σύμφωνα με την (3.5)

$$\Delta L = 0.412 \times 0.015 \frac{(4.181 + 0.3) \left(\frac{0.037688}{0.015} + 0.264 \right)}{(4.181 - 0.258) \left(\frac{0.037688}{0.015} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.000713 m = 0.0713 mm$$

Έχοντας όλα τα παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί το μήκος της λωρίδας από την (3.4)

$$L = \frac{1}{2 \times 2.4 \times 10^9 \sqrt{4.181} \sqrt{4\pi \times 10^{-7} \times 8.85 \times 10^{-12}}} - 2 \times 0.000713$$

$$L = 0.02914 m = 29.14 mm$$

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου της λωρίδας υπολογίζεται από την (3.6)

$$Z_L = \frac{90 \times 4.5^2}{4.5 - 1} \left(\frac{0.02914}{0.037688} \right)^2 = 311.29 \Omega$$

Το πλάτος της γραμμής τροφοδοσίας με χαρακτηριστική αντίσταση $Z_0 = 50 \Omega$ υπολογίζεται από την (3.7), οπότε υπολογίζεται πρώτα η παράμετρος A από την (3.8)

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right)} = 1.5438 > 1.52$$

οπότε το πλάτος της γραμμής τροφοδοσίας είναι ίσο με

$$W_f = 0.015 \frac{8e^{1.5438}}{e^{2 \times 1.5438} - 2} = 0.002916 m = 2.916 mm$$

Το μήκος της γραμμής τροφοδοσίας με χαρακτηριστική αντίσταση $Z_0 = 50 \Omega$ εξαρτάται από το ηλεκτρικό μήκος g , μέγεθος αδιάφορο για την ανάλυση αυτής της κεραίας. Για το λόγο αυτόν, το μήκος της γραμμής επιλέχθηκε να είναι είτε ίσο με το μήκος της ένθεσης της γραμμής, είτε να υπολογιστεί από την (3.9), υποθέτοντας ηλεκτρικό μήκος $g = \pi/2$, δηλαδή

$$L_f = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \lambda_0}{2\pi \sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} = \lambda/4 = 0.61135/4 = 0.015283 m = 15.283 mm$$

Το μήκος της ένθεσης της γραμμής τροφοδοσίας υπολογίζεται από την (3.10)

$$L_{ένθεσης} = \frac{0.02914}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{\sqrt{50 \times 311.29}}} \right)$$

$$L_{\acute{\epsilon}\nu\theta\epsilon\sigma\eta\varsigma} = 0.00821 \text{ m} = 8.21 \text{ mm}$$

και το πλάτος της σχισμής υπολογίζεται από την (3.11)

$$W_{\acute{\epsilon}\nu\theta\epsilon\sigma\eta\varsigma} = \frac{0.2 \times 0.037688 - 0.002916}{2}$$

$$W_{\acute{\epsilon}\nu\theta\epsilon\sigma\eta\varsigma} = 0.0023108 \text{ m} = 2.3108 \text{ mm}$$

4.1.2 Θεωρητική ανάλυση κεραιάς σε συχνότητα λειτουργίας 1.8 GHz

Το μήκος κύματος της κεραιάς στον αέρα της συχνότητας λειτουργίας $f_0 = 1.8 \text{ GHz}$ είναι από την (4.1)

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9} = 0.1667 \text{ m}$$

Το πλάτος της λωρίδας υπολογίζεται

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.8 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.5 + 1}} = 0.050217 \text{ m} = 50.217 \text{ mm}$$

Η ενεργός διηλεκτρική σταθερά υπολογίζεται

$$\epsilon_{r,eff} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{0.0015}{0.050217} \right]^{-1/2} = 4.2449$$

και, σύμφωνα με αυτό, καθορίζεται και νέο μήκος κύματος από την (4.2)

$$\lambda = \frac{0.1667}{\sqrt{4.2449}} = 0.08083 \text{ m} = 80.83 \text{ mm}$$

Το πλεονάζον ενεργό μήκος της λωρίδας που οφείλεται στο φαινόμενο των κροσσών υπολογίζεται

$$\Delta L = 0.412 \times 0.0015 \frac{(4.2449 + 0.3) \left(\frac{0.050217}{0.0015} + 0.264 \right)}{(4.2449 - 0.258) \left(\frac{0.050217}{0.0015} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.00071622 \text{ m} = 0.71622 \text{ mm}$$

Έχοντας όλα τα παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί το μήκος της λωρίδας

$$L = \frac{1}{2 \times 2.4 \times 10^9 \sqrt{4.181} \sqrt{4\pi \times 10^{-7} \times 8.85 \times 10^{-12}}} - 2 \times 0.00071622$$

$$L = 0.03898 \text{ m} = 38.98 \text{ mm}$$

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου της λωρίδας υπολογίζεται

$$Z_L = \frac{90 \times 4.5^2}{4.5 - 1} \left(\frac{0.03898}{0.050217} \right)^2 = 313.85 \Omega$$

Η παράμετρος A

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.5 + 1}{2}} + \frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right) = 1.5438 > 1.52$$

οπότε το πλάτος της γραμμής τροφοδοσίας είναι ίσο με

$$W_f = 0.015 \frac{8e^{1.5438}}{e^{2 \times 1.5438} - 2} = 0.002916 \text{ m} = 2.916 \text{ mm}$$

Όπως και προηγουμένως, το μήκος της γραμμής επιλέχθηκε να είναι είτε ίσο με το μήκος της ένθεσης της γραμμής, είτε να υπολογιστεί από την (3.9), υποθέτοντας ηλεκτρικό μήκος $g = \pi/2$, δηλαδή

$$L_f = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \lambda_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_{r,eff}}} = \lambda/4 = 0.8083/4 = 0.0202 \text{ m} = 20.2 \text{ mm}$$

Το μήκος της ένθεσης της γραμμής τροφοδοσίας υπολογίζεται

$$L_{ένθεσης} = \frac{0.03898}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{\sqrt{50 \times 313.85}}} \right)$$

$$L_{ένθεσης} = 0.011 \text{ m} = 11 \text{ mm}$$

και το πλάτος της σχισμής υπολογίζεται

$$W_{ένθεσης} = \frac{0.2 \times 0.050217 - 0.002916}{2}$$

$$W_{ένθεσης} = 0.00356 \text{ m} = 3.56 \text{ mm}$$

4.2 Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #1

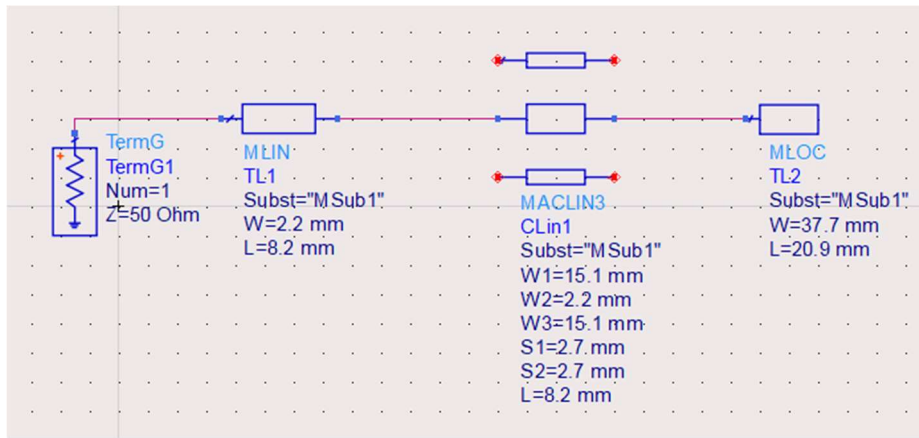
Ο αρχικός σχεδιασμός ξεκίνησε με τη δημιουργία ενός σχηματικού, με την επιλογή “New schematic window”, από τη γραμμή εργαλείων του λογισμικού. Η γεωμετρία της κεραίας απαιτεί τη χρήση τριών στοιχείων για την ανάλυσή της, τα οποία εντοπίζονται στη βιβλιοθήκη “TLines-Microstrip”. Το στοιχείο “MLIN” αντιπροσωπεύει τη γραμμή πίσω από το ορθογώνιο patch και το τμήμα της κεραίας με τις εγκοπές. Το στοιχείο “MACLIN3” εκφράζει το τμήμα της κεραίας ανάμεσα στη γραμμή και το ορθογώνιο patch. Τέλος, το ορθογώνιο patch εκπροσωπείται από το στοιχείο “MLOC”. Για να ολοκληρωθεί το σχηματικό του κυκλώματος, απαιτείται μία τερματική θύρα (Port Impedance Termination for S-Parameters with Ground Reference) “TermG” με χαρακτηριστική αντίσταση τα 50 Ω, ίδια με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας για ανάγκες προσαρμογής. Στον Πίνακα 4.2 αναγράφονται τα μεγέθη κάθε στοιχείου συναρτήσει με τα μεγέθη που υπολογίστηκαν στην ενότητα 4.1.1.

Πίνακας 4.2: Αντιστοίχιση των τιμών των στοιχείων της κεραίας #1 στο σχηματικό με τις θεωρητικές τιμές.

Μέγεθος στο σχηματικό του ADS	Συναρτήσει των θεωρητικών τιμών
$MLIN_W$	W_f
$MLIN_L$	$L_{ένθεσης}$
$MACLIN3_{W1}$	$0.4W$
$MACLIN3_{W2}$	W_f
$MACLIN3_{W3}$	$0.4W$
$MACLIN3_{S1}$	$W_{ένθεσης}$
$MACLIN3_{S2}$	$W_{ένθεσης}$
$MACLIN3_L$	$L_{ένθεσης}$

$MLOC_W$	W
$MLOC_L$	$L - L_{\text{ένθεσης}}$

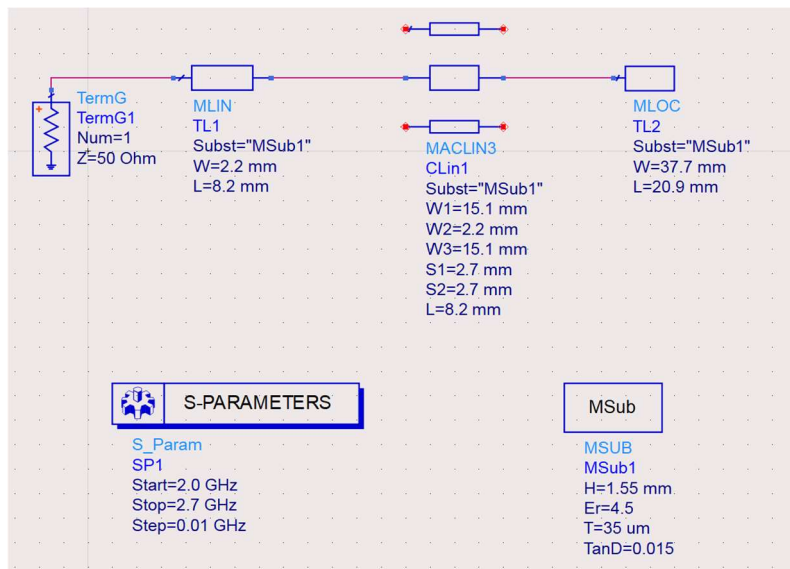
Ενώνοντας όλα τα blocks τελικά, εμφανίζεται η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Κυκλωματική διάταξη κεραίας #1 σε σχηματικό.

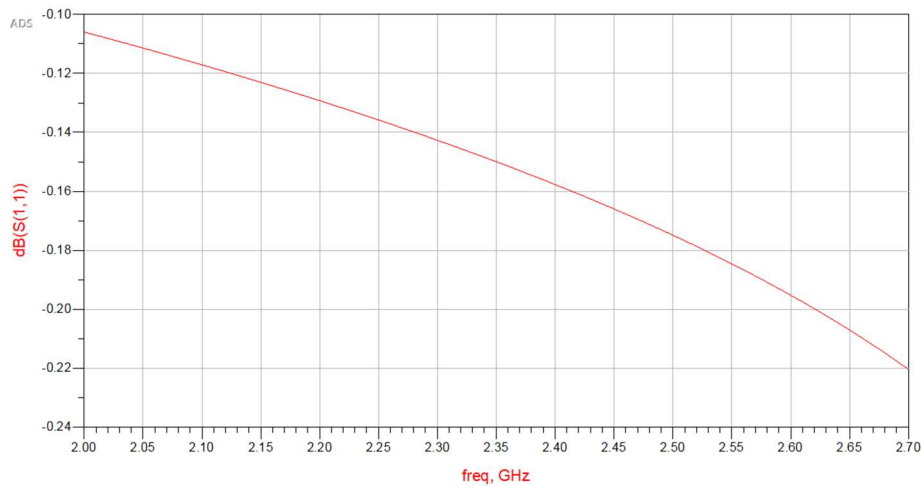
Πριν την προσομοίωση είναι αναγκαία η εισαγωγή του block “SP”, από τη βιβλιοθήκη “Basic Components”. Εκεί, επιλέγεται το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων για την απεικόνιση των παραμέτρων σκέδασης (S – Parameters). Για κεντρική συχνότητα λειτουργίας της κεραίας τα 2.4 GHz, η αρχική συχνότητα ρυθμίστηκε στα 2.1 GHz, η τελική συχνότητα στα 2.7 GHz και το βήμα δειγματοληψίας στα 0.005 GHz. Συνεπώς, το διάγραμμα θα αποτελείται από 121 δείγματα, στο εύρος συχνοτήτων 2.1 – 2.7 GHz.

Τέλος, για την αποτύπωση των χαρακτηριστικών του υποστρώματος της πλακέτας απαιτείται το block “MSUB” από τη βιβλιοθήκη “TLines-Microstrip”. Ανοίγοντας το παράθυρο του block, χρειάζεται να συμπληρωθούν οι τιμές των παραμέτρων της μικροταινίας. Επιλέγοντας την καρτέλα “Display parameter on schematic”, διαλέγονται οι παράμετροι που θα απεικονιστούν τελικά στο σχηματικό. Επιλέχθηκαν να εμφανιστούν τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της πλακέτας. Η διηλεκτρική σταθερά της (ϵ_r), το πάχος του χαλκού (T), το πάχος του διηλεκτρικού (H) και οι απώλειες του διηλεκτρικού (TanD). Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται η τελική μορφή του σχηματικού, με όλα τα απαραίτητα blocks τοποθετημένα.



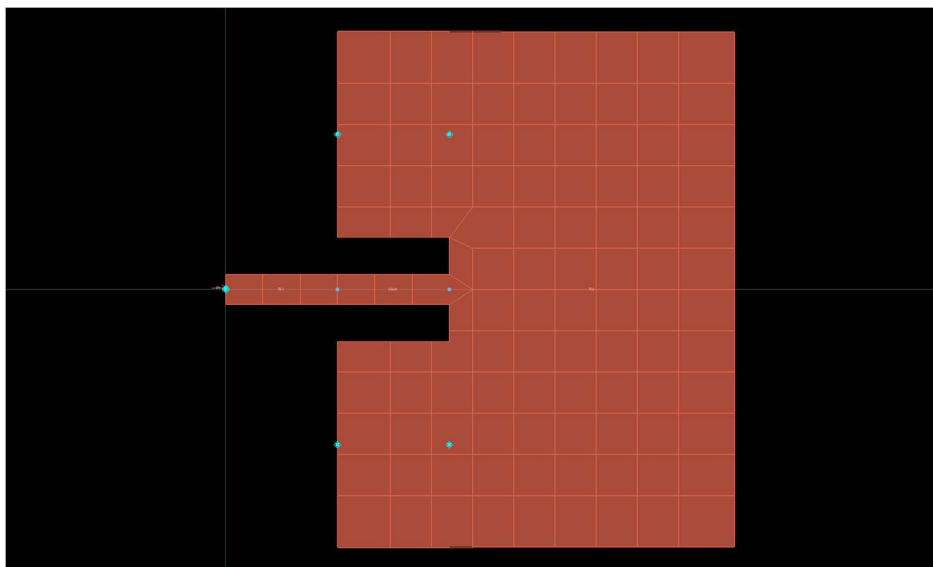
Σχήμα 4.2: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #1.

Πρακτικά, οι απώλειες επιστροφής μπορούν να μετρηθούν άμεσα στο φάσμα συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει από τον συντελεστή σκέδασης S_{11} , που μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Τον λόγο, δηλαδή, του πλάτους του ανακλώμενου σήματος προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος, στην είσοδο της κεραίας, εκφραζόμενος σε dB. Το διάγραμμα που εμφανίζεται όμως από την προσομοίωση στο σχηματικό (Σχήμα 4.3), δεν εμφανίζει κάποιο σημείο συντονισμού της κεραίας στο φάσμα συχνοτήτων 2.1 – 2.7 GHz.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής από το σχηματικό της κεραίας #1.

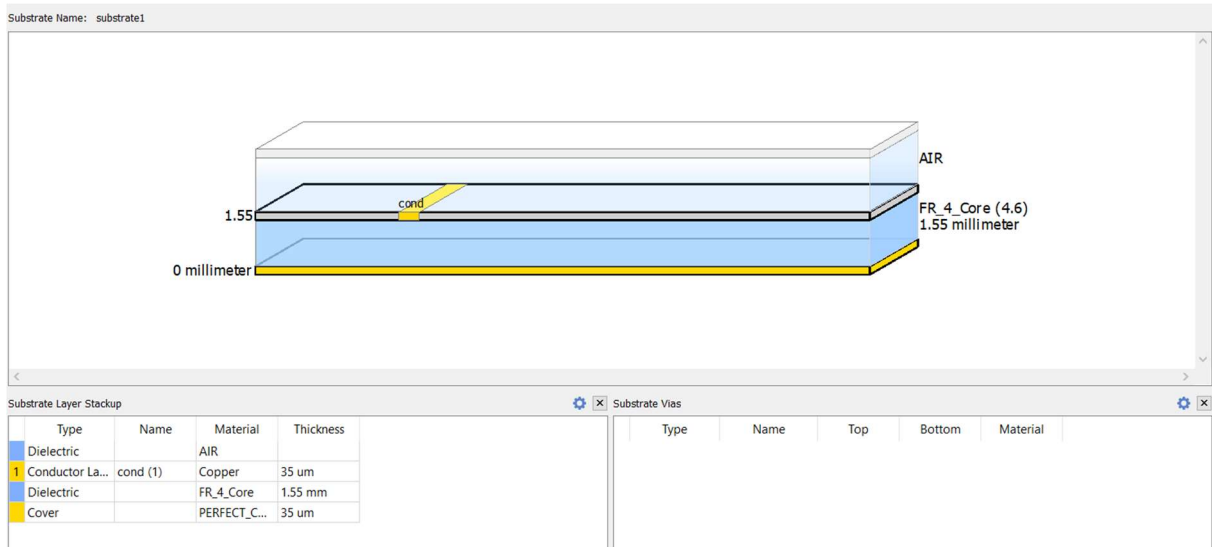
Το κύκλωμα του σχηματικού χρειάζεται να αποτυπωθεί σε περιβάλλον Layout, ώστε να γίνει γνωστή η γεωμετρία της κεραίας και να γίνουν περισσότερο ακριβείς προσομοιώσεις. Αυτό γίνεται με την επιλογή “Layout -> Generate/Update Layout”. Αφού πλέον διακρίνεται το σχήμα της κεραίας (Σχήμα 4.4), χρειάζεται να τοποθετηθεί ένας ακροδέκτης με την επιλογή “insert pin”, στο άκρο της γραμμής τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.4: Γεωμετρία της κεραίας #1 στο Layout.

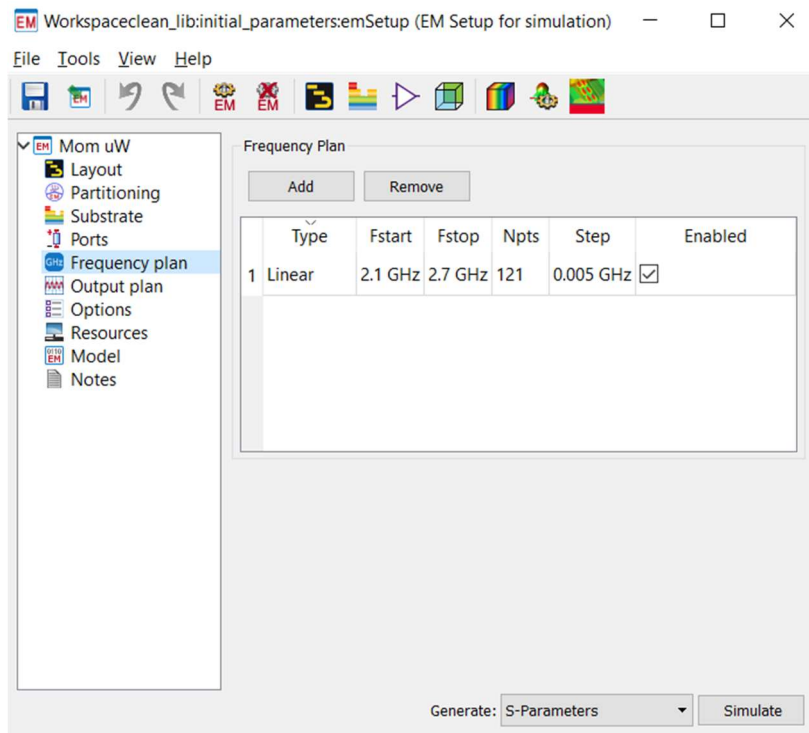
Πριν ρυθμιστούν οι παράμετροι της προσομοίωσης, απαιτείται να καθοριστούν οι παράμετροι του υποστρώματος κατασκευής. Στο παράθυρο του Layout, υπάρχει η επιλογή “Substrate editor”. Η

διάταξη που εφαρμόστηκε, σύμφωνα με τα υλικά που προτιμήθηκαν για την κατασκευή φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Η γεωμετρία του υποστρώματος.

Με την επιλογή “EM Simulation Settings” μπορούν να οριστούν οι παράμετροι της ηλεκτρομαγνητικής (EM) προσομοίωσης. Τα όρια και το βήμα δειγματοληψίας θέτονται ίσα με αυτά της προηγούμενης προσομοίωσης στο σχηματικό. Στο πεδίο “Generate” κάτω δεξιά, επιλέγεται “S-Parameters” και τελικά η εντολή “Simulate”. Όλες οι ρυθμίσεις διακρίνονται στο σχήμα Σχήμα 4.6.

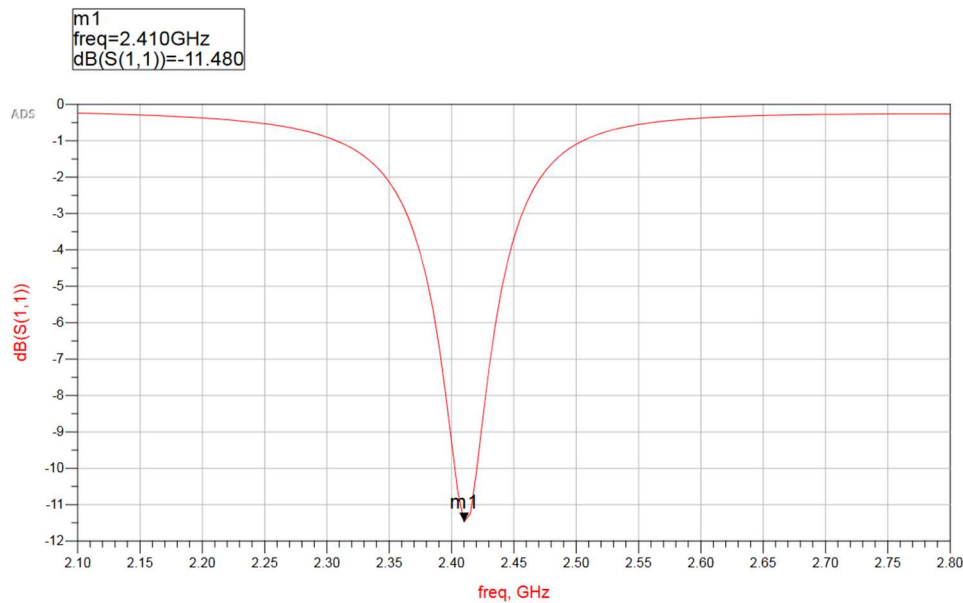


Σχήμα 4.6 Ρυθμίσεις EM προσομοίωσης στο Layout.

Η προσομοίωση στο Layout απαιτεί περισσότερο χρόνο από αυτή στο σχηματικό, ωστόσο η προσομοίωση από το Layout λαμβάνει υπόψη όλες τις αλληλεπιδράσεις κάθε κομματιού μετάλλου της κεραίας μικροταινίας και προτιμάται σε πραγματικές εφαρμογές. Στο Σχήμα 4.7 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρατηρείται πως το αποτέλεσμα είναι οριακά αποδεκτό, σύμφωνα

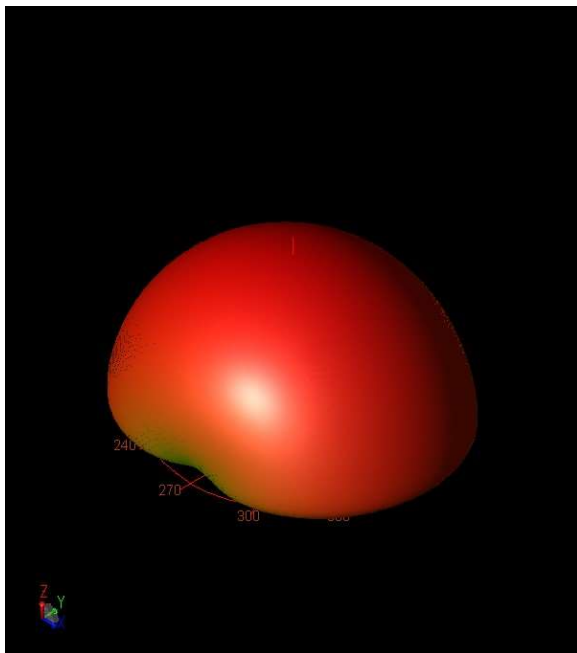
Κεφάλαιο 4

και με τις προδιαγραφές που τίθενται στη διεθνή βιβλιογραφία [8, 11]. Ωστόσο, το μοντέλο θα χρειαστεί βελτιστοποίηση προκειμένου να μειωθεί το S_{11} ακόμη περισσότερο.

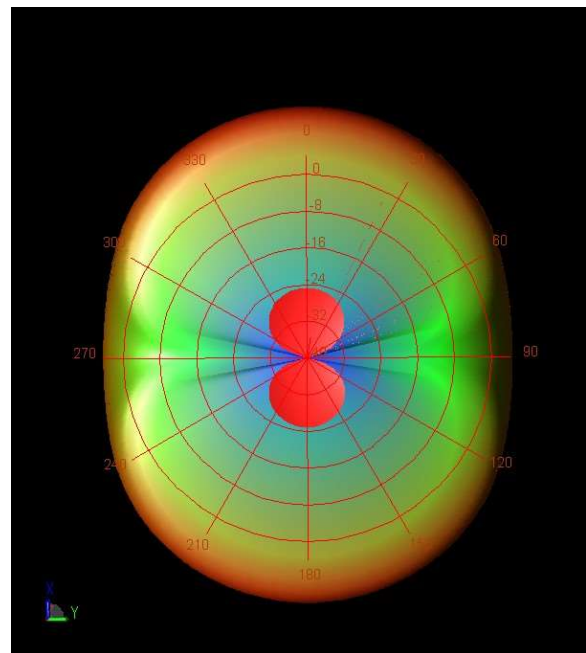


Σχήμα 4.7: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #1 από τον σχεδιασμό στο Layout.

Συνεχίζοντας, και αφού η διαδικασία για την προσομοίωση των απωλειών επιστροφής έχει ολοκληρωθεί, θα πρέπει να γίνει προσομοίωση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας της κεραίας. Στη γραμμή εργαλείων στο περιβάλλον του Layout επιλέγεται το εικονίδιο “Far Fields”. Επεκτείνοντας το παράθυρο του εργαλείου, στην επιλογή “Solution Setup”, επιλέγεται η συχνότητα συντονισμού της κεραίας. Το διάγραμμα στα δεξιά του παραθύρου απεικονίζει το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, από δύο όψεις.



(α)



(β)

Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας #1, (α) στον χώρο και (β) στο οριζόντιο επίπεδο.

Με την επιλογή “Plot Properties -> Far Fields” και κατόπιν πατώντας “Antenna Parameters”, εμφανίζεται ένα παράθυρο με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικές με τη διάδοση ισχύος της κεραιάς στο μακρινό πεδίο. Οι πιο ενδιαφέρουσες πληροφορίες στα πλαίσια της κατασκευής κεραιών είναι η κατευθυντικότητα, το κέρδος και ο λόγος απόδοσης ακτινοβολίας. Στο Σχήμα 4.9 υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά σχετικά με την ακτινοβολία της κεραιάς, στη συχνότητα συντονισμού 2.41 GHz. Η κατευθυντικότητα έχει τιμή 6.39875 dBi, το κέρδος είναι 3.42145 dBi και ο λόγος απόδοσης ακτινοβολίας 50.3814 %. Οι τιμές αυτές είναι αναμενόμενες στις κεραιές μικροταινίας και μπορούν να βελτιωθούν με τεχνικές βελτιστοποίησης [20].

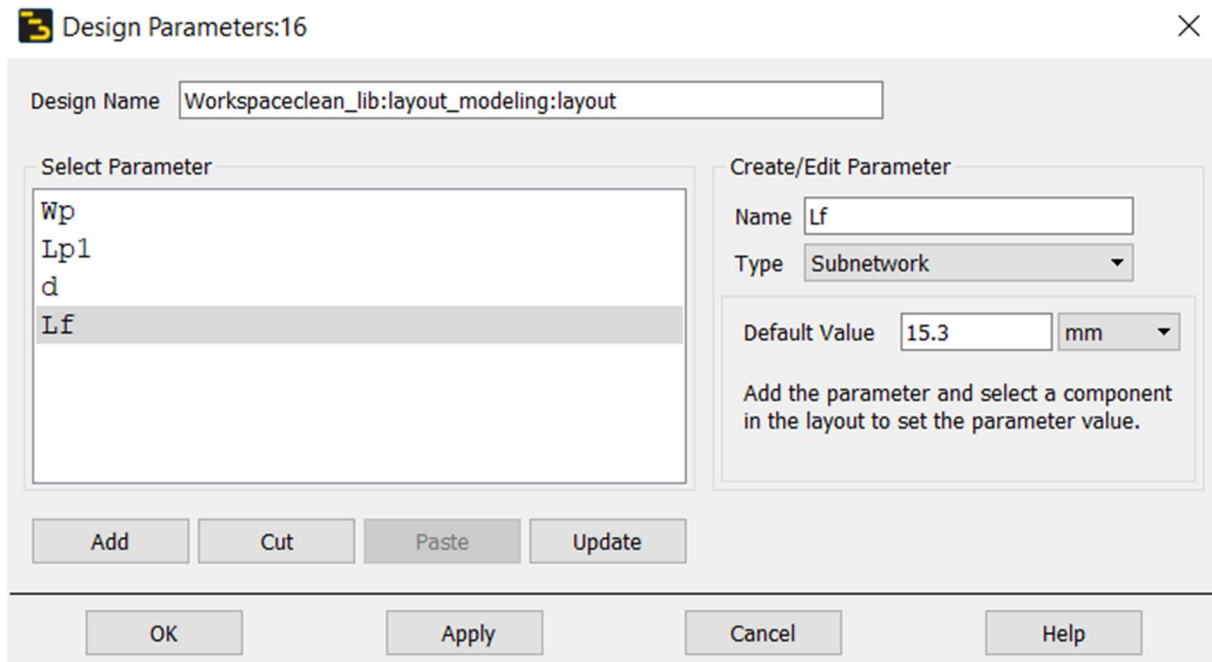
Antenna Parameters		×
Frequency (GHz)	2.41	
Input power (Watts)	0.00232499	
Radiated power (Watts)	0.00117136	
Directivity(dBi)	6.39874	
Gain (dBi)	3.42145	
Radiation efficiency (%)	50.3814	
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000406777	
Effective angle (Steradians)	2.87962	
Angle of U Max (theta, phi)	2	0
E(theta) max (mag,phase)	0.553616	-2.16711
E(phi) max (mag,phase)	2.58469e-05	-39.0037
E(x) max (mag,phase)	0.553278	-2.16711
E(y) max (mag,phase)	2.58469e-05	-39.0037
E(z) max (mag,phase)	0.0193209	177.833

OK

Σχήμα 4.9: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραιάς #1 στα 2.41 GHz

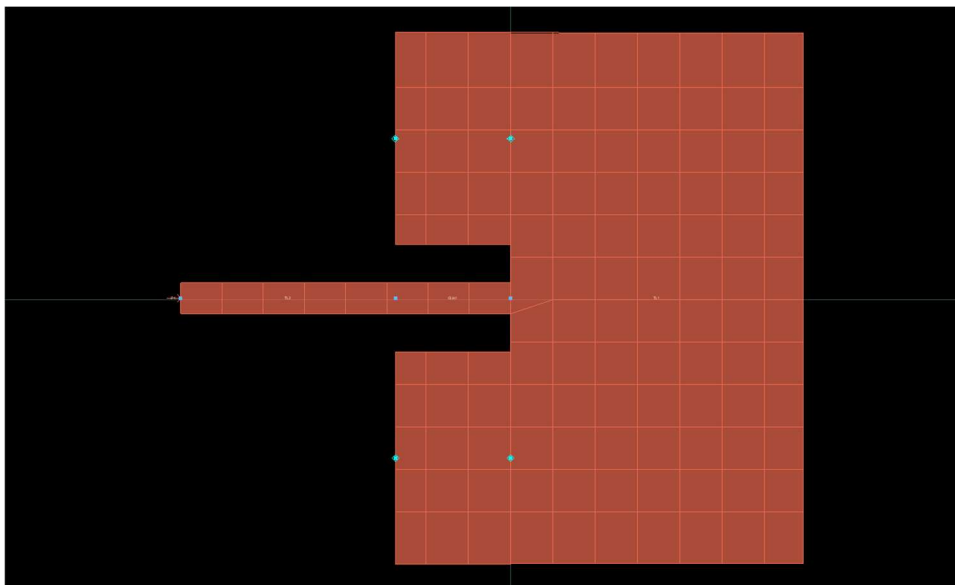
4.3 Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραιάς #2

Μία διαφορετική προσέγγιση για τη σχεδίαση της κεραιάς, είναι η παράκαμψη του σχεδιασμού της σε σχηματικό και η απευθείας σχεδίαση στο Layout, επιλέγοντας “New Layout Window” από τη γραμμή εργαλείων. Επειδή η διαμόρφωση των στοιχείων που αποτελούν την κεραιά είναι τέτοια, που κάποιες διαστάσεις εξαρτώνται από κάποιες άλλες, στη διαδικασία της βελτιστοποίησης υπάρχει σύγχυση για το ποιες διαστάσεις πρέπει τελικά να βελτιστοποιηθούν, ώστε να μην παραποιηθεί η γεωμετρία της κεραιάς. Για να προληφθεί οποιοδήποτε πρόβλημα με τις διαστάσεις που θα χρειαστεί να βελτιστοποιηθούν, μία λύση είναι να αποθηκευτούν οι διαστάσεις αυτές σε global μεταβλητές. Επιλέγοντας “EM -> Components -> Parameters”, δημιουργήθηκαν οι μεταβλητές $Wp = W = 37.7 \text{ mm}$, $Lf = L_f = 15.3 \text{ mm}$, $Lp1 = L - L_{\text{ένθωσης}} = 20.9 \text{ mm}$ και $d = L_{\text{ένθωσης}} = 8.2 \text{ mm}$. Οι μεταβλητές αυτές αντιστοιχούν στο πλάτος του patch, το μήκος της γραμμής τροφοδοσίας, το μήκος του τελευταίου στοιχείου “MLOC” και στο μήκος του ενδιάμεσου στοιχείου “MACLIN3” αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.10 υπάρχει το σχετικό παράθυρο στο περιβάλλον του ADS.



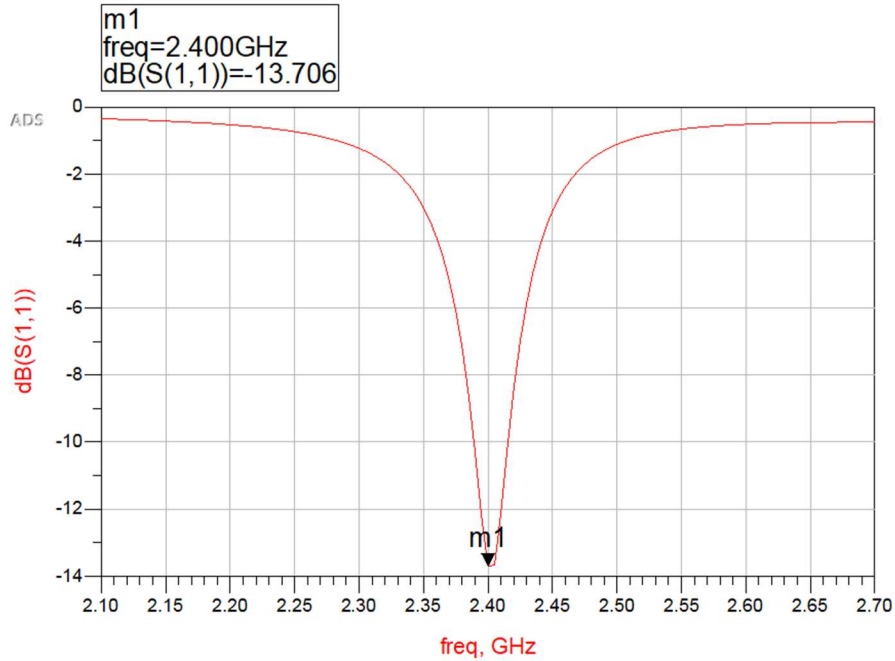
Σχήμα 4.10: Οι διαστάσεις της κεραίας #2 ως global μεταβλητές.

Διαλέγοντας τα ίδια ακριβώς στοιχεία που επιλέχθηκαν και στην προηγούμενη μεθοδολογία σχεδιασμού (MLIN, MACLIN3, MLOC), σχεδιάζεται η κεραία που φαίνεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Γεωμετρία της κεραίας #2 στο Layout.

Διαπιστώνεται πως ο συντελεστής S_{11} είναι -13.706 dB στα 2.4 GHz, στην περίπτωση αυτή (Σχήμα 4.12). Η τιμή του S_{11} είναι κάπως καλύτερη από εκείνη που προέκυψε με εφαρμογή της μεθοδολογίας #1, ενώ σημειώνεται ότι η συχνότητα συντονισμού της κεραίας δεν παρεκκλίνει καθόλου από τα 2.4GHz. Η κατασκευή αυτή μπορεί να εξαχθεί σαν στοιχείο, επιλέγοντας “EM -> Component -> Create EM Model and Symbol”. Το στοιχείο αυτό αποθηκεύεται στο cell που έχει δημιουργηθεί το Layout, για να γίνει μελλοντικά βελτιστοποίηση.



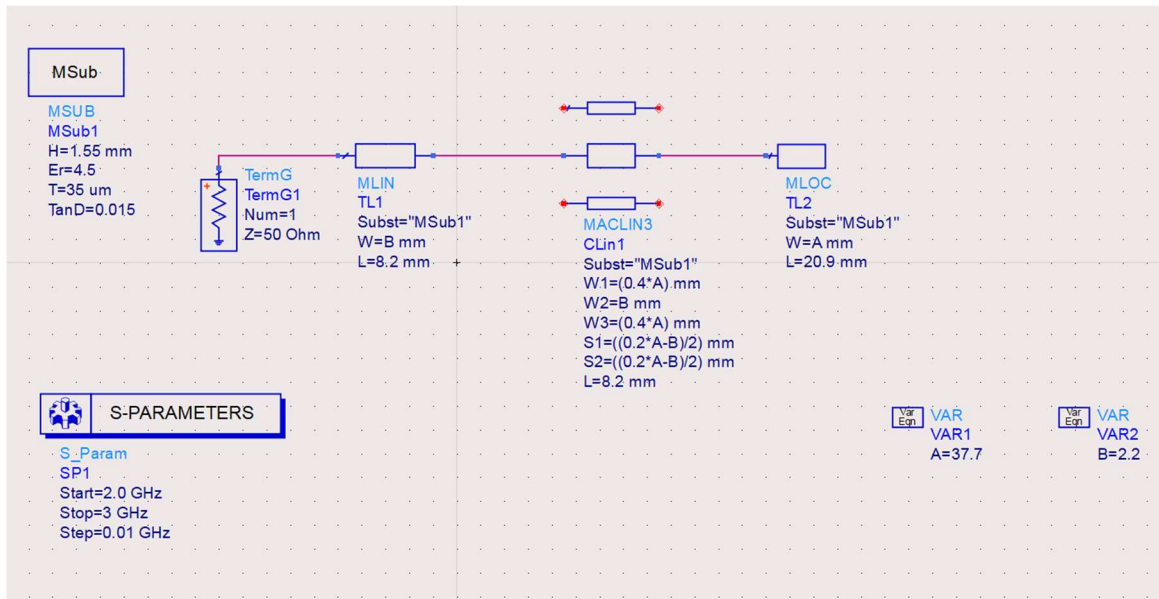
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραιάς #2 από τον σχεδιασμό στο Layout.

4.4 Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραιάς #3

Η τρίτη κεραιά που σχεδιάστηκε είναι και πάλι μέσω της δημιουργίας σχηματικού, αλλά με διαφορετική προσέγγιση ως προς την έκφραση των διαστάσεών της. Πολλές από τις διαστάσεις των στοιχείων που απαιτούνται για τον σχεδιασμό μίας κεραιάς με ένθετη γραμμή τροφοδοσίας (“MLIN”, “MACLIN3”, “MLOC”), εξαρτώνται από κάποιες άλλες. Συγκεκριμένα, όλες οι διαστάσεις εκτός από τα μήκη L όλων των στοιχείων, μπορούν να αναπαρασταθούν με αποτελέσματα μαθηματικών πράξεων μεταξύ των μεγεθών W του στοιχείου MLOC και W του στοιχείου MLIN. Με την εισαγωγή του block “VAR”, μπορούν να αντιστοιχηθούν τα δύο αυτά μεγέθη με δύο μεταβλητές A και B αντίστοιχα. Έτσι, κατά τη βελτιστοποίηση, μπορεί να αποφευχθεί οποιαδήποτε σύγκυση οφειλόμενη στη γεωμετρία της κατασκευής. Στον Πίνακα 4.3 αναγράφονται τα μεγέθη του σχηματικού συναρτήσει των A , B και στο Σχήμα 4.13 φαίνεται η τελική συνδεσμολογία.

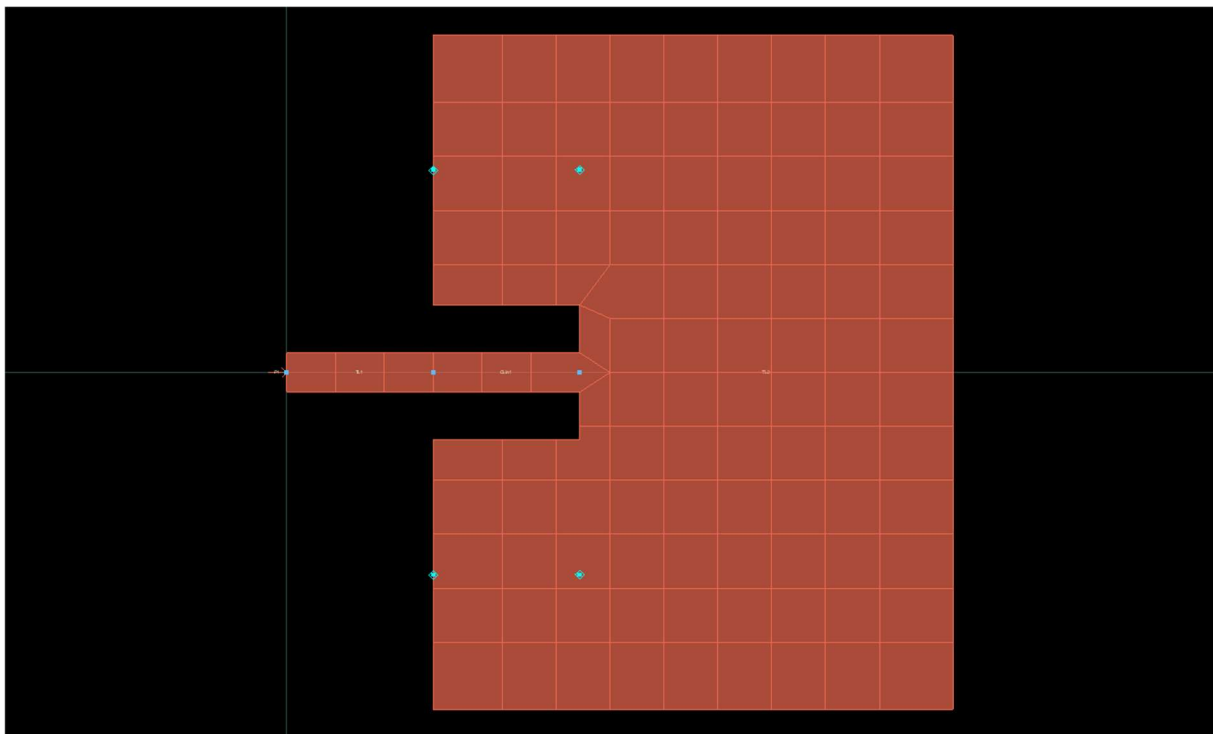
Πίνακας 4.3: Οι τιμές των στοιχείων του σχηματικού συναρτήσει των A , B .

Μέγεθος στο σχηματικό του ADS	Συναρτήσει των A και B
$MLIN_W$	B
$MLIN_L$	$L_{ένθεσης}$
$MACLIN3_{W1}$	$0.4A$
$MACLIN3_{W2}$	B
$MACLIN3_{W3}$	$0.4A$
$MACLIN3_{S1}$	$(0.2 * A - B)/2$
$MACLIN3_{S2}$	$(0.2 * A - B)/2$
$MACLIN3_L$	$L_{ένθεσης}$
$MLOC_W$	A
$MLOC_L$	$L - L_{ένθεσης}$



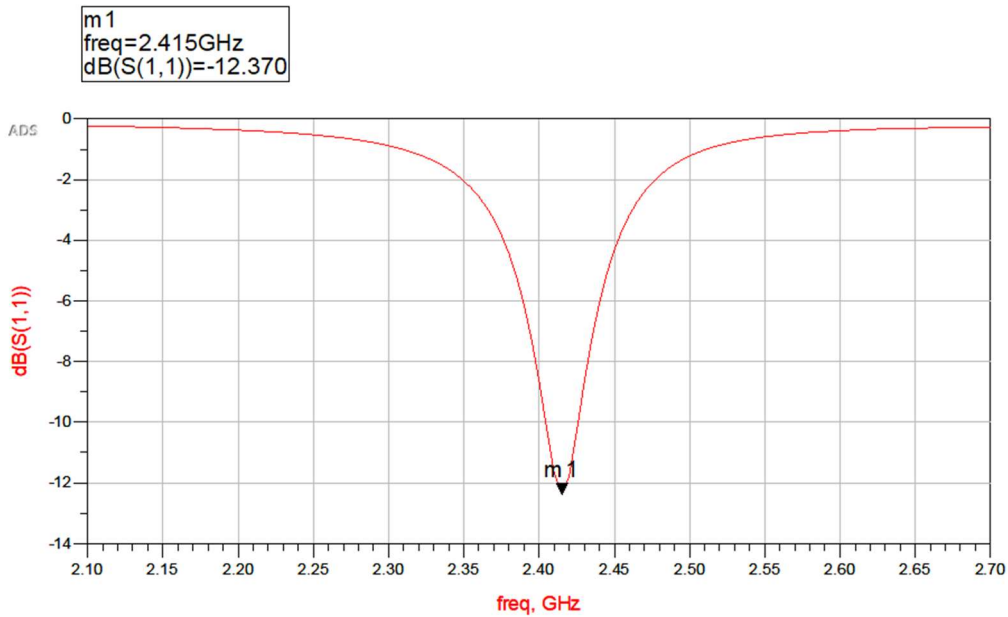
Σχήμα 4.13: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #3.

Στη συνέχεια, το Σχήμα 4.14 δείχνει τη μεταφορά της συνδεσμολογίας στο σχηματικό, στο περιβάλλον Layout.



Σχήμα 4.14: Γεωμετρία της κεραίας #3 στο Layout.

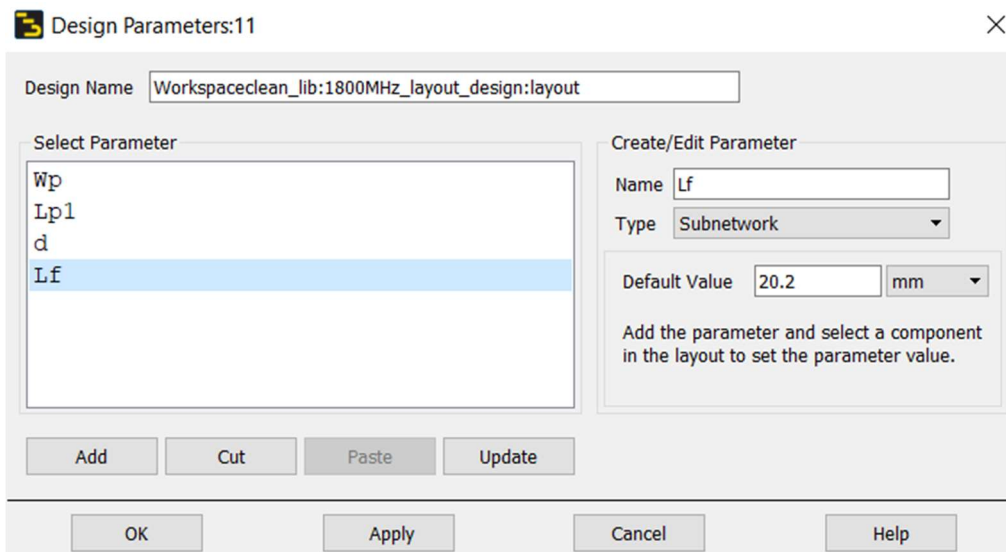
Στην ανάλυση αυτήν, οι απώλειες επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού 2.415 GHz είναι -12.37 dB, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.15.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραιάς #3 από τον σχεδιασμό στο Layout.

4.5 Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραιάς #4 (1.8 GHz)

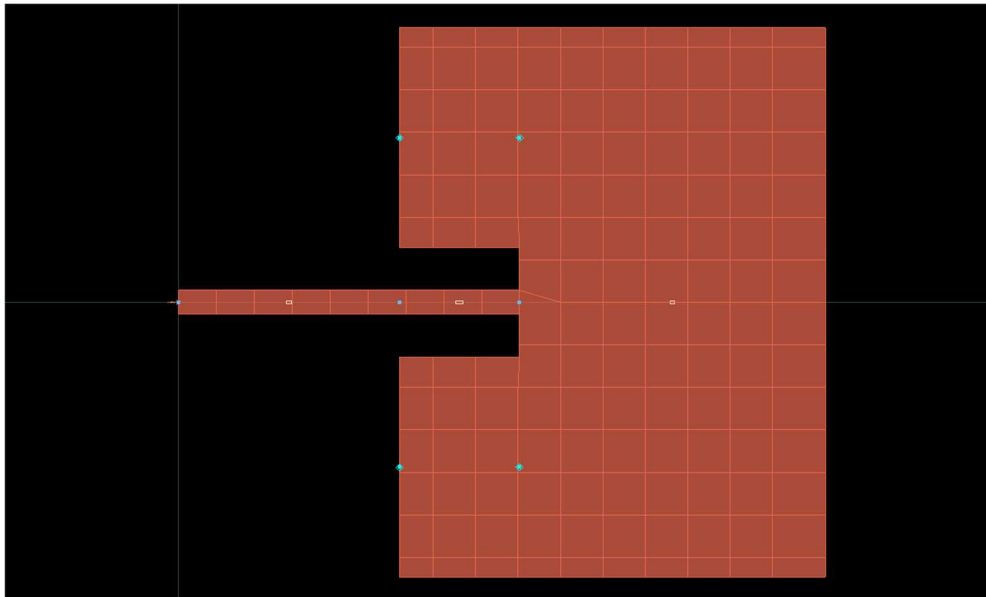
Το κείμενο της Δ.Ε. προτείνεται να ακολουθεί την παρακάτω μορφή: Επιπρόσθετα από τους σχεδιασμούς των κεραιών στα 2.4 GHz, επιλέχθηκε να σχεδιαστεί και μία κεραιά με επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας τα 1.8 GHz. Για την κατασκευή αυτής της κεραιάς επιλέχθηκε η δεύτερη από τις προαναφερόμενες τρεις μεθόδους σχεδιασμού, αυτή που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.3. Στις βελτιστοποιήσεις φάνηκε πως η κεραιά που σχεδιάστηκε με τον ίδιο τρόπο στα 2.4 GHz είχε χαμηλότερο συντελεστή ανάκλασης στο σημείο συντονισμού της, σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Η κεραιά κατασκευάστηκε σε παράθυρο Layout, παραλείποντας τον αρχικό κυκλωματικό σχεδιασμό σε σχηματικό. Η διαδικασία κατασκευής είναι αυτή που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 4.3. Κατά αντιστοιχία με το κεφάλαιο 4.3, οι global μεταβλητές που δημιουργήθηκαν είναι οι μεταβλητές $Wp = W = 50.2\text{ mm}$, $Lf = L_f = 20.2\text{ mm}$, $Lp1 = L - L_{\text{ένθεσης}} = 28\text{ mm}$ και $d = L_{\text{ένθεσης}} = 11\text{ mm}$ (Σχήμα 4.16).



Σχήμα 4.16: Οι διαστάσεις της κεραιάς #4 ως global μεταβλητές.

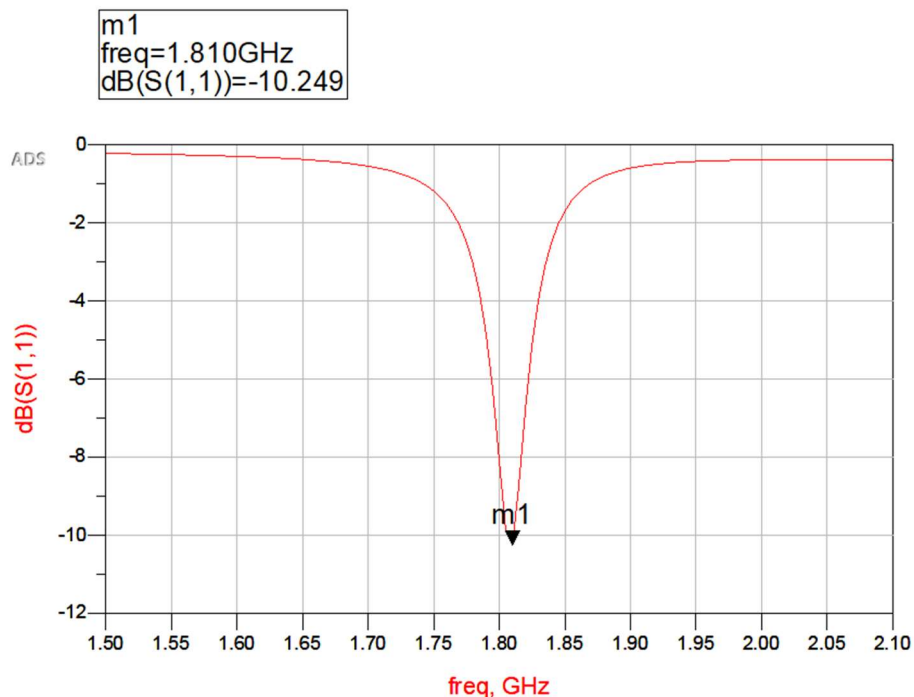
Κεφάλαιο 4

Ως εύρος συχνοτήτων για την απεικόνιση του διαγράμματος απωλειών επιστροφής επιλέχθηκε το εύρος 1.5 - 2.1 GHz, ώστε τα δείγματα να είναι και πάλι 121. Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζεται η γεωμετρία της κεραίας στο Layout.



Σχήμα 4.17: Γεωμετρία της κεραίας #4 στο Layout.

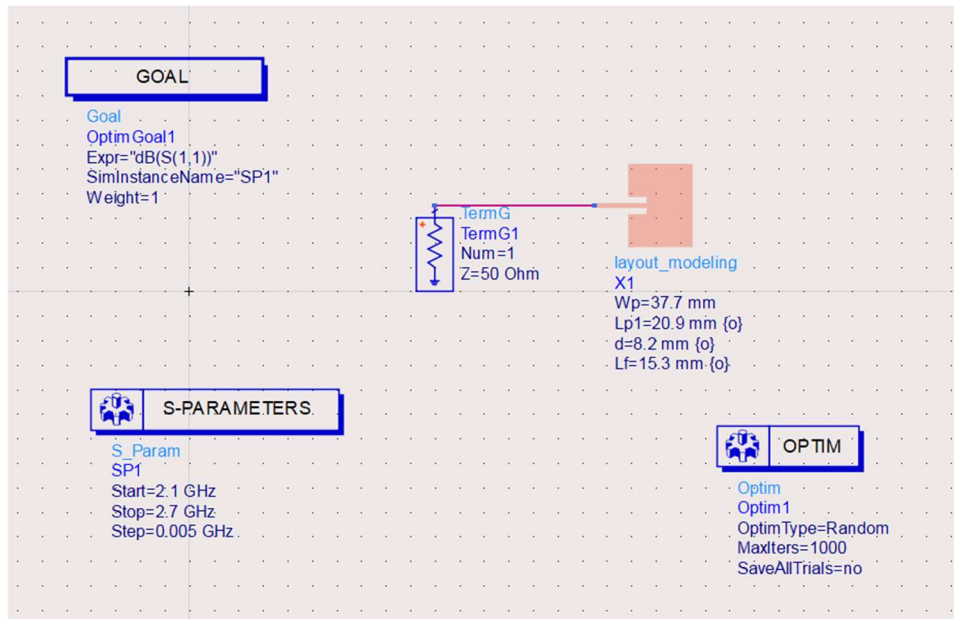
Με τον σχεδιασμό αυτόν, οι απώλειες επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού 1.81 GHz είναι -10.249 dB, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #4 από τον σχεδιασμό στο Layout.

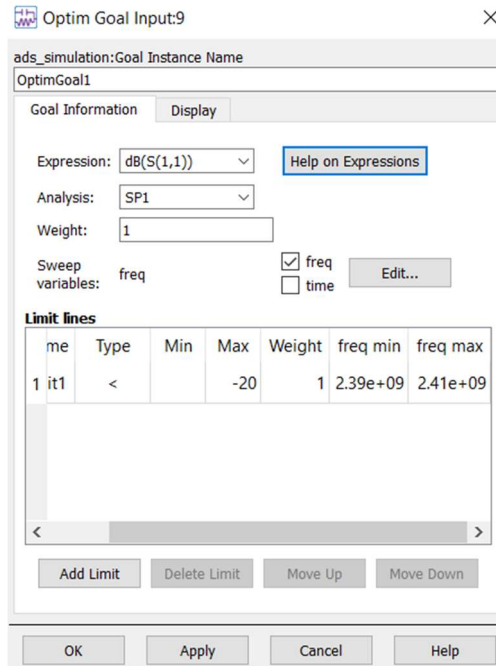
4.6 Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #5 (Βελτιστοποιημένη κεραία #1)

Η πρώτη κεραία που επιλέχθηκε για τη βελτιστοποίηση είναι αυτή που σχεδιάστηκε στο layout (κεραία #2), της οποίας η διαδικασία κατασκευής περιγράφεται στην ενότητα 4.3, λόγω του ήδη ικανοποιητικού συντελεστή ανάκλασης στη συχνότητα συντονισμού της. Για να γίνει η βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου μοντέλου, χρειάστηκε η εξαγωγή του κατασκευασμένου στοιχείου και η τοποθέτησή του σε νέο σχηματικό. Για να γίνει η διαδικασία της βελτιστοποίησης χρειάζεται η προσθήκη των blocks “GOAL” και “OPTIM”, που βρίσκονται στη βιβλιοθήκη “Optim/Stat/DOE”. Στο Σχήμα 4.19 αποτυπώνεται η συνδεσμολογία στο σχηματικό.



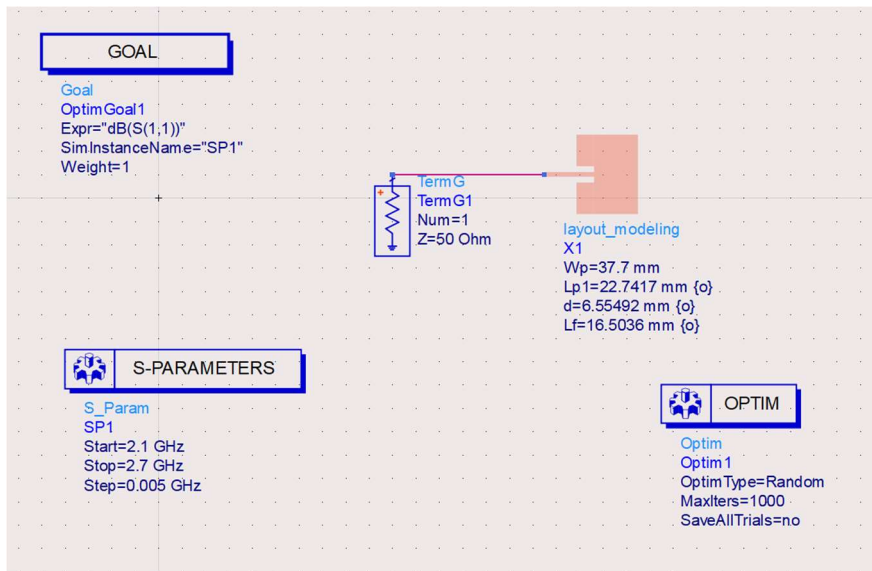
Σχήμα 4.19: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #5.

Επεκτείνοντας το block “GOAL” απαιτείται η συμπλήρωση ορισμένων πεδίων, ώστε να οριστούν τα μεγέθη και ο στόχος της βελτιστοποίησης. Αρχικά, στο πεδίο “Expression” πρέπει να εισαχθεί η προς βελτιστοποίηση παράμετρος και συμπληρώνεται “dB(S(1,1))”. Στο πεδίο “Analysis” εισάγεται η τιμή “SP1” και στο “Weight” η τιμή 1. Αφού επιλεγεί ως μεταβλητή σάρωσης η συχνότητα, θα χρειαστεί να περιοριστεί στα 2,4 GHz. Στο πλαίσιο “Limit lines”, επιλέγονται το κάτω και άνω όριο της συχνότητας στα 2.39 GHz και 2.41GHz αντίστοιχα και στόχος της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης είναι η πτώση του S_{11} κάτω από τα -20 dB. Στο Σχήμα 4.20 απεικονίζεται το σχετικό παράθυρο.



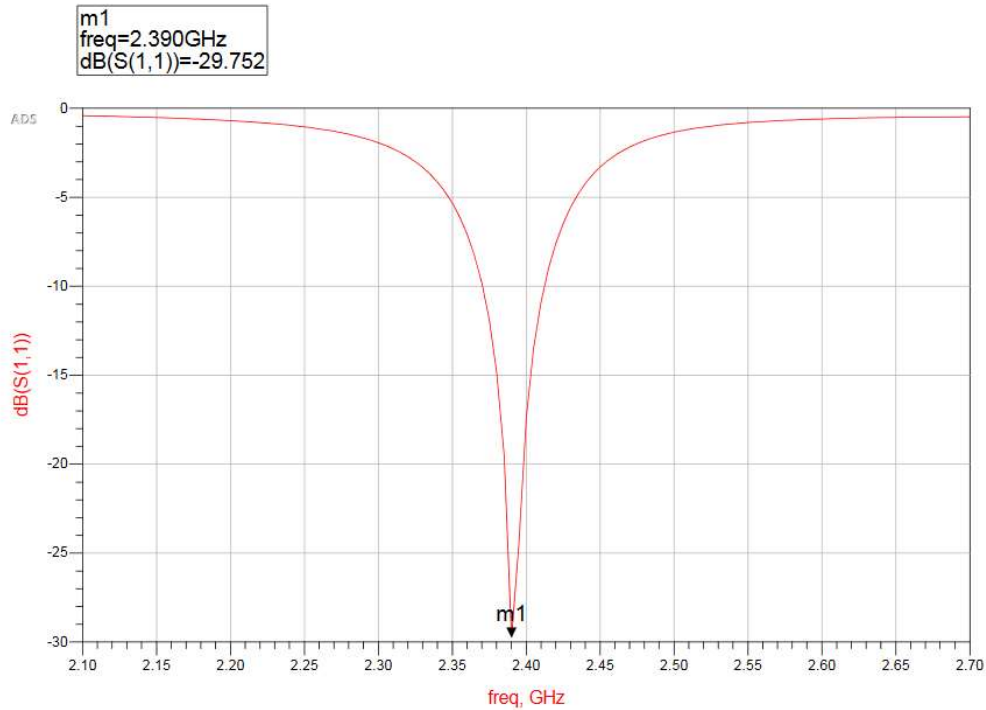
Σχήμα 4.20: Παράμετροι βελτιστοποίησης της κεραίας #5.

Για τη διεκπεραίωση της βελτιστοποίησης, χρειάζεται να ρυθμιστεί κατάλληλα και το block “OPTIM”. Επεκτείνοντάς το, συμπληρώνονται τα πεδία “Number of iterations” και “Optimization Type”, που ελέγχουν τις επαναλήψεις και τον τύπο της διαδικασίας. Πληκτρολογείται “1000” και “Random” αντίστοιχα. Το επιθυμητό σφάλμα ορίζεται αυτόματα 0. Έπειτα, στη γραμμή εργαλείων επιλέγεται “Simulate -> Simulation Variables Setup -> Optimization”. Τα επιθυμητά μεγέθη για βελτιστοποίηση είναι τα Lf, Lp1 και d. Το ADS οριοθετεί τις διαστάσεις των στοιχείων που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Η διαδικασία ξεκινάει με την επιλογή “Optimize” από τη γραμμή εργαλείων. Λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύος, η διαδικασία της βελτιστοποίησης ενός στοιχείου που έχει σχεδιαστεί στο Layout είναι πολύ αργή και μετά από 30 επαναλήψεις αναγκαστικά διακόπηκε. Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη διάταξη του σχηματικού, μετά τη βελτιστοποίηση.



Σχήμα 4.21: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #5, μετά τη βελτιστοποίηση.

Ωστόσο, επειδή τα αποτελέσματα της κατασκευής στο Layout ήταν ήδη πολύ καλά και επειδή το σφάλμα της βελτιστοποίησης ήταν ελάχιστο, μικρότερο δηλαδή από 0.1, σύμφωνα με το διάγραμμα RL, που προέκυψε μετά την EM προσομοίωση στο περιβάλλον του Layout αφού διακόπηκε η βελτιστοποίηση, οι απώλειες επιστροφής είναι -29.752 dB στη συχνότητα συντονισμού 2.39 GHz. Στο Σχήμα 4.22 εικονίζεται το διάγραμμα απωλειών επιστροφής.



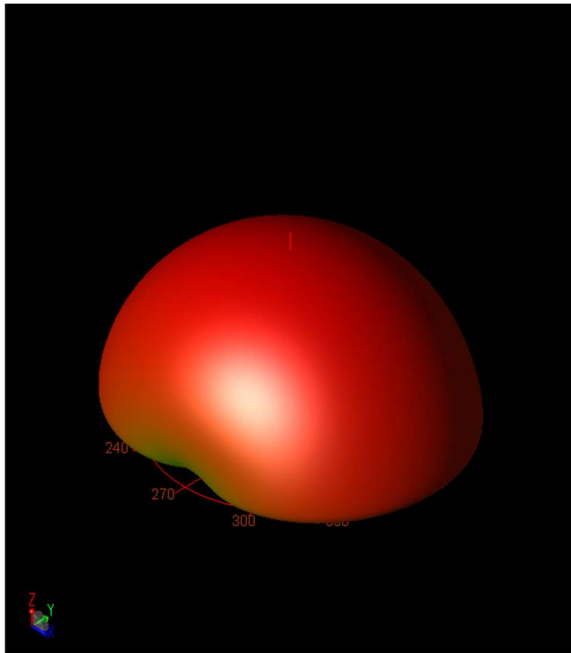
Σχήμα 4.22: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραιάς #5 στο Layout.

Στον Πίνακα 4.4 συγκρίνονται οι τιμές των μεγεθών που επιλέχθηκαν να βελτιστοποιηθούν, πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

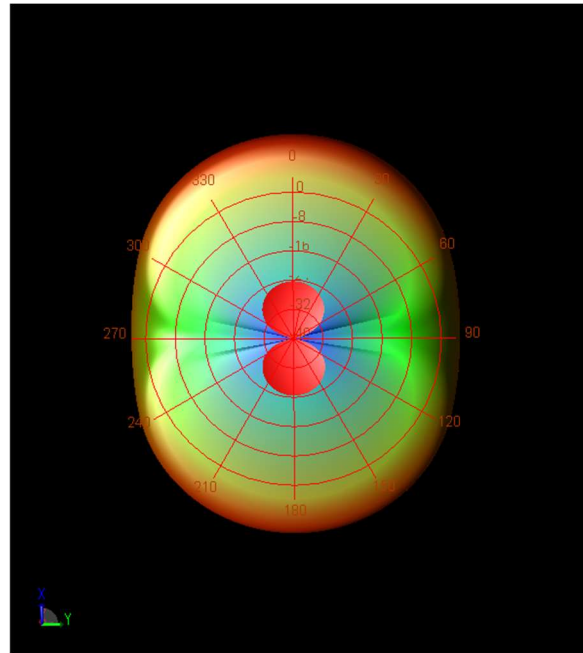
Πίνακας 4.4: Σύγκριση μεγεθών της κεραιάς πριν και μετά τη βελτιστοποίηση

Μέγεθος	Τιμή πριν από τη βελτιστοποίηση	Τιμή μετά τη βελτιστοποίηση
L_{p1}	20.9 mm	22.7417 mm
L_f	8.2 mm	6.55492 mm
d	15.3 mm	16.5036 mm

Αφού οι απώλειες επιστροφής είναι τώρα γνωστές, χρειάζεται να εξαχθεί και το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς, το οποίο προκύπτει ακολουθώντας τη διαδικασία που αναλύεται στην ενότητα 4.2. Στο Σχήμα 4.23 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας στον χώρο (Σχήμα 4.23 α) και στο επίπεδο (Σχήμα 4.23 β), στα 2.39 GHz. Στο Σχήμα 4.24 φαίνεται πως η κεραιά έχει κατευθυντικότητα ίση με 6.31217 dBi, κέρδος 3.17834 dBi και λόγο απόδοσης ακτινοβολίας 48.5978 %. Οι τιμές των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας της βελτιστοποιημένης κεραιάς δεν παρεκκλίνουν σημαντικά από τις τιμές τους στις μη βελτιστοποιημένες κεραιές, αφού η βελτιστοποίηση αφορά μόνο τη μείωση του συντελεστή ανάκλασης στην επιθυμητή συχνότητα συντονισμού.



(α)



(β)

Σχήμα 4.23: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας #5, (α) στον χώρο και (β) στο οριζόντιο επίπεδο.

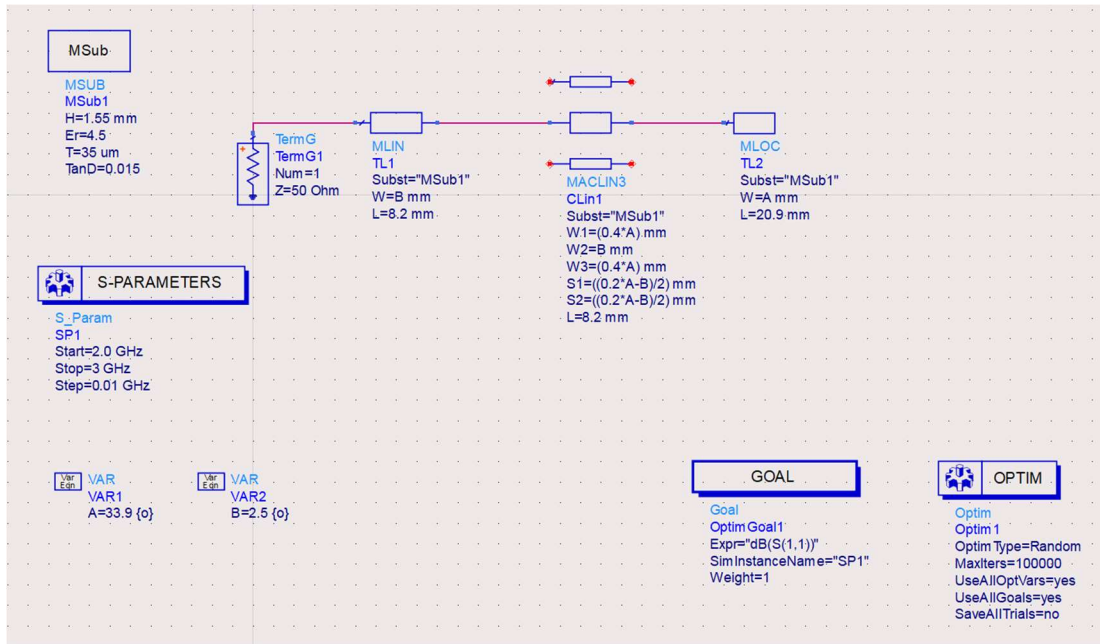
Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.39
Input power (Watts)	0.00249734
Radiated power (Watts)	0.00121365
Directivity(dBi)	6.31217
Gain (dBi)	3.17834
Radiation efficiency (%)	48.5978
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000413144
Effective angle (Steradians)	2.9376
Angle of U Max (theta, phi)	1 0
E(theta) max (mag,phase)	0.557932 -37.1628
E(phi) max (mag,phase)	0.000109196 152.784
E(x) max (mag,phase)	0.557847 -37.1628
E(y) max (mag,phase)	0.000109196 152.784
E(z) max (mag,phase)	0.00973725 142.837

Σχήμα 4.24: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας #5 στα 2.39 GHz.

4.7 Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραίας #6 (Βελτιστοποιημένη κεραία #2)

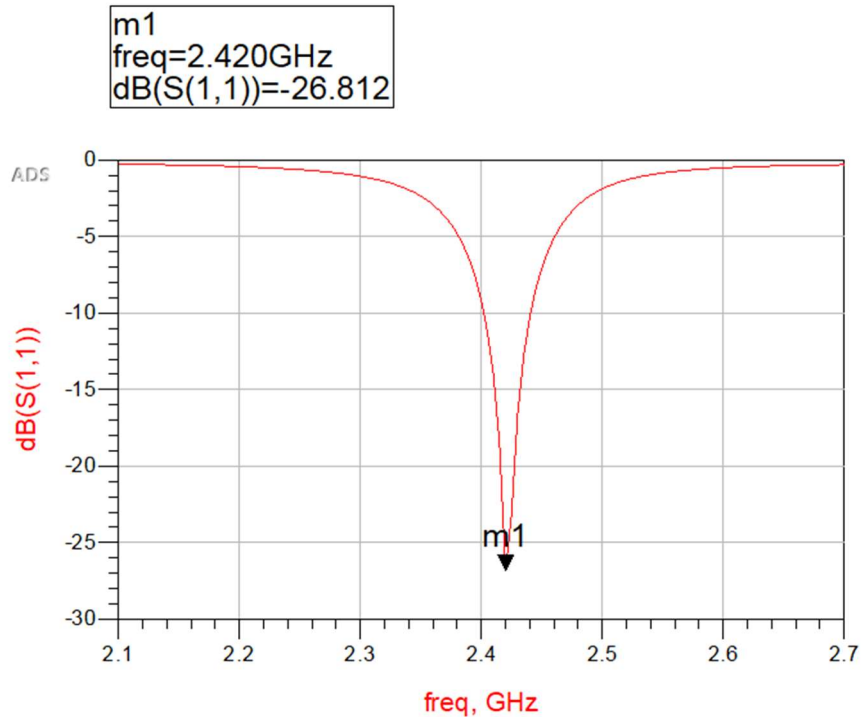
Η δεύτερη κεραία που επιλέχθηκε να βελτιστοποιηθεί, είναι η κεραία της οποίας ο σχεδιασμός περιεγράφηκε στην ενότητα 4.4 (κεραία #3), η οποία σχεδιάστηκε πρώτα στο σχηματικό, αλλά με την

βοήθεια των blocks “VAR”. Η διαμόρφωση του block “GOAL” είναι ίδια με την προηγούμενη βελτιστοποίηση, αλλά στο block “OPTIM”, επιλέχθηκε ο αριθμός των επαναλήψεων να είναι 100000, αντί για 1000, επειδή η βελτιστοποίηση μεγεθών από το σχηματικό φαίνεται να απαιτεί σημαντικά λιγότερη υπολογιστική ισχύ, με αποτέλεσμα να είναι ταχύτερη. Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για βελτιστοποίηση είναι τα A και B, που εκπροσωπούν τις διαστάσεις W_{MLOC} και W_{MLIN} αντίστοιχα. Όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις μπορούν να εκφραστούν σαν αποτέλεσμα μαθηματικών πράξεων μεταξύ των A και B. Συνεπώς, τα μεγέθη που θα βελτιστοποιηθούν είναι τα W_{MLIN} , W_{1MCLI} , $W_{2MCLIN3}$, W_{3MCLI} , S_{1MCLIN} , S_{2MCLI} , W_{MLOC} . Στο σχήμα 4.25 φαίνεται η ολοκληρωμένη διάταξη του σχηματικού, μετά τη βελτιστοποίηση.



Σχήμα 4.25: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραιάς #6, μετά τη βελτιστοποίηση.

Αφού γίνει εξαγωγή του κυκλωματικού σχηματικού σε layout, μπορεί να εξαχθεί και το διάγραμμα απωλειών επιστροφής από την ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση. Παρατηρείται πως η παράμετρος S_{11} στη συχνότητα συντονισμού 2.42 GHz είναι -26.812 dB. Στο Σχήμα 4.26 εικονίζεται το διάγραμμα απωλειών επιστροφής.



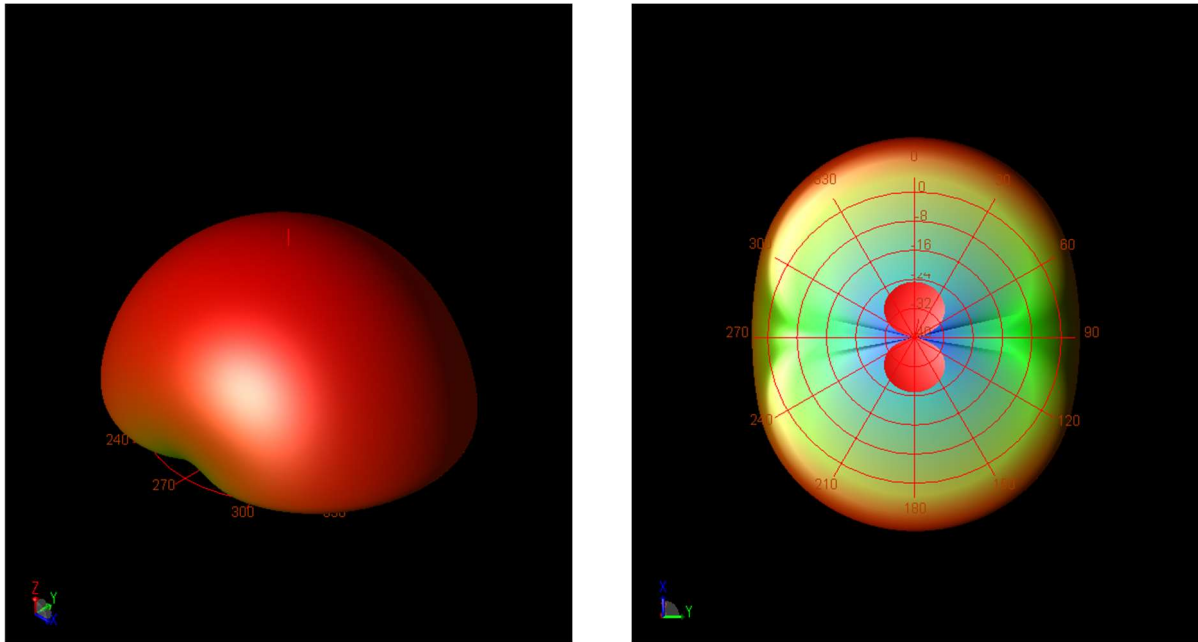
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #6 στο Layout.

Στον Πίνακα 4.5 συγκρίνονται οι τιμές των μεγεθών που επιλέχθηκαν να βελτιστοποιηθούν, πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

Πίνακας 4.5: Σύγκριση μεγεθών της κεραίας πριν και μετά τη βελτιστοποίηση

Μέγεθος	Μέγεθος συναρτήσεϊ A, B	Τιμή πριν τη βελτιστοποίηση	Τιμή μετά από τη βελτιστοποίηση
W_{MLIN}	B	2.2 mm	2.5 mm
$W1_{MCLIN3}$	$0.4 \cdot A$	15.08 mm	13.56 mm
$W2_{MCLIN3}$	B	2.2 mm	2.5 mm
$W3_{MCLIN3}$	$0.4 \cdot A$	15.08 mm	13.56 mm
$S1_{MCLIN3}$	$(0.2 \cdot A - B)/2$	2.67 mm	2.14 mm
$S2_{MCLIN3}$	$(0.2 \cdot A - B)/2$	2.67 mm	2.14 mm
W_{MLOC}	A	37.7 mm	33.9 mm

Στο Σχήμα 4.27 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας στον χώρο (Σχήμα 4.27 α) και στο επίπεδο (Σχήμα 4.28 β), στα 2.42 GHz. Στο Σχήμα 4.28 φαίνεται πως η κεραία έχει κατευθυντικότητα ίση με 6.34595 dBi, κέρδος 3.18209 dBi και λόγο απόδοσης ακτινοβολίας 48.263 %.



(α)

(β)

Σχήμα 4.27: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς #6, (α) στον χώρο και (β) στο οριζόντιο επίπεδο.

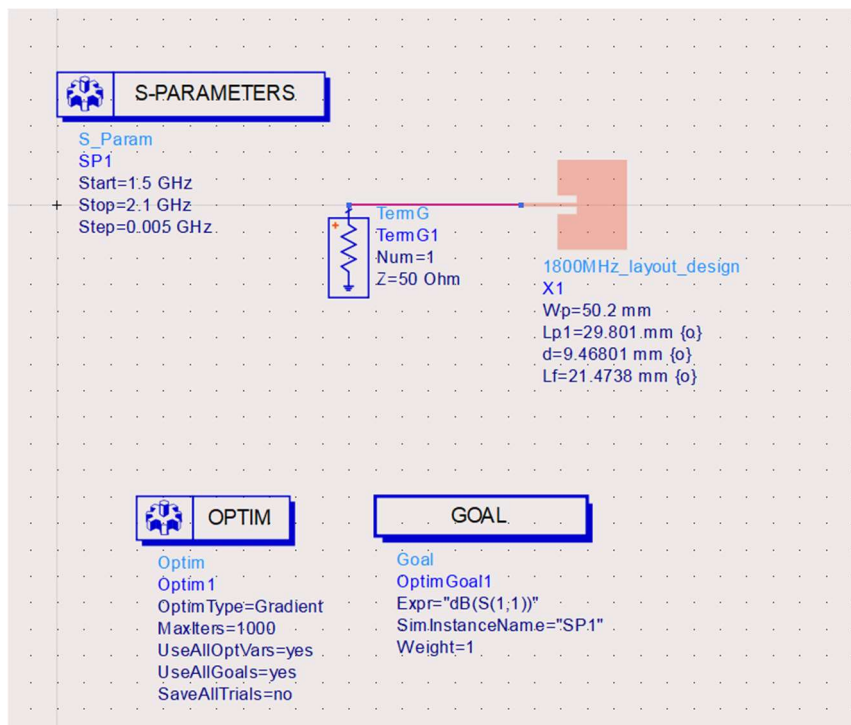
Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.42
Input power (Watts)	0.00249479
Radiated power (Watts)	0.00120406
Directivity(dBi)	6.34595
Gain (dBi)	3.18209
Radiation efficiency (%)	48.263
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000413079
Effective angle (Steradians)	2.91484
Angle of U Max (theta, phi)	2 0
E(theta) max (mag,phase)	0.557888 -7.05861
E(phi) max (mag,phase)	2.36105e-06 79.2857
E(x) max (mag,phase)	0.557548 -7.05861
E(y) max (mag,phase)	2.36105e-06 79.2857
E(z) max (mag,phase)	0.01947 172.941

Σχήμα 4.28: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραιάς #6 στα 2.42 GHz.

4.8 Μεθοδολογία σχεδιασμού κεραιάς #7 (Βελτιστοποιημένη κεραιά #3)

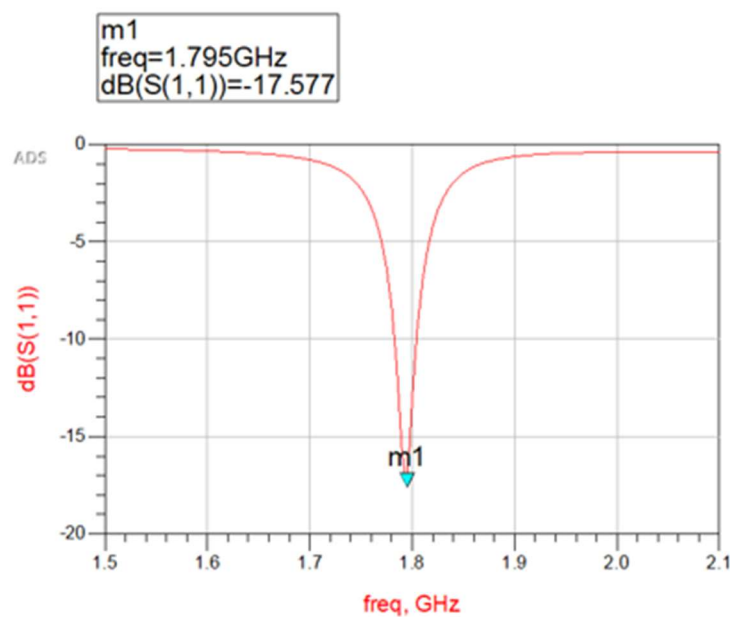
Η τρίτη και τελευταία κεραιά, της οποίας οι απώλειες επιστροφής επιλέχθηκαν να βελτιστοποιηθούν, είναι η κατασκευή με επιθυμητή συχνότητα συντονισμού τα 1.8 GHz. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι η ίδια με αυτήν της βελτιστοποίησης της πρώτης κεραιάς. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην ενότητα 4.5 (κεραιά #4). Και πάλι, λόγω της δυσκολίας του λογισμικού να εκτελέσει υπολογισμούς για στοιχεία που έχουν κατασκευαστεί στο περιβάλλον του layout και της περιορισμένης υπολογιστικής

ισχύος, η διαδικασία τερματίστηκε στις 13 επαναλήψεις, με σφάλμα κοντά στο 0.2. Στο Σχήμα 4.29 απεικονίζεται η ολοκληρωμένη διάταξη του σχηματικού, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4.29: Ολοκληρωμένη διάταξη σχηματικού της κεραίας #7, μετά τη βελτιστοποίηση.

Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του παραθύρου της ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης με τις ίδιες ακριβώς τιμές που αναγράφονται στην ενότητα 4.5, εξάγεται το διάγραμμα RL της κεραίας. Η συχνότητα συντονισμού είναι τα 1.795 GHz και οι απώλειες επιστροφής στο σημείο αυτό είναι ίσες με -17.577 dB, όπως δείχνει και το σχήμα 4.30.



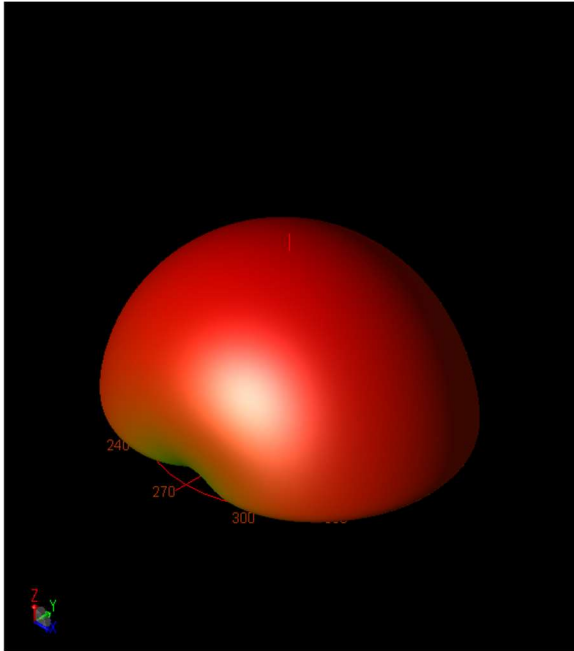
Σχήμα 4.30: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #7 στο Layout.

Ο Πίνακας 4.6 δείχνει τις τιμές των μεγεθών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

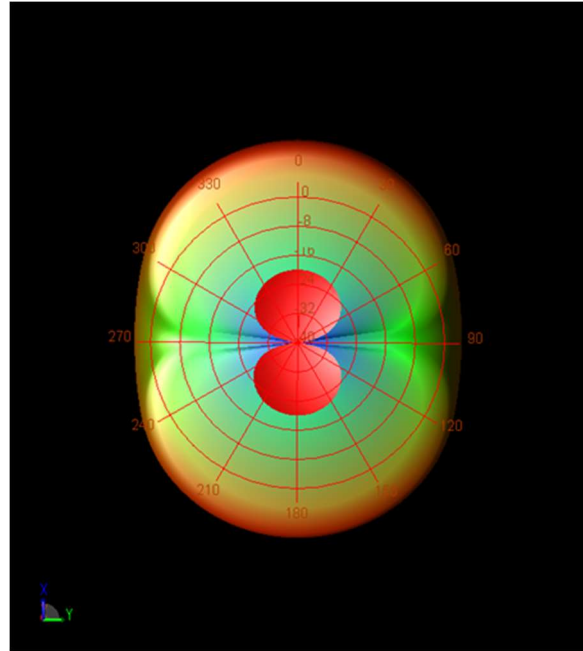
Πίνακας 4.6: Σύγκριση μεγεθών της κεραιάς πριν και μετά τη βελτιστοποίηση

Μέγεθος	Τιμή πριν από τη βελτιστοποίηση	Τιμή μετά τη βελτιστοποίηση
Lp1	28 mm	29.801 mm
Lf	20.2 mm	21.4738 mm
d	11 mm	9.46801 mm

Στο Σχήμα 4.31 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας στον χώρο (Σχήμα 4.31 α) και στο επίπεδο (Σχήμα 4.31 β), στα 1.795 GHz. Στο Σχήμα 4.32 φαίνεται πως η κεραιά έχει κατευθυντικότητα ίση με 6.29505 dBi, κέρδος 2.77742 dBi και λόγο απόδοσης ακτινοβολίας 44.4873 %.



(α)



(β)

Σχήμα 4.31: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς #7, (α) στον χώρο και (β) στο οριζόντιο επίπεδο.

Antenna Parameters		×
Frequency (GHz)		1.795
Input power (Watts)		0.00245632
Radiated power (Watts)		0.00109275
Directivity(dBi)		6.29505
Gain (dBi)		2.77742
Radiation efficiency (%)		44.4873
Maximum intensity (Watts/Steradian)		0.000370525
Effective angle (Steradians)		2.9492
Angle of U Max (theta, phi)	1	0
E(theta) max (mag,phase)	0.528371	-40.7657
E(phi) max (mag,phase)	1.82475e-05	-70.9027
E(x) max (mag,phase)	0.528291	-40.7657
E(y) max (mag,phase)	1.82475e-05	-70.9027
E(z) max (mag,phase)	0.00922135	139.234

OK

Σχήμα 4.32: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραιάς #7 στα 1.795 GHz.

4.9 Σύγκριση χαρακτηριστικών των κεραιών

4.9.1 Σύγκριση χαρακτηριστικών των κεραιών με επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας τα 2.4 GHz

Με το πέρας των βελτιστοποιήσεων, μπορούν ορισμένα χαρακτηριστικά των μοντέλων των κεραιών που σχεδιάστηκαν για να λειτουργούν στη συχνότητα 2.4 GHz να συγκριθούν. Στον Πίνακα 4.7 συγκρίνονται όλες οι κεραιές, βελτιστοποιημένες και μη, ως προς τη συχνότητα συντονισμού, τις απώλειες επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού τους και το εύρος ζώνης τους.

Πίνακας 4.7: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραιών συχνότητας λειτουργίας 2.4 GHz

# Κεραίας	Συχνότητα συντονισμού (f_0)	Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	Εύρος ζώνης (BW)
1	2.41 GHz	-11.48 dB	20 MHz
2	2.4 GHz	-13.706 dB	25 MHz
3	2.415 GHz	-12.37 dB	20 MHz
5 (Βελτιστοποιημένη #1)	2.39 GHz	-29.752 dB	40 MHz
6 (Βελτιστοποιημένη #2)	2.42 GHz	-26.812 dB	40 MHz

Αρχικά παρατηρείται η προφανή μείωση των απωλειών επιστροφής στο σημείο συντονισμού στις δύο βελτιστοποιημένες κεραιές. Όλες οι κεραιές φαίνεται να συντονίζονται πολύ κοντά στην επιθυμητή συχνότητα συντονισμού των 2.4 GHz. Την μεγαλύτερη απόκλιση από τα 2.4 GHz την εμφανίζει η κεραία #6, η οποία αποκλίνει κατά 20 MHz. Από τις κεραιές που δεν βελτιστοποιήθηκαν, καλύτερο συντελεστή ανάκλασης στο σημείο συντονισμού της παρουσιάζει η κεραία #2, στα -13.706 dB. Το πλεονέκτημα αυτό, σε συνδυασμό ότι η συχνότητα συντονισμού της είναι ακριβώς στα 2.4 GHz, οδήγησε στην επιλογή κατασκευής αυτής της κεραίας, όπως θα δούμε και στην επόμενη ενότητα. Η μεθοδολογία ανάλυσης της παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.3. Το εύρος ζώνης των κεραιών, όπως ορίζεται και στην ενότητα 2.4.3, είναι η συχνοτική περιοχή εκατέρωθεν της συχνότητας συντονισμού κάθε κεραίας, όπου οι απώλειες επιστροφής της είναι κάτω από -10 dB. Παρατηρείται πως στις μη βελτιστοποιημένες κεραιές, το εύρος ζώνης είναι 20 MHz και 25 MHz, στην περίπτωση της κεραίας #2. Αυτός είναι και ακόμα ένας λόγος που η κεραία #2 εγκρίθηκε για κατασκευή. Στις βελτιστοποιημένες κεραιές, το εύρος ζώνης και στις δύο περιπτώσεις είναι 40 MHz. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς οι απώλειες επιστροφής στο σημείο συντονισμού τους μειώθηκε αρκετά, έτσι ώστε το εύρος συχνοτήτων γύρω από αυτήν, όπου οι απώλειες επιστροφής είναι αρνητικότερες από -10 dB να φαρδύνει ακόμα περισσότερο.

Ομοίως, είναι απαραίτητο να συγκριθούν οι κεραιές που σχεδιάστηκαν με σκοπό να λειτουργούν στα 2.4 GHz ως προς τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους. Στον Πίνακα 4.8 συγκρίνονται όλες οι κεραιές ως προς την κατευθυντικότητα τους, το κέρδος τους και το λόγο απόδοσης ακτινοβολίας τους, στη συχνότητα συντονισμού τους.

Πίνακας 4.8: Σύγκριση κατευθυντικότητας, κέρδους και λόγου απόδοσης ακτινοβολίας των κεραιών συχνότητας λειτουργίας 2.4 GHz

# Κεραίας	Συχνότητα συντονισμού (f_0)	Κατευθυντικότητα (D)	Κέρδος (G)	Λόγος απόδοσης ακτινοβολίας
1	2.41 GHz	6.398 dBi	3.421 dBi	50.38 %
2	2.4 GHz	6.34 dBi	3.254 dBi	49.06 %

3	2.415 GHz	6.4 dBi	3.41 dBi	50.24 %
5 (Βελτιστοποιημένη #1)	2.39 GHz	6.312 dBi	3.178 dBi	48.6 %
6 (Βελτιστοποιημένη #2)	2.42 GHz	6.346 dBi	3.182 dBi	48.26 %

Παρατηρείται πως οι διαφορές στα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας, ανάμεσα στις βελτιστοποιημένες και στις μη βελτιστοποιημένες κεραιές, είναι αμελητέες. Φυσικά, αυτό είναι προσδοκώμενο, αφού η βελτιστοποίηση των κεραιών που πραγματοποιήθηκε δεν αφορούσε τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους, αλλά τη βελτίωση των απωλειών επιστροφής.

4.9.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών των κεραιών με επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας τα 1.8 GHz

Με τη σειρά τους, μπορούν ανάλογα να συγκριθούν και οι κεραιές που σχεδιάστηκαν για να λειτουργούν στα 1.8 GHz. Αν και τα μοντέλα που αναλύθηκαν είναι μόνο δύο, σε σύγκριση με τα πέντε που συγκρίθηκαν παραπάνω, η σύγκριση του βελτιστοποιημένου μοντέλου με το αρχικό μοντέλο είναι απαραίτητη. Κατά αναλογία με την ενότητα 4.9.1, οι κεραιές συγκρίνονται με βάση τα χαρακτηριστικά τους ως κυκλωματικό στοιχείο και με βάση τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους. Στον Πίνακα 4.9 συγκρίνονται οι δύο κεραιές ως προς τη συχνότητα συντονισμού, τις απώλειες επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού τους και το εύρος ζώνης τους.

Πίνακας 4.9: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραιών συχνότητας λειτουργίας 1.8 GHz

# Κεραίας	Συχνότητα συντονισμού (f_0)	Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	Εύρος ζώνης (BW)
4	1.81 GHz	-10.249 dB	5 MHz
7 (Βελτιστοποιημένη #3)	1.795 GHz	-17.577 dB	20 MHz

Εδώ παρατηρείται πως η μη βελτιστοποιημένη κεραία των 1.81 GHz είναι οριακά αποδεκτή, ως προς τις απώλειες επιστροφής της στη συχνότητα συντονισμού της (-10.249 dB στα 1.81 GHz). Σε τέτοιες περιπτώσεις, όταν οι απώλειες επιστροφής της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού της είναι οριακά κάτω από τα -10 dB, είναι άσκοπο να μετρηθεί το εύρος ζώνης της και σε μερικές περιπτώσεις, όταν για παράδειγμα ο ρυθμός δειγματοληψίας των απωλειών επιστροφής συναρτήσει της συχνότητας είναι σχετικά μικρός, είναι και δύσκολο να μετρηθεί. Η μείωση του συντελεστή ανάκλασης μετά τη βελτιστοποίηση (-17.577 dB στα 1.795 GHz) μπορεί να μην είναι τόσο μεγάλη όσο οι μεταβολές στις προηγούμενες κεραιές, ωστόσο είναι σημαντική και ικανοποιητική. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για το εύρος ζώνης.

Στον Πίνακα 4.10 συγκρίνονται οι δύο κεραιές ως προς την κατευθυντικότητα τους, το κέρδος τους και το λόγο απόδοσης ακτινοβολίας τους, στη συχνότητα συντονισμού τους.

Πίνακας 4.10: Σύγκριση κατευθυντικότητας, κέρδους και λόγου απόδοσης ακτινοβολίας των κεραιών συχνότητας λειτουργίας 1.8 GHz

# Κεραίας	Συχνότητα συντονισμού (f_0)	Κατευθυντικότητα (D)	Κέρδος (G)	Λόγος απόδοσης ακτινοβολίας
4	1.81 GHz	6.319 dBi	2.811 dBi	44.591 %
7 (Βελτιστοποιημένη #3)	1.795 GHz	6.295 dBi	2.777 dBi	44.487 %

Τα αποτελέσματα είναι και στην περίπτωση αυτήν, σύμφωνα με τα προσδοκώμενα. Οι διαφορές στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μεταξύ των αρχικών και των βελτιστοποιημένων μοντέλων στις

Κεφάλαιο 4

συχνότητες συντονισμού τους είναι αμελητέες, για τον ίδιο ακριβώς λόγο που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Κεφάλαιο 5ο: Κατασκευή και μετρήσεις των κεραιών

Από τις 7 κεραιές που αναλύθηκαν συνολικά στο ADS, οι 4 από αυτές κρίθηκαν ικανοποιητικές ώστε να σχεδιαστούν σε PCB. Τα μοντέλα που θεωρήθηκαν ικανοποιητικά είναι όλες οι βελτιστοποιημένες κεραιές και η κεραιά #2, της οποίας η μεθοδολογία σχεδιασμού στο ADS καλύπτεται στο κεφάλαιο 4.3. Στον Πίνακα 5.1 αναγράφονται τα χαρακτηριστικά των κεραιών προς κατασκευή, από τις προσομοιώσεις στο ADS, ως κυκλωματικά στοιχεία

Πίνακας 5.1: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραιών που κρίθηκαν ικανοποιητικές για κατασκευή

# Κεραίας	Συχνότητα συντονισμού (f_0)	Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	Εύρος ζώνης (BW)
2	2.4 GHz	-13.706 dB	25 MHz
5 (Βελτιστοποιημένη #1)	2.39 GHz	-29.752 dB	40 MHz
6 (Βελτιστοποιημένη #2)	2.42 GHz	-26.812 dB	40 MHz
7 (Βελτιστοποιημένη #3)	1.795 GHz	-17.577 dB	20 MHz

Για τη μέτρηση των παραμέτρων αυτών χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής φάσματος του εργαστηρίου Ασυρμάτων Επικοινωνιών του τμήματος. Λόγος για αυτές τις μετρήσεις γίνεται παρακάτω.

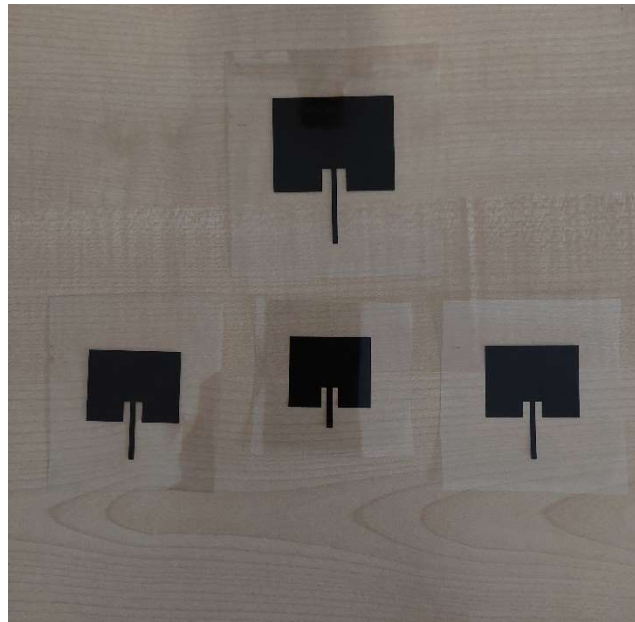
Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας των κεραιών απαιτούν είτε την πρόσβαση σε ανηχοϊκό θάλαμο, είτε τη μέτρησή τους με open-field test. Επειδή καμία από τις δύο επιλογές δεν ήταν εφικτές, κρατήθηκαν τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραιών που προέκυψαν από τις ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα αυτών αναγράφονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Σύγκριση κατευθυντικότητας, κέρδους και λόγου απόδοσης ακτινοβολίας των κεραιών που κρίθηκαν ικανοποιητικές για κατασκευή

# Κεραίας	Συχνότητα συντονισμού (f_0)	Κατευθυντικότητα (D)	Κέρδος (G)	Λόγος απόδοσης ακτινοβολίας
2	2.4 GHz	6.34 dBi	3.254 dBi	49.06 %
5 (Βελτιστοποιημένη #1)	2.39 GHz	6.312 dBi	3.178 dBi	48.6 %
6 (Βελτιστοποιημένη #2)	2.42 GHz	6.346 dBi	3.182 dBi	48.26 %
7 (Βελτιστοποιημένη #3)	1.795 GHz	6.295 dBi	2.777 dBi	44.487 %

5.1 Κατασκευή και μετρήσεις των κεραιών

Τα PCB σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο της φωτολιθογραφίας. Η φωτολιθογραφία είναι μία συνηθισμένη φωτογραφική μέθοδος για τη μεταφορά αναπτυγμάτων (layout) ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε διηλεκτρικά υποστρώματα. Συγκεκριμένα το layout των κεραιών εκτυπώθηκε σε φιλμ και το διηλεκτρικό υπόστρωμα που επιλέχθηκε είναι η πλακέτα FR-4 διπλής όψης της Bungard, της οποίας τα χαρακτηριστικά αναγράφονται στην ενότητα 4.1. Αρχικά, για να εκτυπωθούν τα επιθυμητά layouts σε φιλμ χρειάζεται αρχικά να γίνει η εξαγωγή τους από το ADS ως αρχεία .dxf (Drawing Interchange Format ή Drawing Exchange Format) και έπειτα, με την κατάλληλη τροποποίηση μέσω του λογισμικού σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων KiCad, η μετατροπή των .dxf αρχείων σε αρχεία .pdf. Στο Σχήμα 5.1 εικονίζονται οι εκτυπώσεις των layout σε φιλμ.



Σχήμα 5.1: Εκτύπωση των layout σε φιλμ

Πριν ξεκινήσει η φωτοχημική διαδικασία, η πλακέτα χρειάστηκε να κοπεί σύμφωνα με τις διαστάσεις των κεραιών και έπειτα να φινιριστεί κάθε πλευρά της με γυαλόχαρτο. Στη συνέχεια, αφαιρέθηκαν τα προστατευτικά καλύμματα των πλακετών, και τα εκτυπωμένα φιλμ τοποθετήθηκαν πάνω από τα κομμένα μέρη της πλακέτας, προσεκτικά, ασφαρίζοντάς τα με ταινία, και τοποθετήθηκαν ανάμεσα σε δύο γυάλινες πλάκες, σφραγισμένες, όμοια, με ταινία, για την αποφυγή τυχόν ανεπιθύμητων σκιών. Αυτές εισέρχονται στον θάλαμο έκθεσης, μία πρόχειρη κατασκευή στην οποία το εσωτερικό βρίσκεται μία λάμπα υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), και εκτίθενται για περίπου πέντε λεπτά. Η διαδικασία έγινε δύο φορές για την κεραία #5 και την κεραία #7, σε περίπτωση που προέκυπτε σφάλμα είτε στην εμφάνιση, είτε αργότερα στην κόλληση.

Κατά την εκτέλεση της διαδικασίας εμφάνισης και αποχάλκωσης των πλακετών υπάρχει άμεση επαφή με καυστικά χημικά διαλύματα, οπότε συνίσταται η χρήση ενός ζευγαριού γαντιών και η εργασία σε περιβάλλον επαρκή αερισμού. Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία που περιεγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η πλακέτα τοποθετήθηκε στο χημικό διάλυμα εμφάνισης, που αποτελείται από καυστικό νάτριο (NaOH) διαλυμένο σε νερό, σε αναλογία περίπου 5% κατά όγκο. Οι πλακέτες αφήθηκαν για περίπου 5 λεπτά μέσα στο διάλυμα, ώσπου να αποκολληθεί το υλικό και να αποτυπωθεί η κεραία επάνω στην πλακέτα, έπειτα πλυθήκαν καλά με άφθονο νερό και καλύφθηκαν ώστε να προστατευθεί η φωτοευαίσθητη επιφάνεια από το φως. Το επόμενο διάλυμα στο οποίο χρειάστηκε να βυθιστεί η πλακέτα, είναι το χημικό διάλυμα της αποχάλκωσης. Αυτό περιέχει υδατικό διάλυμα υδροχλωρικού οξέος (HCl) 10-15 %, κοινώς κεζάπ, και υπεροξείδιο του υδρογόνου (H₂O₂) πυκνότητας 30-35% ή αλλιώς perhydrol. Ο χρόνος έκθεσης κάθε πλακέτας και σε αυτό το διάλυμα ήταν περίπου πέντε λεπτά. Τελικά, τα σημεία του χαλκού που δεν ήταν καλυμμένα με το φωτοευαίσθητο υλικό οξειδώνονται. Μετά την οξείδωση ο χαλκός εξαφανίζεται και στη θέση του εμφανίζεται το πολυμερές εποξικό υλικό, το οποίο διαχωρίζει την επιφάνεια ακτινοβολίας με την επιφάνεια της γείωσης. Διακρίνεται με πράσινο χρώμα στο Σχήμα 5.3.α. Αφού ο χαλκός απομακρυνθεί από τα σημεία που πρέπει, η πλακέτα ξεπλένεται με νερό, στεγνώνεται και καθαρίζεται με οινόπνευμα. Αφού οι κεραιές αποτυπώθηκαν στις πλακέτες FR-4 κολλήθηκαν οι κονέκτορες στη γραμμή τροφοδοσίας κάθε κεραιάς με κολλητήρι και σύρμα ασημοκόλλησης. Οι κονέκτορες που χρησιμοποιήθηκαν είναι SMA – Female

κατάλληλοι για σύνδεση σε γραμμή μικροταινίας 50 Ω έως και στα 6 GHz, εξωτερικής διαμέτρου 5mm και φαίνονται στο Σχήμα 5.2. Στο Σχήμα 5.3 διακρίνονται οι δύο όψεις των πλακετών.



Σχήμα 5.2: Κονέκτορες SMA-Female εξωτερικής διαμέτρου 5mm



(α)



(β)

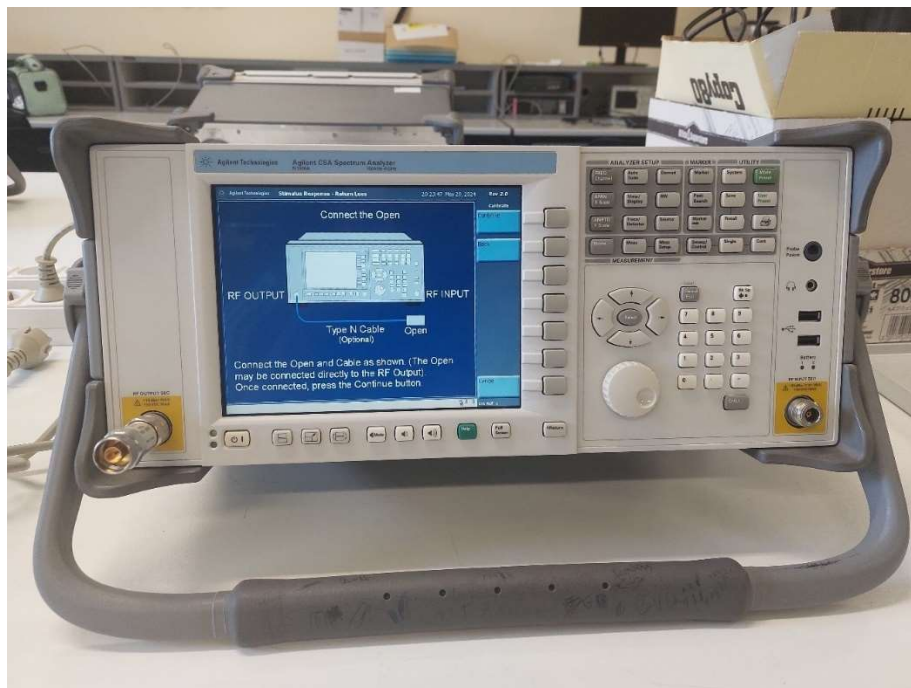
Σχήμα 5.3: Οι τυπωμένες κεραιές μικροταινίας με ένθετη γραμμή τροφοδοσίας, (α) από την όψη του στοιχείου ακτινοβολίας και (β) από την όψη της γείωσης τους

5.2 Ο αναλυτής φάσματος

Οι μετρήσεις των απωλειών επιστροφής κάθε κεραιάς πραγματοποιήθηκαν με τον αναλυτή φάσματος (spectrum analyzer) του εργαστηρίου Ασυρμάτων Επικοινωνιών του τμήματος. Ο συγκεκριμένος αναλυτής φάσματος είναι της εταιρίας Agilent και είναι ικανός να επεξεργαστεί στο φάσμα συχνοτήτων 100 kHz – 6 GHz. Ακόμα, διαθέτει και εσωτερική γεννήτρια συχνοτήτων, της οποίας η έξοδος βρίσκεται στο κάτω αριστερό μέρος του αναλυτή και σηματοδοτείται με την ένδειξη RF Output. Με τον αναλυτή μετρήθηκαν οι απώλειες επιστροφής (RL), ο λόγος στασίμου κύματος (VSWR) και το εύρος ζώνης (BW) κάθε κεραιάς.

Προκειμένου να μετρηθεί ο συντελεστής ανάκλασης των κεραιών θα χρειαστεί ο αναλυτής φάσματος να επιδεχθεί σε διαδικασία βαθμονόμησης (calibration). Η διαδικασία της βαθμονόμησης

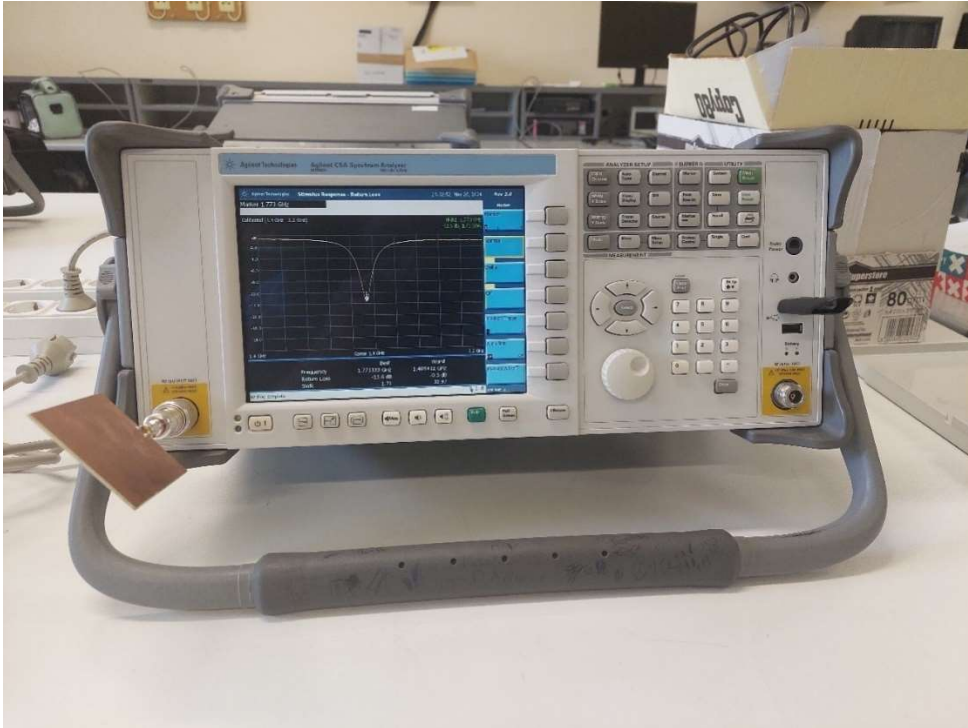
αναφέρεται στη σύνδεση πρότυπων φορτίων (ανοιχτό κύκλωμα, βραχυκύκλωμα, 50 Ω) στον αναλυτή, για τα οποία η απόκριση είναι γνωστή. Η διαδικασία συνιστάται να πραγματοποιείται κάθε φορά που το εύρος συχνοτήτων που επεξεργάζεται ο αναλυτής, αλλάζει. Αρχικά, θα πρέπει ο αναλυτής να τεθεί σε λειτουργία, πιέζοντας το κουμπί εκκίνησης και όταν πραγματοποιηθούν όλες οι εσωτερικές ρυθμίσεις και ανοίξει η οθόνη, πιέζονται με τη σειρά τα πλήκτρα «Mode», «Stimulus/Response», «Meas» και «Return Loss». Πατώντας την αλληλουχία ρυθμίσεων αυτήν, τίθεται ο αναλυτής σε λειτουργία μέτρησης του συντελεστή ανάκλασης. Έπειτα, χρειάζεται να οριστεί το εύρος ζώνης στο οποίο θα γίνει η βαθμονόμηση. Στην περίπτωση μέτρησης των κεραιών με συχνότητα λειτουργίας τα 2.4 GHz, το εύρος επιλέχθηκε να είναι 2 – 2.8 GHz, ώστε η συχνότητα συντονισμού των κεραιών να είναι και η κεντρική συχνότητα του επιλεγόμενου εύρους. Για τον ίδιο λόγο, στις κεραιές συχνότητας λειτουργίας 1.8 GHz, το εύρος που επιλέχθηκε είναι 1.4 – 2.2 GHz. Για να ρυθμιστεί το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων, επιλέγεται το κουμπί «FREQ Channel» και πατώντας «Start Freq» αποθηκεύεται η αρχική συχνότητα, ενώ με το πάτημα του κουμπιού «Stop Freq» αποθηκεύεται η τελική συχνότητα. Αν η λειτουργία Averaging είναι ενεργοποιημένη, θα χρειαστεί να απενεργοποιηθεί, πατώντας «Meas Setup», «Avg Mode», «Off». Αφού πραγματοποιηθούν οι παραπάνω ρυθμίσεις, μπορούν πλέον να συνδεθούν τα πρότυπα φορτία που περιλαμβάνονται στο σετ βαθμονόμησης (calibration kit). Στην οθόνη του αναλυτή εμφανίζονται οδηγίες σχετικά με τη σύνδεση των φορτίων. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, εμφανίζεται η ένδειξη «Calibrated» και η περιοχή συχνοτήτων για την οποία πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται ο αναλυτής σε κατάσταση βαθμονόμησης.



Σχήμα 5.4: Ο αναλυτής φάσματος του εργαστηρίου Ασυρμάτων Επικοινωνιών του τμήματος σε λειτουργία βαθμονόμησης

5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

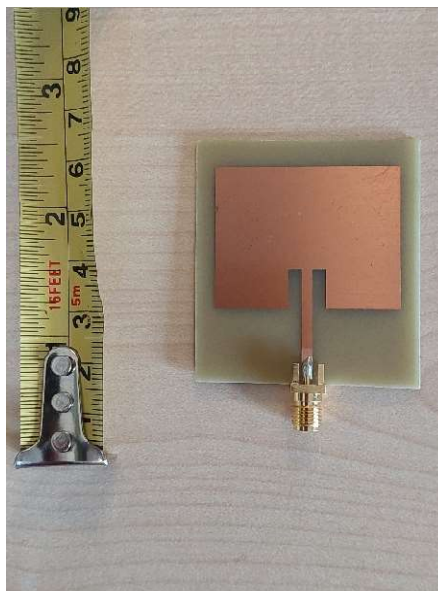
Στα παρακάτω κεφάλαια γίνει η ανάλυση, ο σχολιασμός των μετρήσεων, καθώς και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Οι κεραιές συνδέθηκαν στην έξοδο του tracking generator του αναλυτή φάσματος με κονέκτορα SMA-male to N-male, από τον αναλυτή προς την κεραία. Στο Σχήμα 5.5 εικονίζεται ο αναλυτής φάσματος σε λειτουργία μέτρησης με συνδεδεμένο το φορτίο της κεραίας.



Σχήμα 5.5: Ο αναλυτής φάσματος του εργαστηρίου Ασυρμάτων Επικοινωνιών του τμήματος σε λειτουργία μέτρησης με συνδεδεμένο φορτίο κεραιάς

5.3.1 Μετρήσεις κεραιάς #2

Αυτή είναι η μόνη μη βελτιστοποιημένη κεραία που επιλέχθηκε να σχεδιαστεί σε PCB, λόγω των ικανοποιητικών απωλειών επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού της από τις προσομοιώσεις. Η ανάλυσή της παρουσιάζεται στην ενότητα 4.3. Στο Σχήμα 5.6 εικονίζεται η κεραία #2.

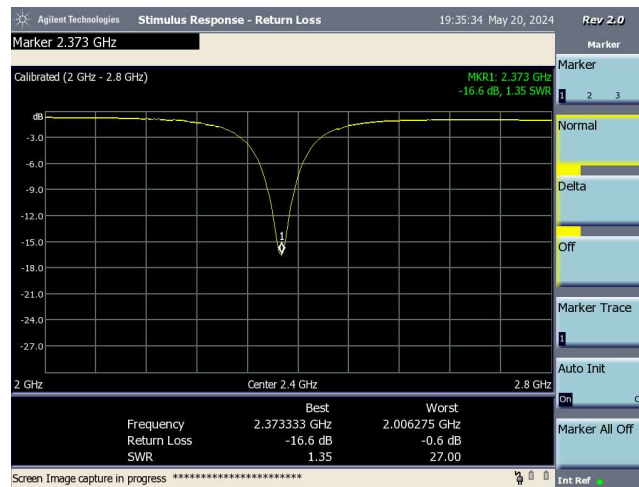


Σχήμα 5.6: Κεραία #2

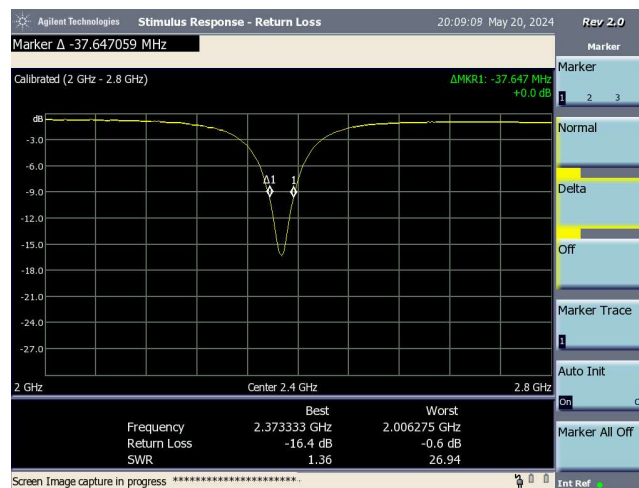
Στον αναλυτή, ο κατακόρυφος άξονας τέθηκε σε κλίμακα 3 dB/div. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραιάς. Στο Σχήμα 5.7.α φαίνεται η

Κεφάλαιο 5

σηματοδότηση του ολικού ελαχίστου του διαγράμματος που μπορεί να γίνει με την επιλογή “Marker” και στο Σχήμα 5.7.β φαίνεται η σηματοδότηση των δύο σημείων τομής του διαγράμματος με την οριζόντια ευθεία των -10 dB. Για την προσθήκη markers που μπορούν να μετρήσουν μεταβολή επιλέγεται πρώτα το πλήκτρο «Marker» και έπειτα η επιλογή «Delta» από την οθόνη.



(α) Σηματοδότηση απωλειών επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού της κεραίας #2



(β) Σηματοδότηση εύρους ζώνης της κεραίας #2

Σχήμα 5.7: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #2 από τον αναλυτή φάσματος

Η κεραία #2 φαίνεται να συντονίζεται στα 2.373 GHz και οι απώλειες επιστροφής της στη συχνότητα αυτή είναι -16.6 dB, αρκετά χαμηλότερες από την αποδεκτή τιμή των -10 dB, και το SWR είναι 1.36. Σύμφωνα με τη μέτρηση, το εύρος ζώνης της κεραίας είναι 37.647 MHz. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω στοιχεία, η συμπεριφορά της κεραίας #2 σαν στοιχείο κυκλώματος είναι ικανοποιητική. Για να συγκριθούν τα αποτελέσματα εισάγεται ο όρος απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο

$$\frac{|x_{\text{προσομοίωσης}} - x_{\text{μέτρησης}}|}{x_{\text{προσομοίωση}}} \times 100 \quad (5.1)$$

όπου x το μέγεθος που συγκρίνεται. Στον Πίνακα 5.3 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο ADS, με αυτά των μετρήσεων στον αναλυτή φάσματος.

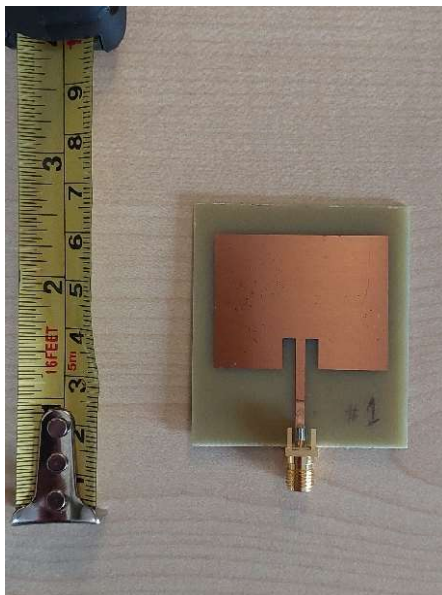
Πίνακας 5.3: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραιάς #2

Μέγεθος	Προσομοίωση στο ADS	Μετρήσεις στον αναλυτή φάσματος	Σχετική ποσοστιαία απόκλιση
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	2.4 GHz	2.373 GHz	1.125 %
Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	-13.706 dB	-16.6 dB	21.11 %
Εύρος ζώνης (BW)	25 MHz	37.647 MHz	50.6 %

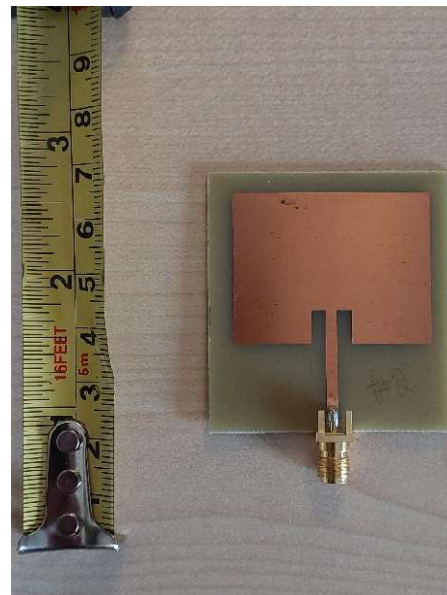
Παρατηρείται πως η συχνότητα συντονισμού μετρήθηκε στα 2.373 GHz, ενώ στην προσομοίωση αυτή ήταν ακριβώς στα 2.4 GHz, μικρή απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση του 1.125 %. Ο συντελεστής ανάκλασης στη συχνότητα αυτήν μετρήθηκε στα -16.6 dB, απόκλιση 21.11 % από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Αυτό έχει συνέπεια το εύρος ζώνης που προέκυψε από τις μετρήσεις (37.647 MHz) να είναι μεγαλύτερο από αυτό που προέκυψε από τις προσομοιώσεις (25 MHz), με απόκλιση 50.6 %.

5.3.2 Μετρήσεις κεραιάς #5

Η πρώτη βελτιστοποιημένη κεραία που επιλέχθηκε να σχεδιαστεί σε PCB, είναι η κεραία #5 (βελτιστοποιημένη κεραία #1), της οποίας η ανάλυση περιεγράφηκε στην ενότητα 4.6. Για προληπτικούς λόγους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η κεραία αυτή σχεδιάστηκε σε πλακέτα δύο φορές. Στο Σχήμα 5.8 εικονίζονται οι κεραιές #5.α και #5.β.



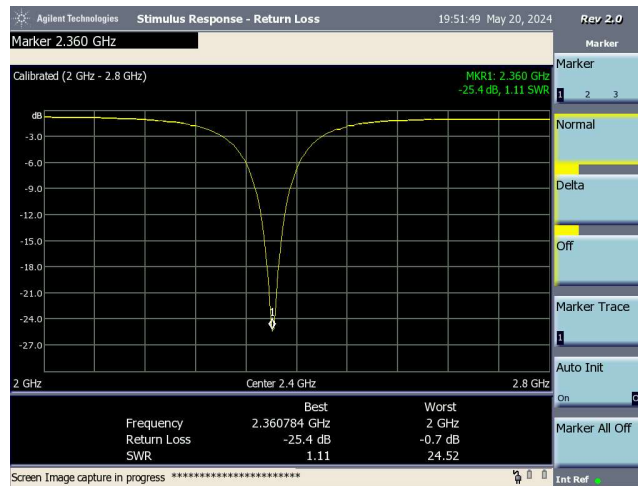
(α)



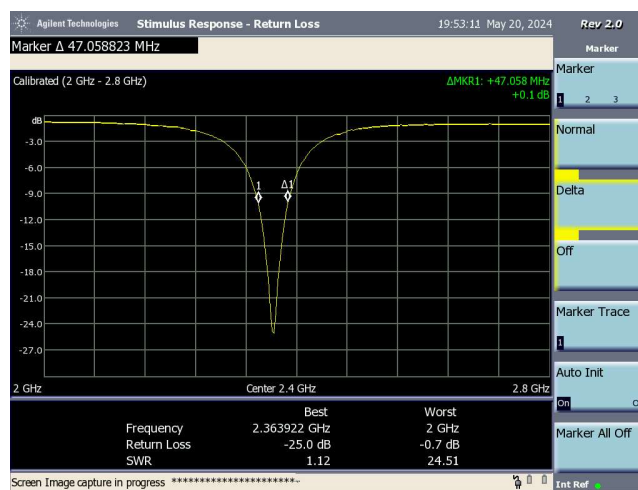
(β)

Σχήμα 5.8: Κεραιές #5, (α) #5.α και (β) #5.β

Και εδώ, ο κατακόρυφος άξονας είναι σε κλίμακα 3 dB/div. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραιάς #5 Στο Σχήμα 5.9.α φαίνεται η σηματοδότηση του ολικού ελαχίστου του διαγράμματος και στο Σχήμα 5.9.β φαίνεται η σηματοδότηση των δύο σημείων τομής του διαγράμματος με την οριζόντια ευθεία των -10 dB.



(α) Σηματοδότηση απωλειών επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού της κεραίας #5.α



(β) Σηματοδότηση εύρους ζώνης της κεραίας #5.α

Σχήμα 5.9: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #5.α από τον αναλυτή φάσματος

Η κεραία #5.α συντονίζεται στα 2.361 GHz και οι απώλειες επιστροφής της στη συχνότητα αυτήν είναι -25.4 dB, πολύ χαμηλότερες από την αποδεκτή τιμή των -10 dB, και το SWR είναι 1.11. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι 47.508 MHz. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω στοιχεία, η συμπεριφορά της κεραίας #5.α σαν στοιχείο κυκλώματος είναι πολύ ικανοποιητική. Στον Πίνακα 5.4 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο ADS, με αυτά των μετρήσεων στον αναλυτή φάσματος.

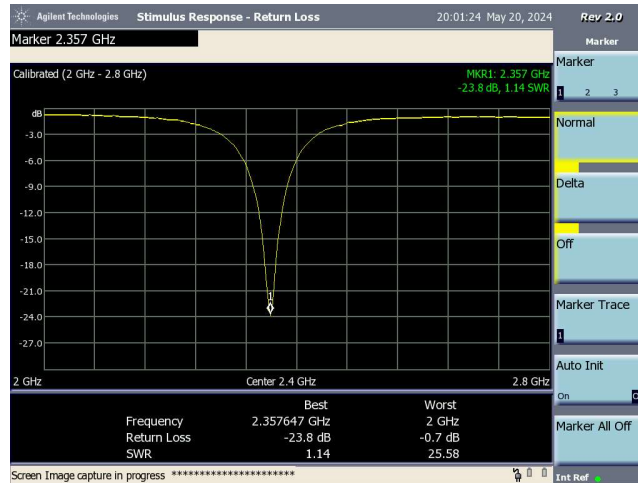
Πίνακας 5.4: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #5.α

Μέγεθος	Προσομοίωση στο ADS	Μετρήσεις στον αναλυτή φάσματος	Σχετική ποσοστιαία απόκλιση
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	2.39 GHz	2.361 GHz	1.21 %
Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	-28.752 dB	-25.4 dB	11.66 %
Εύρος ζώνης (BW)	40 MHz	47.508 MHz	18.8 %

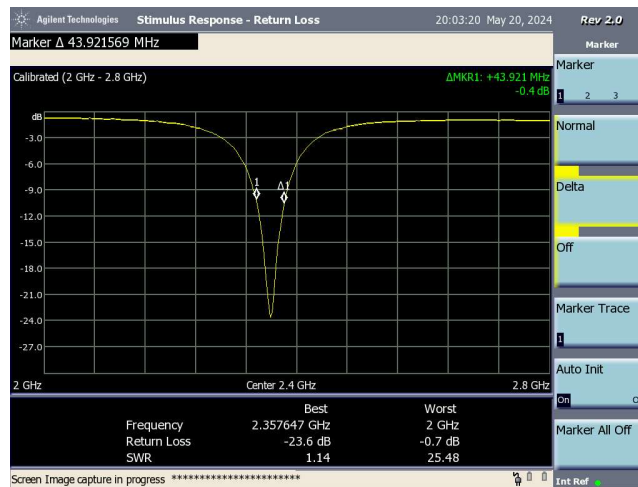
Παρατηρείται πως η συχνότητα συντονισμού μετρήθηκε στα 2.361 GHz, ενώ στην προσομοίωση αυτή ήταν στα 2.39 GHz. Ο συντελεστής ανάκλασης στη συχνότητα αυτήν μετρήθηκε στα -25.4 dB, απόκλιση 11.66 % από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Και εδώ εύρος ζώνης που προέκυψε από τις

μετρήσεις (47.508 MHz) είναι μεγαλύτερο από αυτό που προέκυψε από τις προσομοιώσεις (40 MHz), με απόκλιση 18.8 %, λόγω του καλύτερου συντελεστή ανάκλασης.

Όμοια, στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται το διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #5.β. Στο Σχήμα 5.10.α φαίνεται η σηματοδότηση του ολικού ελαχίστου του διαγράμματος και στο Σχήμα 5.10.β φαίνεται η σηματοδότηση των δύο σημείων τομής του διαγράμματος με την οριζόντια ευθεία των -10 dB.



(α) Σηματοδότηση απωλειών επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού της κεραίας #5.β



(β) Σηματοδότηση εύρους ζώνης της κεραίας #5.β

Σχήμα 5.10: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #5.β από τον αναλυτή φάσματος

Όπως ήταν αναμενόμενο, η κεραία #5.β έχει όμοια χαρακτηριστικά με τη κεραία #5.α. Συντονίζεται στα 2.357 GHz και οι απώλειες επιστροφής της στη συχνότητα αυτήν είναι -23.8 dB, πολύ χαμηλότερες από την αποδεκτή τιμή των -10 dB, ενώ το SWR είναι 1.14. Το εύρος ζώνης της είναι 43.921 MHz. Και αυτή η κεραία έχει πολύ καλά αποτελέσματα. Στον Πίνακα 5.5 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο ADS, με αυτά των μετρήσεων στον αναλυτή φάσματος.

Πίνακας 5.5: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #5.β

Μέγεθος	Προσομοίωση στο ADS	Μετρήσεις στον αναλυτή φάσματος	Σχετική ποσοστιαία απόκλιση
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	2.39 GHz	2.357 GHz	1.38 %

Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	-28.752 dB	-23.8 dB	17.22 %
Εύρος ζώνης (BW)	40 MHz	43.921 MHz	9.8 %

Παρατηρούνται όμοιες αποκλίσεις με αυτές της προηγούμενης κεραίας, κεραία #5.α. Η συχνότητα συντονισμού μετρήθηκε στα 2.357 GHz, ενώ στην προσομοίωση αυτή ήταν στα 2.39 GHz. Ο συντελεστής ανάκλασης στη συχνότητα αυτή μετρήθηκε στα -23.8 dB, απόκλιση 17.22 % από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Εδώ το εύρος ζώνης που προέκυψε από τις μετρήσεις (43.921 MHz) είναι μεγαλύτερο από αυτό που προέκυψε από τις προσομοιώσεις (40 MHz), με απόκλιση 9.8 %. Στον Πίνακα 5.6 αναγράφονται τα χαρακτηριστικά των δύο κεραίων που κατασκευάστηκαν.

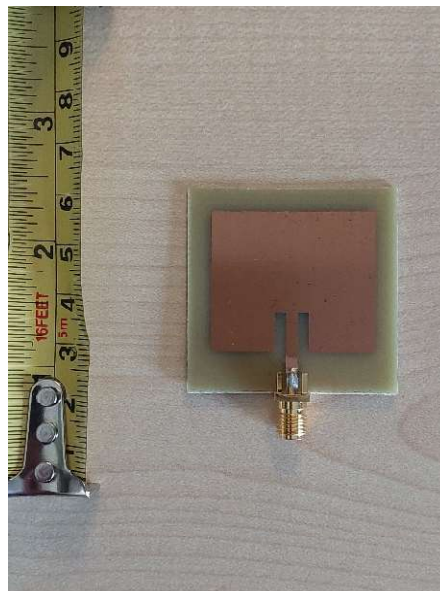
Πίνακας 5.6: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραίων #5.α και #5.β

Μέγεθος	Κεραία #5.α	Κεραία #5.β
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	2.361 GHz	2.357 GHz
Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	-25.4 dB	-23.8 dB
Εύρος ζώνης (BW)	47.508 MHz	43.921 MHz

Τα χαρακτηριστικά των δύο κεραίων διαφέρουν ελάχιστα. Και οι δύο κατασκευές έχουν ικανοποιητικό συντελεστή ανάκλασης στην f_0 . Σύμφωνα με αυτό, συμπεραίνεται πως η φωτοχημική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των κεραίων ικανοποιεί το κριτήριο της επαναληψιμότητας.

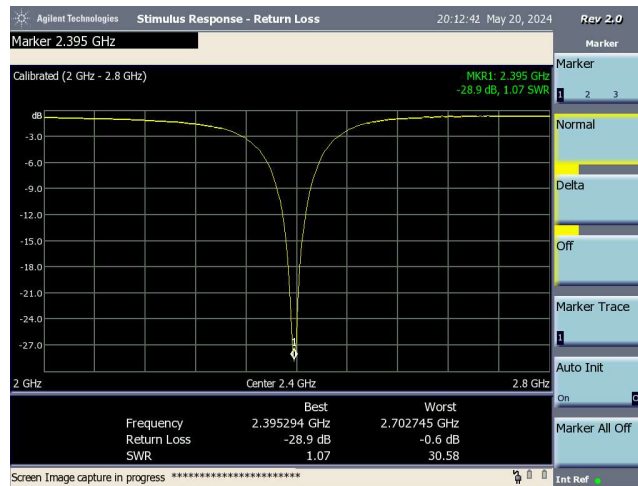
5.3.3 Μετρήσεις κεραίας #6

Η κεραία, της οποίας ο σχεδιασμός θα αναλυθεί στην ενότητα αυτήν, είναι η κεραία #6 (βελτιστοποιημένη κεραία #2), της οποίας η ανάλυση περιεγράφηκε στην ενότητα 4.7. Στο Σχήμα 5.11 εικονίζεται η κεραία #6.

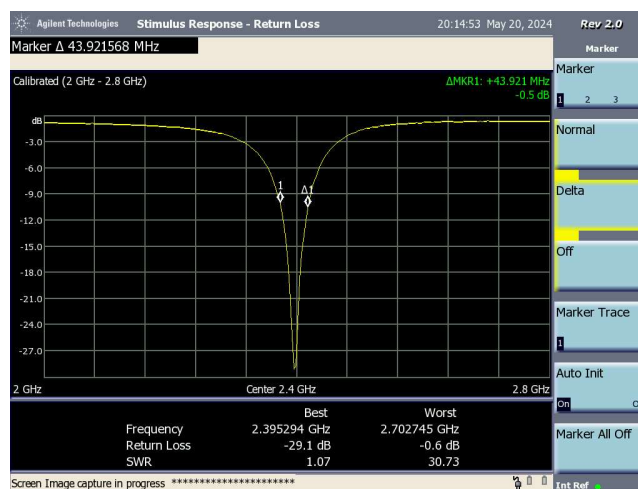


Σχήμα 5.11: Κεραία #6

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας. Στο Σχήμα 5.12.α φαίνεται το ολικό ελάχιστο του διαγράμματος και στο Σχήμα 5.13.β φαίνεται η σηματοδότηση των δύο σημείων τομής του διαγράμματος με την οριζόντια ευθεία των -10 dB. Και εδώ, η κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα είναι 3 dB/div.



(α) Σηματοδότηση απωλειών επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού της κεραίας #6



(β) Σηματοδότηση εύρους ζώνης της κεραίας #6

Σχήμα 5.12: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #6 από τον αναλυτή φάσματος

Η κεραία #6 συντονίζεται στα 2.395 GHz και οι απώλειες επιστροφής της στη συχνότητα αυτήν είναι -28.9 dB, πολύ χαμηλότερες από την αποδεκτή τιμή των -10 dB, ενώ το SWR είναι 1.07. Το εύρος ζώνης της είναι 43.921 MHz. Τα αποτελέσματα αυτής της κεραίας όχι μόνο είναι ικανοποιητικά, αλλά είναι και τα καλύτερα από τις τρεις κεραίες που σχεδιάστηκαν να λειτουργούν στα 2.4 GHz. Στον Πίνακα 5.7 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο ADS, με αυτά των μετρήσεων στον αναλυτή φάσματος.

Πίνακας 5.7: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #6

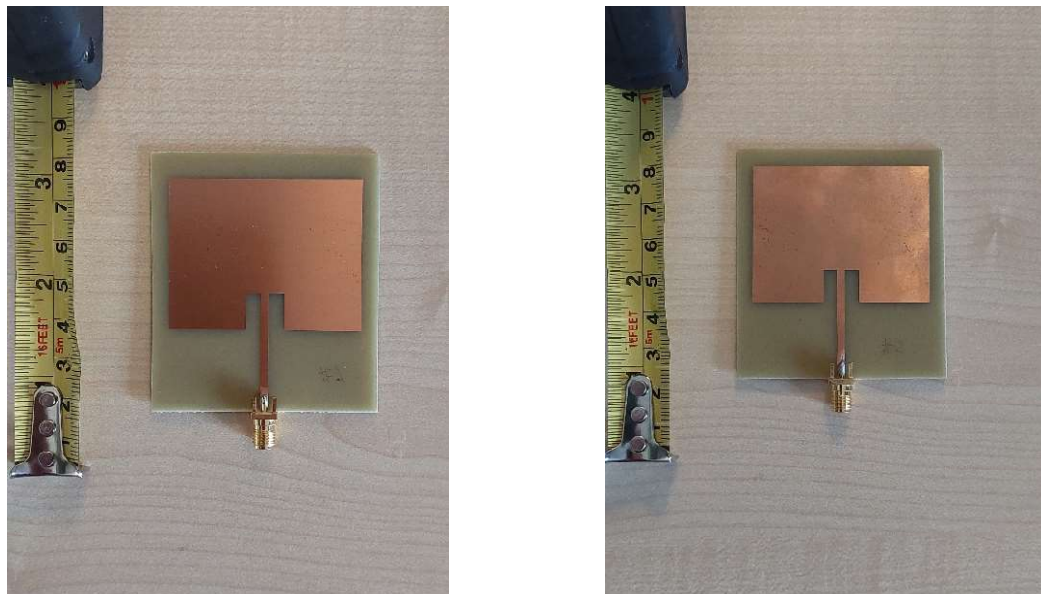
Μέγεθος	Προσομοίωση στο ADS	Μετρήσεις στον αναλυτή φάσματος	Σχετική ποσοστιαία απόκλιση
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	2.42 GHz	2.395 GHz	1.03 %
Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	-26.812 dB	-28.9 dB	7.78 %
Εύρος ζώνης (BW)	40 MHz	43.921 MHz	9.8 %

Η συχνότητα συντονισμού της κεραίας #6 μετρήθηκε στα 2.395 GHz, ενώ στην προσομοίωση αυτή ήταν στα 2.42 GHz. Ο συντελεστής ανάκλασης στη συχνότητα αυτήν μετρήθηκε στα -28.9 dB, απόκλιση 7.78 % από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Εδώ το εύρος ζώνης που προέκυψε από τις μετρήσεις (43.921 MHz) είναι μεγαλύτερο από αυτό που προέκυψε από τις προσομοιώσεις (40 MHz),

με απόκλιση 9.8 %. Αξίζει να σημειωθεί πως η κεραία #6 παρουσιάζει τις μικρότερες αποκλίσεις από τις 3 κεραίες που προορίζονταν για λειτουργία στα 2.4 GHz σε όλα τα χαρακτηριστικά (συχνότητα συντονισμού, απώλειες επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού και εύρος ζώνης) σε σχέση με τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις.

5.3.4 Μετρήσεις κεραίας #7

Η τελευταία κεραία που σχεδιάστηκε σε PCB και που μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της στο εργαστήριο Ασυρμάτων Επικοινωνιών του τμήματος, είναι η κεραία #7 (βελτιστοποιημένη κεραία #3), της οποία η ανάλυση περιγράφεται στην ενότητα 4.8. Η κεραία αυτή σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί στα 1.8 GHz και κατασκευάστηκε σε πλακέτα δύο φορές, σε περίπτωση αποτυχίας εμφάνισης της πλακέτας ή ανεπιτυχής κόλλησης. Στο Σχήμα 5.13 εικονίζονται οι κεραίες #7.α και #7.β.

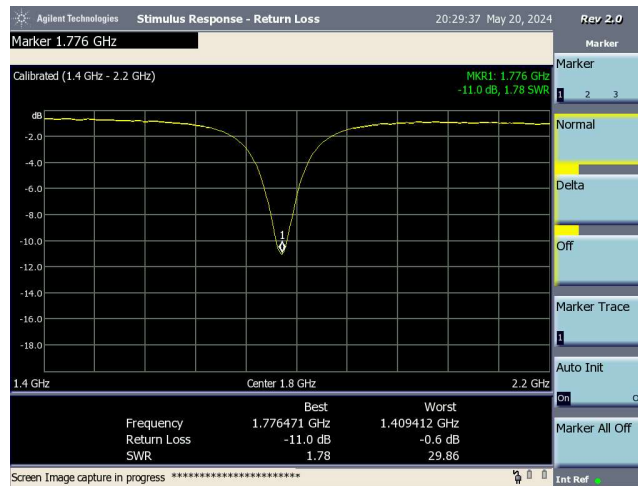


(α)

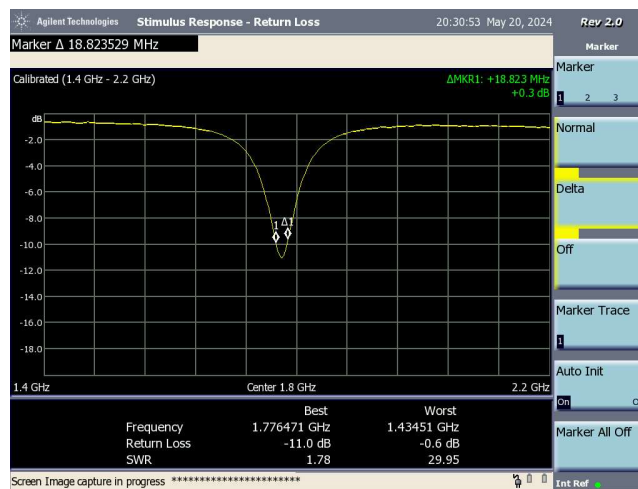
(β)

Σχήμα 5.13: Κεραίες #7, (α) #7.α και (β) #7.β

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #7.α. Στο Σχήμα 5.14.α φαίνεται το ολικό ελάχιστο του διαγράμματος και στο Σχήμα 5.14.β φαίνεται η σηματοδότηση των δύο σημείων τομής του διαγράμματος με την οριζόντια ευθεία των -10 dB. Η κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα εδώ είναι 2 dB/div.



(α) Σηματοδότηση απωλειών επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού της κεραίας #7.α



(β) Σηματοδότηση εύρους ζώνης της κεραίας #7.α

Σχήμα 5.14: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #7.α από τον αναλυτή φάσματος

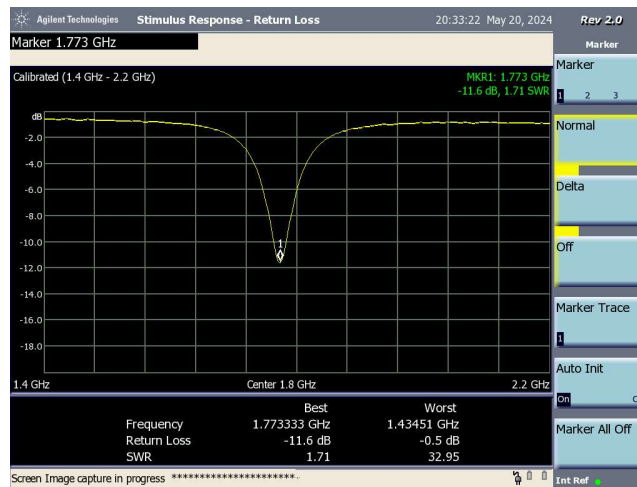
Η κεραία #7.α συντονίζεται στα 1.776 GHz και οι απώλειες επιστροφής της στη συχνότητα αυτήν είναι -11 dB, ενώ το SWR είναι 1.78. Ο συντελεστής ανάκλασης στη συχνότητα συντονισμού αυτής της κεραίας είναι οριακά χαμηλότερος από την αποδεκτή τιμή των -10 dB. Το εύρος ζώνης της είναι 18.823 MHz. Στον Πίνακα 5.8 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο ADS, με αυτά των μετρήσεων στον αναλυτή φάσματος.

Πίνακας 5.8: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #7.α

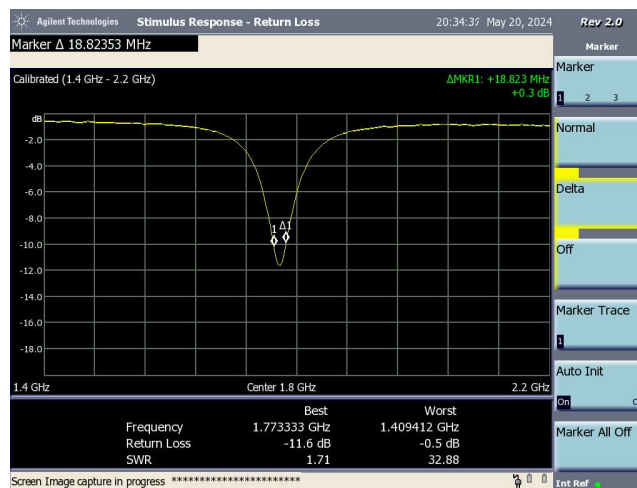
Μέγεθος	Προσομοίωση στο ADS	Μετρήσεις στον αναλυτή φάσματος	Σχετική ποσοστιαία απόκλιση
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	1.795 GHz	1.776 GHz	1.05 %
Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	-17.577 dB	-11 dB	37.4 %
Εύρος ζώνης (BW)	20 MHz	18.823 MHz	5.88 %

Η συχνότητα συντονισμού της κεραίας #7.α μετρήθηκε στα 1.776 GHz, ενώ στην προσομοίωση αυτή ήταν στα 1.795 GHz. Ο συντελεστής ανάκλασης στη συχνότητα αυτήν μετρήθηκε στα -11 dB, απόκλιση 37.4 % από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Εδώ το εύρος ζώνης που προέκυψε από τις μετρήσεις (18.823 MHz) είναι μεγαλύτερο από αυτό που προέκυψε από τις προσομοιώσεις (20 MHz), με απόκλιση 5.88 %.

Ομοίως, στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #7.β. Στο Σχήμα 5.15.α φαίνεται η σηματοδότηση του ολικού ελαχίστου του διαγράμματος και στο Σχήμα 5.15.β φαίνεται η σηματοδότηση των δύο σημείων τομής του διαγράμματος με την οριζόντια ευθεία των -10 dB. Και εδώ η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα είναι 2 dB/div.



(α) Σηματοδότηση απωλειών επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού της κεραίας #7.β



(β) Σηματοδότηση εύρους ζώνης της κεραίας #7.β

Σχήμα 5.15: Διάγραμμα απωλειών επιστροφής της κεραίας #7.β από τον αναλυτή φάσματος

Αναμενόμενα, τα αποτελέσματα της κεραίας #7.β αποκλίνουν ελάχιστα από εκείνα της κεραίας #7.α. Η κεραία συντονίζεται στα 1.773 GHz και οι απώλειες επιστροφής της στη συχνότητα αυτήν είναι -11.6 dB, ελάχιστα χαμηλότερες από την αποδεκτή τιμή των -10 dB, ενώ το SWR είναι 1.71. Το εύρος ζώνης της είναι 18.823 MHz. Στον Πίνακα 5.9 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο ADS, με αυτά των μετρήσεων στον αναλυτή φάσματος.

Πίνακας 5.9: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης της προσομοίωσης και των μετρήσεων της κεραίας #7.β

Μέγεθος	Προσομοίωση στο ADS	Μετρήσεις στον αναλυτή φάσματος	Σχετική ποσοστιαία απόκλιση
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	1.795 GHz	1.773 GHz	1.22 %
Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	-17.577 dB	-11.6 dB	34 %
Εύρος ζώνης (BW)	20 MHz	18.823 MHz	5.88 %

Η συχνότητα συντονισμού της κεραίας #7.β μετρήθηκε στα 1.776 GHz, ενώ στην προσομοίωση αυτή ήταν στα 1.795 GHz. Η ελάχιστη σχετική ποσοστιαία απόκλιση του 1.22 % μπορεί να οφείλεται στο μεγαλύτερο πλήθος δειγμάτων του αναλυτή φάσματος, σε σχέση με αυτό των προσομοιώσεων. Ο συντελεστής ανάκλασης στη συχνότητα αυτήν μετρήθηκε στα -11.6 dB, απόκλιση 34 % από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Εδώ το εύρος ζώνης που προέκυψε από τις μετρήσεις (18.823 MHz) είναι μεγαλύτερο από αυτό που προέκυψε από τις προσομοιώσεις (20 MHz), με απόκλιση 5.88 %. Συμπερασματικά, η κεραία #7 θεωρείται οριακά αποδεκτή. Στον Πίνακα 5.10 αναγράφονται τα χαρακτηριστικά των δύο κεραιών που κατασκευάστηκαν.

Πίνακας 5.10: Σύγκριση συχνότητας συντονισμού, απωλειών επιστροφής και εύρους ζώνης των κεραιών #7.α και #7.β

Μέγεθος	Κεραία #7.α	Κεραία #7.β
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	1.776 GHz	1.773 GHz
Απώλειες επιστροφής (RL) στο f_0	-11 dB	-11.6 dB
Εύρος ζώνης (BW)	18.823 MHz	18.823 MHz

Τα χαρακτηριστικά των δύο κεραιών διαφέρουν ελάχιστα. Μάλιστα, οι αποκλίσεις είναι μικρότερες και από αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 5.6. Εδώ, ο συντελεστής ανάκλασης στην f_0 και στις δύο κατασκευές είναι οριακά αποδεκτός.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας

6.1 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση και ο σχεδιασμός τυπωμένων κεραιών με ένθετη μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας, με σκοπό τη λειτουργία τους στη συχνότητα των 2.4 GHz, αλλά και των 1.8 GHz για λόγους επαναληψιμότητας και περεταίρω εξοικείωσης.

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι θεωρητικοί υπολογισμοί των διαστάσεων των κεραιών, ακολούθησε η ανάλυσή τους μέσω του πακέτου λογισμικού ADS. Εκεί, πέρα από τον αρχικό σχεδιασμό των κεραιών με τρεις διαφορετικές διαδικασίες έγιναν μεταβολές των αρχικών διαστάσεων, με σκοπό την βελτιστοποίηση του συντελεστή ανάκλασης των κεραιών. Παρατηρήθηκε πως τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαφέρουν, όταν οι κεραίες σχεδιάζονται με διαφορετικές μεθοδολογίες. Όσες κεραίες έδειξαν ικανοποιητικά αποτελέσματα κρίθηκαν πως είναι κατάλληλες να κατασκευαστούν σε PCB. Για τις κεραίες που θεωρήθηκαν αποδεκτές για σχεδίαση σε PCB πραγματοποιήθηκε, με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων στο λογισμικό ADS, υπολογισμός των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους. Σημειώνεται ότι η βελτιστοποίηση αφορούσε τις απώλειες επιστροφής στη συχνότητα συντονισμού των κεραιών και όχι τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους.

Κατά την ανάλυση των κεραιών στο πακέτο λογισμικού ADS παρατηρήθηκε πως τα αποτελέσματα που προέκυπταν από την προσομοίωση του διαγράμματος απωλειών επιστροφής ανάλογα με το αν η σχεδίαση είχε πραγματοποιηθεί στο κυκλωματικό σχηματικό ή στο περιβάλλον του layout. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο layout είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα, καθώς συμπεριλαμβάνονται οι επιπρόσθετες αλληλεπιδράσεις με το υλικό του υποστρώματος και, ακόμα, χρησιμοποιούνται αριθμητικές τεχνικές που διαιρούν την διάταξη σε μικρότερα τμήματα. Επίσης, ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις έγιναν και κατά τη διάρκεια των βελτιστοποιήσεων του διαγράμματος απωλειών επιστροφής των κεραιών, στο ADS. Εκεί, παρατηρήθηκε πως οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης του λογισμικού ανταποκρίνονται διαφορετικά στα στοιχεία που έχουν προκύψει από τον απευθείας σχεδιασμό σε layout και στις διατάξεις που προκύπτουν από το σχηματικό. Συγκεκριμένα, το λογισμικό φαίνεται να κατανάλωνε περισσότερους υπολογιστικούς πόρους κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης κεραιών που σχεδιάστηκαν στο layout, πιθανόν λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητάς τους.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τον αναλυτή φάσματος παρουσίασαν, στις περισσότερες περιπτώσεις, ικανοποιητικές αποκλίσεις σε σχέση με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Παρατηρήθηκε ακόμα, πως ενώ τα βέλτιστα αποτελέσματα στις προσομοιώσεις στο ADS προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση της μεθοδολογίας σχεδίασης της κεραίας μέσω του περιβάλλοντος του layout, τα βέλτιστα αποτελέσματα στις μετρήσεις με τον αναλυτή φάσματος παρατηρήθηκαν στην κεραία που σχεδιάστηκε και βελτιστοποιήθηκε με τη διαδικασία εισαγωγής των παραμέτρων A και B. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως συνηθίζεται οι κεραίες μικροταινιας σε αυτές τις συχνότητες να κατασκευάζονται με χαράκτη πλακετών και όχι με φωτοχημικές μεθόδους. Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων στον αναλυτή και των προσομοιώσεων είναι πιθανό να οφείλονται στις ατέλειες κατασκευής σε PCB με φωτοχημικές μεθόδους.

6.2 Σύγκριση με μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία

Η ενότητα αυτή αφιερώνεται στη σύγκριση μεταξύ των κεραιών που αναλύθηκαν και κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας και κάποιων παρόμοιων κεραιών μικροταινιας που παρουσιάζονται στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Σκοπός αυτής της συγκριτικής ανάλυσης είναι

η διερεύνηση της ανταγωνιστικότητας των κεραιών που αναλύθηκαν και σχεδιάστηκαν σε σχέση με άλλες υπάρχουσες και η λεπτομερέστερη κατανόηση της έρευνας στο πεδίο των τυπωμένων κεραιών με ένθετη μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας.

Για τις ανάγκες μίας ολοκληρωμένης και εύστοχης σύγκρισης, επιλέχθηκε ένα σύνολο από τυπωμένες κεραιές με ένθετη μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας, από εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία, που σχεδιάστηκαν για να λειτουργούν στη συχνότητα των 2.4 GHz. Σε ορισμένες από τις μελέτες που επιλέχθηκαν [8, 11, 12, 13] γίνεται αναφορά για ανάλυση και σχεδιασμό κεραιών για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ωστόσο, οι κεραιές της παρούσας εργασίας συγκρίνονται με αυτές της βιβλιογραφίας μόνο ως προς τις απώλειες επιστροφής τους και κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους (κατευθυντικότητα και κέρδος), και όχι ως προς ειδικότερα χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι κεραιές ως προς τον συντελεστή ανάκλασής τους όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις του εκάστοτε πακέτο λογισμικού, που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της κάθε κεραιάς. Ως κεραιά αναφοράς στις συγκρίσεις, θα χρησιμοποιηθεί αυτή με τα βέλτιστα αποτελέσματα του συντελεστή ανάκλασης από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ADS, δηλαδή η κεραιά #5. Αξίζει να σημειωθεί, πως ορισμένες από τις μελέτες που συγκρίνονται έχουν αναλυθεί με άλλα πακέτα λογισμικού κατάλληλα για ανάλυση μικροκυματικών κυκλωμάτων και κεραιών. Στον Πίνακα 6.1 συγκρίνονται οι διαστάσεις των κεραιών της παρούσας εργασίας, με αυτές των μελετών και στον Πίνακα 6.2 συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση των διαστάσεων της κεραιάς #5 με παρόμοιες κεραιές της διεθνούς βιβλιογραφίας

Διάσταση	Κεραιά #5	Κεραιά από [8]	Κεραιά από [11]	Κεραιά από [12]	Κεραιά από [13]
W	37.7 mm	37 mm	29.2 mm	38.04 mm	38 mm
L	29.03 mm	29 mm	29.2 mm	29.42 mm	28.2 mm
W_f	2.2 mm	3 mm	3 mm	3.06 mm	2.7 mm
L_f	23.05 mm	26.21 mm	20 mm	20.02 mm	24.3 mm
$W_{\text{ένθεσης}}$	2.7 mm	3 mm	1.49 mm	3.6 mm	1 mm
$L_{\text{ένθεσης}}$	6.55 mm	8 mm	12.28 mm	9 mm	10.2 mm

Πίνακας 6.2: Σύγκριση των χαρακτηριστικών της κεραιάς #5 με παρόμοιες κεραιές της διεθνούς βιβλιογραφίας

Μέγεθος	Κεραιά #5	Κεραιά από [8]	Κεραιά από [11]	Κεραιά από [12]	Κεραιά από [13]
Συχνότητα συντονισμού (f_0)	2.39 GHz	2.4 GHz	2.399 GHz	2.42 GHz	2.44 GHz
Απώλειες επιστροφής (RL) στην f_0	-28.7 dB	-15.3 dB	-36.6 dB	-25 dB	-16 dB
Κατευθυντικότητα (D)	6.312 dBi	6.288 dBi	6.285 dBi	5.93 dBi	7.04 dBi
Κέρδος (G)	3.178 dBi	5.21 dBi	4.65 dBi	4.68 dBi	3 dBi
Λόγος απόδοσης ακτινοβολίας	48.6 %	78 %	68.65 %	86.8 %	83.3 %

Αρχικά, παρατηρείται πως οι διαστάσεις των κεραιών διαφέρουν ελάχιστα. Εξαιρέση αποτελεί η κεραιά από την [11], της οποίας η ενεργή επιφάνεια είναι τετράγωνη και όχι ορθογώνια. Τα W και L της δηλαδή είναι ίσα. Επίσης, η συχνότητα συντονισμού f_0 όλων των κεραιών που προκύπτει από τις προσομοιώσεις διαφέρει ελάχιστα. Διαφορά ωστόσο υπάρχει στις απώλειες επιστροφής (RL) στην f_0 , καθώς το μέγεθος αυτό φαίνεται να έχει τιμές από -15.3 dB στην [8], μέχρι -36.6 dB [11]. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι πιθανόν να οφείλονται στις διαφορετικές ρυθμίσεις της προσομοίωσης κάθε κεραιάς. Συγκεκριμένα, μπορεί να διαφέρουν οι επαναλήψεις που θα πραγματοποιηθεί η

βελτιστοποίηση, οι διαστάσεις που θα μεταβληθούν, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης ή και το τελικό σφάλμα της βελτιστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτιστοποιημένη κεραία #1 της παρούσας εργασίας, έχει τη δεύτερη καλύτερη τιμή RL στη συχνότητα συντονισμού της, στα -28.8dB. Παρατηρείται ακόμα, πως οι τιμές της κατευθυντικότητας όλων των κεραιών που εξετάζονται, συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας, στην f_0 βρίσκονται στα αναμενόμενα όρια των 6 – 7 dBi. Το κέρδος των κεραιών που συγκρίνονται κυμαίνεται από 3 έως 5dBi περίπου, με την παρούσα κεραία να βρίσκεται επίσης μέσα στο προαναφερθέν διάστημα, έστω και πιο κοντά στο κάτω όριό του. Ο λόγος απόδοσης ακτινοβολίας των κεραιών φαίνεται να αποκλίνει μεταξύ των κεραιών. Συγκεκριμένα, ο λόγος απόδοσης ακτινοβολίας της παρούσας κεραίας είναι ο χαμηλότερος (48.6 %), ενώ αυτός της κεραίας από την [12] είναι ο μεγαλύτερος (86.8 %).

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η προσπάθεια που έγινε στην εργασία αυτή για σχεδίαση και κατασκευή κεραίας μικροταινίας στα 2.4GHz με ένθετη γραμμή τροφοδοσίας μπορεί να κριθεί επιτυχής. Η κεραία παρουσιάζει ελκυστικά χαρακτηριστικά και μπορεί να θεωρηθεί ανταγωνιστική σε σχέση με αυτές που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία ακόμα και πολύ πρόσφατα [12, 13].

6.3 Μελλοντική έρευνα

Λόγω της πληθώρας των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι κεραίες μικροταινίας, αυτές συναντώνται σε μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, όπως στη διαστημική τηλεπισκόπηση, στη βιοϊατρική τεχνολογία, αλλά κυρίως σε συστήματα ασυρμάτων δικτύων και κινητών επικοινωνιών. Η περεταίρω αξιοποίηση όλων των θετικών χαρακτηριστικών των κεραιών μικροταινίας, αποτελεί ένα σημαντικό κίνητρο να συνεχιστεί η μελέτη επάνω σε αυτές.

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν, κυρίως, η ικανοποιητική απόδοση της κεραίας ως προς τον συντελεστή ανάκλασής της, το οποίο, κρίνοντας από τα περιεχόμενα των κεφαλαίων 4 και 5, επετεύχθη. Ωστόσο, μελλοντικά μπορεί να γίνει προσπάθεια βελτιστοποίησης των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας του μακρινού πεδίου της κεραίας και η μέτρησή τους σε ανηχοϊκό θάλαμο. Επιπλέον, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μελέτη σχετικά με την πόλωση των κεραιών μικροταινίας, κάτι που δεν απασχόλησε καθόλου την εργασία αυτή. Θα ήταν ενδιαφέρον να γίνει προσπάθεια υλοποίησης κεραίας που λαμβάνει ή εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα συγκεκριμένης πόλωσης ή κεραίας επαναπροσδιοριζόμενης πόλωσης. Ο επαναπροσδιορισμός και άλλων χαρακτηριστικών ακτινοβολίας, όπως η κατευθυντικότητα και το κέρδος, θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει αντικείμενο μιας μελλοντικής εργασίας. Ακόμα, η μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί και στην ενσωμάτωση της κεραίας μικροταινίας σε άλλα μικροκυματικά τυπωμένα κυκλώματα, με την απαίτηση η κεραία να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C.A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [2] Κωττής Παναγιώτης Γ. και Αράπογλου Παντελής-Δανιήλ Μ., *Ασύρματες Επικοινωνίες*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2021
- [3] Τραϊανός Β. Γιούλτσης και Εμμανουήλ Ε. Κριεζής, *Μικροκύματα - Θεωρία και Εφαρμογές*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.
- [4] James R. James *Handbook of Microstrip Antennas Volume I*, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1989.
- [5] Y. Huang, K. Boyle, *Antennas: From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [6] S. N. Mahmood, A. J. Ishak, A. Ismail, A. C. Soh, Z. Zakaria and S. Alani, "ON-OFF Body Ultra-Wideband (UWB) Antenna for Wireless Body Area Networks (WBAN): A Review," 2020 in IEEE Access, vol. 8, pp. 150844-150863.
- [7] U. Musa et al., "Recent Advancement of Wearable Reconfigurable Antenna Technologies: A Review," 2022 in IEEE Access, vol. 10, pp. 121831-121863.
- [8] S. R. Mohd Zaini and K. N. Abdul Rani, "Wearable Inset-Fed FR-4 Microstrip Patch Antenna Design", presented at IOP Conference Series: Material Science and Engineering, vol. 318, 2018.
- [9] Jain, Apoorva. "Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna for Wi-Fi." *International Journal of Engineering and Computer Science* 5, 2016.
- [10] Wahab, N. & Maslan, Zulkifli & W Muhamad, Wan & Hamzah, Norhayati, "Microstrip Rectangular 4x1 Patch Array Antenna at 2.5GHz for WiMax Application", 2010, presented at Second International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, CICSyN, pp.164-168.
- [11] S. B. Patil, R. D. Kanphade and V. V. Ratnaparkhi, "Design and performance analysis of inset feed microstrip square patch antenna for 2.4GHz wireless applications", 2015, presented at 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), Coimbatore, India, pp. 1194-1200.
- [12] N. B and P. K R, "Design and Analysis of 2.4GHz Rectangular Inset fed Microstrip Patch Antenna for Wi-Fi and WLAN Applications", 2021 presented at Smart Technologies, Communication and Robotics (STCR), Sathyamangalam, India, 2021, pp. 1-4.
- [13] I.F.J Jahani, K.F Joofa, I.S.F Zeena, "Design of an Inset Feed Rectangular Microstrip Patch Antenna", 2021 presented at IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), Penang, Malaysia, pp. 1-4.
- [14] F.T. Ulaby, E. Michielssen and U. Ravaioli, *Fundamentals of Applied Electromagnetics (6th ed.)*, Pearson, 2010.
- [15] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder J. Bahl, A. Ittipiboon *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, 2001.
- [16] Varshney, Hemant Kumar, Mukesh Kumar, Rohini Saxena and Komal Jaiswal. "A Survey on Different Feeding Techniques of Rectangular Microstrip Patch Antenna.", *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol.4, no.3, June 2014.

- [17] Abdulhussein, Alaa & Khidhir, Ali & Naser, Ahmed. "Design and Implementation of Microstrip Patch Antenna Using Inset Feed Technique for 2.4 GHz Applications". *International Journal of Microwave and Optical Technology*, vol. 16, pp. 355-361, 2021.
- [18] Sharma, Manvinder & Sharma, Bikramjit & Gupta, Anuj & Singla, Bhim, "Design of 7 GHz Microstrip Patch Antenna for Satellite IoT- and IoE-Based Devices", 2021, *Recent Innovations in Computing, Proceedings of ICRIC 2020*, pp.627-637.
- [19] Bungard, "Original Bungard presensitized base material FR4", FR4 Technical Data, 2021.
- [20] J. Wang, X. -S. Yang, X. Ding and B. -Z. Wang, "Antenna Radiation Characteristics Optimization by a Hybrid Topological Method," 2017 in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 6, pp. 2843-2854.