

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Έλεγχος της λειτουργίας σύγχρονων κεραιών με
τη χρήση μεταλλικών**

της

Ευδοξίας Γ. Μαγανοπούλου

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Θεόδωρος Ζυγκιρίδης

Κοζάνη, Ιούλιος 2016

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Έλεγχος της λειτουργίας σύγχρονων κεραιών με
τη χρήση μεταϋλικών**

της

Ευδοξίας Γ. Μαγγανοπούλου

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Θεόδωρος Ζυγκιρίδης

Εξεταστική Επιτροπή

Επίκουρος Καθηγητής: Δρ. Θεόδωρος Ζυγκιρίδης

Επίκουρος Καθηγητής: Δρ. Παναγιώτης Σαρηγιαννίδης

Κοζάνη, Ιούλιος 2016

Μαγγανοπούλου Γ. Ευδοξία,

Προπτυχιακή Φοιτήτρια Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Copyright © Ευδοξία Γ. Μαγγανοπούλου, 2016

Επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτική Μακεδονίας.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος της λειτουργίας των σύγχρονων κεραιών με τη χρήση μεταϋλικών. Τα μεταϋλικά (metamaterials) ή αλλιώς αριστερόστροφα υλικά κατασκευάζονται από τον άνθρωπο με σκοπό να φέρουν κάποιες επιθυμητές ιδιότητες, οι οποίες δεν μπορούν να βρεθούν στη φύση.

Η εισαγωγή των μεταϋλικών στις σύγχρονες κεραιές δύναται να βελτιώσει σημαντικά τον τρόπο λειτουργίας τους με την ελάττωση της συχνότητας συντονισμού, τη διεύρυνση του εύρους ζώνης ή την αύξηση του κέρδους και της απόδοσής τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν πολλές προσομοιώσεις κεραιών, ελέγχθηκαν πιθανές μεταβολές στον τρόπο λειτουργίας τους με την προσθήκη διατάξεων μεταϋλικών και εξετάστηκε η επίδραση της αλλαγής της γεωμετρίας, του αριθμού, καθώς και της χωρικής τοποθέτησης τους στο τελικό αποτέλεσμα.

Στο πρώτο κεφάλαιο, ξεκινάμε με μια σύντομη εισαγωγή στις κεραιές και τα είδη τους. Ακολουθεί μια συνοπτική αναφορά για τα μεταϋλικά και έπεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση διάφορων επιστημονικών μελετών για την επίδραση των μεταϋλικών στις σύγχρονες κεραιές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αφού δοθεί το θεωρητικό υπόβαθρο των μεταϋλικών, προσδιορίζονται πλήρως τα είδη και οι τύποι τους. Έπειτα, αναλύονται οι ιδιότητες τους και παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εφαρμογές τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται ο σχεδιασμός των κεραιών που μελετήσαμε και οι προσομοιώσεις που υλοποιήσαμε, με σκοπό τον έλεγχο λειτουργίας τους με την επίδραση των μεταϋλικών. Μελετούμε τη μεταβολή στη συμπεριφορά μιας κεραιάς που βασίζεται στην απλή μονοπολική κεραιά, υπό την επίδραση των μεταϋλικών. Ακολουθεί ο έλεγχος της επίδρασης του αριθμού και της τοποθεσίας των διατάξεων των μεταϋλικών σε μια κεραιά μικροταινίας. Κατόπιν, διερευνάται η επιρροή που ασκεί η ενσωμάτωση ενός συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) και ενός ανοιχτού συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (OCSRR) σε μια μονοπολική κεραιά. Στο πλαίσιο της έρευνας μας βελτιώνουμε τη συμπεριφορά των κεραιών που προαναφέραμε με την ενσωμάτωση δυο διατάξεων μεταϋλικών στην πίσω όψη του υποστρώματος των κεραιών και την προσθήκη ενός επιπλέον υποστρώματος. Τέλος, ασχολούμαστε με την επίδραση των αριστερόστροφων υλικών σε ένα σύστημα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (MIMO).

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διπλωματική εργασία και προτείνονται κατευθύνσεις προς τις οποίες μπορεί να επεκταθεί η παρούσα εργασία.

Λέξεις Κλειδιά: μεταϋλικά, αρνητικός δείκτης διάθλασης, συντονισμός, κατευθυντικότητα, ακτινοβολία, κεραιές

Abstract

The main purpose of this diploma thesis is to control the operation of modern antennas using metamaterials. Metamaterials or else left-handed materials have been manufactured in order to have some desirable properties which cannot be found in nature.

The introduction of metamaterials in modern antennas can significantly improve the way that they operate. Their inclusion can improve the frequency that an antenna is tuned, to widen the range of the operational domain and to increase the gain and performance.

As part of this thesis, several antenna simulations were performed. Furthermore, some possible changes in the operation mode with the addition of metamaterials provisions and the effect of changing their geometry, number, and location in the final result were controlled.

In the first chapter, we begin with a brief introduction to the antennas and their types. Then, a concise report on metamaterials and a literature review of important scientific studies on the effects of metamaterials on modern antennas were mentioned.

In the second chapter, after the theoretical background of metamaterials, we define their type. Then, we analyze their properties and present the most important applications.

In the third chapter, we describe the designs of the antennas that we have studied and the simulations that have been implemented for the purpose of controlling the effects of metamaterials on modern antennas. We study the change in the behavior of an antenna that is based on the simple unipolar antenna under the influence of metamaterials. Thereafter, we control the effect of the number and location of metamaterial's on a microstrip antenna. Then, we explore the influence of the incorporation of a complementary split ring resonator (CSRR) and an open complementary split ring resonator (OCSRR) in a monopolar antenna. In our research, we improve the behavior of the antennas mentioned above by incorporating metamaterials on the back of the antenna's substrate and the addition of another substrate. Finally, we deal with the influence of left-handed materials in a multiple input multiple output system (MIMO).

The fourth chapter presents the conclusions that have been reached by the completion of the thesis and we suggest directions that can extend this work.

Keywords: metamaterials, negative refractive index, coordination, directivity, radiation, antennas

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί κατακλείδα της φοίτησης μου στο τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών της πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, δόθηκαν τα απαραίτητα εφόδια για την περαιτέρω πορεία μου στον επαγγελματικό τομέα και συνέβαλαν στην εν γένει διαμόρφωση του χαρακτήρα μου και της αντίληψής μου.

Οι μήνες που εργάστηκα για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, ήταν πολύ διδακτικοί και εποικοδομητικοί. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Θεόδωρο Ζυγκιρίδη που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με μια νέα περιοχή έρευνας, καθώς επίσης για το χρόνο που αφιέρωσε και τις πολύτιμες συμβουλές και επισημάνσεις του κατά τη διάρκεια συγγραφής αυτής της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου εκτίμηση στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη. Πολλές ευχαριστίες πρέπει να αποδοθούν και στη Μονάδα ΗΜ Εφαρμογών και Υπολογισμών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για τις όμορφες και έντονες στιγμές που περάσαμε πέντε χρόνια στην Κοζάνη.

Τέλος, τις θερμότερες ευχαριστίες θα ήθελα να τις εκφράσω προς τους γονείς μου Γεώργιο και Αγγελική και τον αδελφό μου Πέτρο για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και την ενθάρρυνση και εμπιστοσύνη που μου επέδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και την ακλόνητη πίστη τους στην ορθή διεκπεραίωση της.

Μαγγανοπούλου Γ. Ευδοξία,
Κοζάνη, Ιούλιος 2016

Αφιερώνεται στους γονείς μου

Συντομογραφίες

SRR (Split Ring Resonator): Συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου

CSRR (Complementary Split Ring Resonator): Συμπληρωματικός συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου

OCSRR (Open Complementary Split Ring Resonator): Ανοιχτός Συμπληρωματικός συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου

MIMO (Multiple Input Multiple Output System): Σύστημα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων

WLAN (Wireless Local Area Network): Ασύρματα τοπικά δίκτυα

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access): Παγκόσμια διαλειτουργικότητα για πρόσβαση των μικροκυμάτων

CPW (Coplanar Wave Guide): Ομοεπίπεδος Κυματοδηγός

GSM (Global System for Mobile communications): Παγκόσμιο σύστημα κινητής τηλεφωνίας

VSWR (Voltage Standing Wave Ratio): Λόγος τάσεων στάσιμου κύματος

SNG (Single Negative): Μονό αρνητικό

DNG (Double Negative): Διπλό αρνητικό

DPS (Double Positive): Διπλό θετικό

ENG (Epsilon Negative): Αρνητική διηλεκτρική σταθερά

MNG (Mu Negative): Αρνητική μαγνητική διαπερατότητα

ENG (Electromagnetic Band Gap): Ηλεκτρομαγνητικό διακενό ζώνης

WiFi (Wireless Fidelity): Ασύρματη πιστότητα

LHM (Left Handed Materials): Αριστερόστροφα υλικά

FDTD (Finite Difference Time Domain): Πεπερασμένες διαφορές στο πεδίο του χρόνου

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	14
1. Εισαγωγή	14
1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	16
1.1.1 Μικρές Ηλεκτρικές Κεραίες με Συντονιστές Διακεκομμένου Δακτυλίου	16
1.1.2 Κεραία Μικροταινίας με Περιοδικά Διατεταγμένους Συντονιστές Διακεκομμένου Δακτυλίου στο Υπόστρωμα	16
1.1.3 Αποτελεσματική Απομόνωση Ηλεκτρικά Μικρών Μονοπολικών Κεραίων με Διατάξεις Μεταϋλικών	17
1.1.4 Κεραία με Μεταϋλικά με Μειωμένους Κινδύνους Ακτινοβολίας για το Κεφάλι	17
1.1.5 Μικρή Κεραία Πολλαπλών Συχνοτήτων με Μεταϋλικά για WLAN / WIMAX Εφαρμογές.....	17
1.1.6 Αμοιβαία Σύζευξη μεταξύ Παρασιτικών Στοιχείων Διακεκομμένων Δακτυλίων Συντονιστών σε Κεραία	18
1.1.7 Κεραία Μικροταινίας Ευρείας Ζώνης και Υψηλού Κέρδους.....	18
1.1.8 Δίπολο με Υπόστρωμα Μεταϋλικών για Υψηλό Κέρδος.....	18
1.1.9 Σχεδιασμός και Συγκριτική Ανάλυση μιας Κεραίας Μεταϋλικών με Σχισμές και Κάλυμμα Μεταϋλικού	19
1.1.10 Μελέτη Κυκλικής Στοιχειοκεραίας Υψηλού Κέρδους με Δομή Μεταϋλικών	19
1.1.11 Σχεδιασμός και Κατασκευή μιας Μικρής Κεραίας Μικροταινίας που περιέχει DNG Μεταϋλικά.....	19
1.1.12 Αρνητικό Διηλεκτρικό Μεταϋλικό Ευρείας Ζώνης για Μείωση του Μεγέθους του Φίλτρου σε Εφαρμογές Κεραίων	20
1.1.13 Σχεδιασμός Κεραίας με τη Χρήση Μεταϋλικών για Λειτουργία σε Πολλαπλές Ζώνες Συχνοτήτων.....	20
1.2 Στόχος και περιεχόμενο της εργασίας	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	21
2. Εισαγωγή	21
2.1 Ιστορική Αναδρομή	21
2.2 Κατηγοριοποίηση υλικών.....	22
2.3 Ηλεκτρομαγνητικά Μεταϋλικά	23
2.4 Ιδιότητες μεταϋλικών	26
2.4.1 Αριστερόστροφα Υλικά	27
2.4.2 Αντιστροφή Νόμου Snell	27
2.4.3 Αντιστροφή του φαινομένου Doppler	29
2.5 Βασικοί Τύποι Μεταϋλικών.....	30

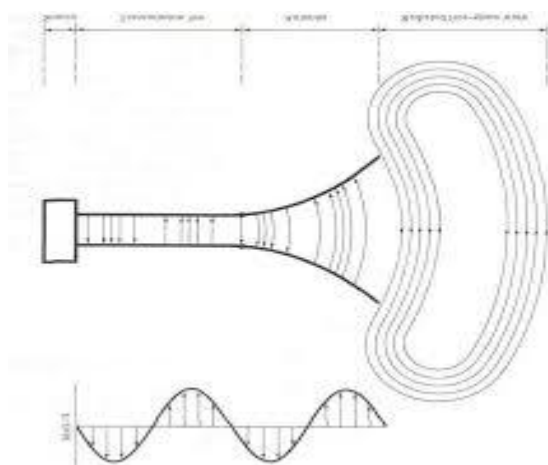
2.5.1 ENG μεταϊλικό από λεπτούς αγωγούς	30
2.5.2 MNG μεταϊλικό με SRRs	31
2.5.3 DNG μεταϊλικό με λεπτούς αγωγούς και SRRs.....	32
2.6 Εφαρμογές Μεταϊλικών	33
2.6.1 Τέλειος φακός Pendry	33
2.6.2 Κεραίες μεταϊλικών και μικροκυματικά φίλτρα	34
2.6.3 Μανδύας αορατότητας	34
2.6.4 Τεχνικές Σκέδασης.....	36
2.7 Υπολογιστική μοντελοποίηση διατάξεων	38
2.7.1 Αριθμητικές μέθοδοι στα μεταϊλικά	38
2.7.2 Μέθοδος FDTD	38
2.7.3 Μέθοδος FDTD τριών διαστάσεων	39
2.7.4 Εφαρμογή της μεθόδου FDTD στις εξισώσεις Maxwell.....	40
2.7.5 Συνοριακές Συνθήκες Απορρόφησης	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	44
3.1 Μικρή ηλεκτρικά κεραία - Ανάλυση κεραίας.....	44
3.1.2 Διάγραμμα ακτινοβολίας	45
3.1.1 Κεραία με υπόστρωμα μεταϊλικών	46
3.1.3 Κεραία με τροποποιημένη γεωμετρία υποστρώματος και μεταϊλικών	49
3.1.4 Κεραία με δυο υποστρώματα μεταϊλικών	52
3.2 Κεραία Μικροταινίας	54
3.2.1 Κεραία με υπόστρωμα μεταϊλικών	55
3.2.2 Υπόστρωμα με 4 διατάξεις μεταϊλικών.....	56
3.2.3 Υπόστρωμα με 9 διατάξεις μεταϊλικών.....	58
3.2.4 Υπόστρωμα με 16 διατάξεις μεταϊλικών.....	59
3.2.5 Υπόστρωμα με 25 διατάξεις μεταϊλικών.....	62
3.2.6 Υπόστρωμα με 36 διατάξεις μεταϊλικών.....	63
3.2.7 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	65
3.3 Κεραία με τυπωμένες διατάξεις μεταϊλικών	66
3.3.1 Κεραία με 3 τυπωμένες διατάξεις μεταϊλικών	66
3.3.2 Κεραία με 6 τυπωμένες διατάξεις μεταϊλικών	67
3.3.3 Κεραία με 15 τυπωμένες διατάξεις μεταϊλικών	68
3.3.4 Κεραία με 18 τυπωμένες διατάξεις μεταϊλικών	70
3.3.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	71

3.4 Επίδραση μεταϋλικών σε μονοπολική κεραία.....	72
3.4.1 Μονοπολική κεραία	72
3.4.2 Μονοπολική κεραία με συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου..	74
3.4.3 Μονοπολική κεραία με ανοιχτό συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου	77
3.4.4 Στοιχειοκεραία ΜΙΜΟ για ελάττωση της αμοιβαίας σύζευξης	79
3.5 Μονοπολική κεραία με υπόστρωμα μεταϋλικών	81
3.5.1 Μονόπολο με υπόστρωμα μεταϋλικών	82
3.5.2 Μονοπολική κεραία με συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου και υπόστρωμα μεταϋλικών	84
3.5.3 Μονοπολική κεραία με ανοιχτό συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου και υπόστρωμα μεταϋλικών	87
3.6 Επίδραση μεταϋλικών σε κυκλική κεραία μικροταινίας.....	90
3.6.1 Μονοπολική κεραία με κυκλική μεταλλική ταινία	90
3.6.2 Μονοπολική κεραία με κυκλική μεταλλική ταινία και συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου	93
3.6.3 Μονοπολική κεραία με κυκλική μεταλλική ταινία και ανοιχτό συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου	96
3.6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	99
4.1 Μονοπολική κεραία με κυκλική μεταλλική ταινία και συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου – Αποτελέσματα μετρήσεων	99
4.2 Μέτρηση απώλειας επιστροφής.....	99
4.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων μέτρησης και προσομοίωσης.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	101
5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων.....	101
5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με τις εκδόσεις του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) σχετικά με την τυποποίηση ορισμών και όρων που αφορούν τις κεραιές, η κεραιά ορίζεται ως "ένα μέσο εκπομπής ή λήψης ακτινοβολίας" [37]. Ουσιαστικά, η κεραιά είναι μια μεταβατική διάταξη ανάμεσα στον ελεύθερο χώρο και μια διάταξη κυματοδότησης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.1. Η διάταξη της κυματοδότησης μπορεί να είναι μια ομοαξονική γραμμή ή ένας κυματοδηγός που μεταφέρει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από την πηγή μετάδοσης στην κεραιά ή από την κεραιά στο δέκτη. Στην πρώτη περίπτωση η κεραιά καλείται εκπομπής, ενώ στη δεύτερη λήψης.

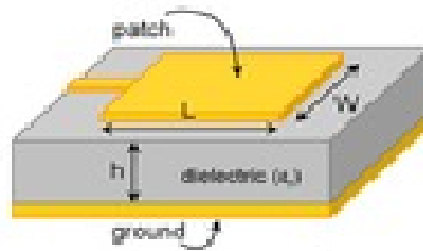


Εικόνα 1.1: Η κεραιά ως μεταβατική διάταξη [38].

Υπάρχουν ποικίλα είδη κεραιών, εκ των οποίων τα πιο σημαντικά αναφέρονται συνοπτικά στη συνέχεια.

- **Κεραιές σύρματος:** Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες. Υπάρχουν πολλοί τύποι τέτοιων κεραιών, όπως το δίπολο, ο βρόχος, η ελικοειδής.
- **Κεραιές ανοίγματος:** Η χρήση τους διευρύνεται όλο και περισσότερο, χάρη στη διαρκή αύξηση της συχνότητας λειτουργίας τους. Το συγκεκριμένο είδος κεραιάς χρησιμοποιείται κατά κόρον σε αεροσκάφη και σε διαστημόπλοια.
- **Κεραιές μικροταινίας:** Οι μικροταινιακές κεραιές χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές για διαστημόπλοια, δορυφόρους, πυραύλους όπου το μέγεθος, το βάρος, η απόδοση, η ευκολία εγκατάστασης και η αεροδυναμική συμπεριφορά είναι απαραίτητα. Προτάθηκαν για πρώτη φορά το 1950, αλλά το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τους, ξεκίνησε το 1970. Μια μικροταινιακή κεραιά στην απλούστερη μορφή της, αποτελείται από μια πολύ λεπτή μεταλλική ταινία (patch) που τοποθετείται σε ύψος h πάνω από το επίπεδο γείωσης. Η μεταλλική ταινία (ακτινοβολούσα επιφάνεια) και το επίπεδο γείωσης χωρίζονται από μια διηλεκτρική επιφάνεια, που καλείται υπόστρωμα (substrate). Υπάρχουν πολυάριθμα υποστρώματα που μπορούν να

χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό μικροταινιακών κεραιών και η διηλεκτρική τους σταθερά κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των τιμών $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Για την καλύτερη απόδοση των κεραιών χρησιμοποιούνται παχιά υποστρώματα των οποίων η διηλεκτρική σταθερά είναι στο χαμηλότερο άκρο του εύρους που προαναφέραμε, διότι μπορούν να παρέχουν καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζεται η βασική δομή μιας μικροταινιακής κεραίας.



Εικόνα 1.2: Μικροταινιακή κεραία. [39].

- **Στοιχειοκεραίες:** Όταν ένα στοιχείο ακτινοβολίας δεν επαρκεί για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών, χρησιμοποιούνται ομάδες τέτοιων στοιχείων που διασυνδέονται με ένα συγκεκριμένο ηλεκτρικό ή γεωμετρικό τρόπο (στοιχειοκεραία).
- **Κεραίες ανακλαστήρα:** Ο τύπος αυτών των κεραιών μπορεί, μεταξύ άλλων, να εκπέμπει και να λαμβάνει σήματα που ταξιδεύουν εκατομμύρια χιλιόμετρα και επιτυγχάνει υψηλές απολαβές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις.

Τα τεχνολογικά επιτεύγματα της εποχής, καθώς και η ανάγκη για συνεχή ανάπτυξη και εξέλιξη ώθησαν τον άνθρωπο στην επεξεργασία της ύλης και στην παροχή ιδιοτήτων που ο ίδιος επιθυμεί μέσω των επονομαζόμενων μεταύλικών. Τα μεταύλικά (metamaterials) ή αλλιώς αριστερόστροφα υλικά εμφανίζουν ταυτόχρονα αρνητικές τιμές των καταστατικών τους παραμέτρων ϵ και μ σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση χαρακτηριστικών, όπως αρνητικός δείκτης διάθλασης, αντιστροφή του φαινομένου Doppler και το γεγονός ότι η ταχύτητα φάσης και η ταχύτητα ομάδας έχουν αντίθετες κατευθύνσεις. Την ιδέα για την πιθανή ύπαρξη τους τη συνέλαβε ο ρώσος φυσικός Victor Veselago το 1964. Λίγα χρόνια αργότερα, ο John Pendry διαπίστωσε ότι με την ορθή διάταξη των κοινών αγωγίμων υλικών, θα ήταν δυνατή η αντιστροφή του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου. Την επόμενη χρονιά, οι Smith και Schultz κατασκεύασαν το μεταύλικό. Οι εφαρμογές των μεταύλικών εκτείνονται σε ένα μεγάλο εύρος δραστηριοτήτων. Καθοριστικός είναι ο ρόλος τους στη βελτίωση του τρόπου λειτουργίας των κεραιών, στην ελάττωση της ακτινοβολίας που εκπέμπουν και στη σημαντική μείωση του μεγέθους τους.

1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται μια σύντομη βιβλιογραφική αναφορά σε ποικίλες επιστημονικές μελέτες που έχουν υλοποιηθεί στον τομέα της επίδρασης των μεταλλικών στη λειτουργία των σύγχρονων κεραιών. Μέσω αυτής της ανασκόπησης θα διαπιστωθεί η έντονη ενασχόληση της επιστημονικής κοινότητας για τη ραγδαία και συνεχή εξέλιξη των μεταλλικών κατά την τελευταία δεκαπενταετία.

1.1.1 Μικρές Ηλεκτρικές Κεραίες με Συντονιστές Διακεκομμένου Δακτυλίου

Η επιστημονική μελέτη με τίτλο «Electrically Small Split Ring Resonator Antennas» [4], διερευνά την επίδραση της γεωμετρίας των μεταλλικών στη συμπεριφορά των μικρών, ηλεκτρικά, κεραιών (Electrically Small Antennas). Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου άρθρου, προσομοιώθηκαν δυο μικρές σε μέγεθος κεραίες με ίδια ακτίνα δακτυλίου, αλλά ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία μεταλλικών. Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων, διαπιστώθηκε ότι ενώ τα διαγράμματα ακτινοβολίας ήταν όμοια, η απόδοση έκαστης κεραίας ήταν διαφορετική. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η παρουσία των μεταλλικών έχει άμεση επιρροή στην τιμή της συχνότητας συντονισμού, καθώς και στην απόδοση μιας κεραίας, δίνοντας τη δυνατότητα βελτίωσης κατά 40%. Μετά από πειράματα, διαπιστώθηκε ότι με τη συνεχή μείωση της συχνότητας συντονισμού του συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (SRR) ελαττώνεται και το κέρδος, με αποτέλεσμα να απαιτείται εκτίμηση του ορίου της μεθόδου που χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των διαστάσεων της κεραίας. Καταληκτικά, η ύπαρξη των μεταλλικών διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη των σύγχρονων ηλεκτρικών κεραιών. Τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης μελέτης δύνανται να εφαρμοστούν σε μελλοντικά ασύρματα συστήματα και στην ανάπτυξη σύγχρονων κατευθυντικών κεραιών.

1.1.2 Κεραία Μικροταινίας με Περιοδικά Διατεταγμένους Συντονιστές Διακεκομμένου Δακτυλίου στο Υπόστρωμα

Στο άρθρο με τίτλο «Microstrip Patch Antenna Project with Split Ring Resonator Periodically Arrayed on the Substrate» [5] μελετάται η επίδραση των παραμέτρων των μεταλλικών στη συμπεριφορά των σύγχρονων κεραιών. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης ερευνητικής μελέτης σχεδιάστηκαν, προσομοιώθηκαν και υλοποιήθηκαν πειραματικά δυο ορθογώνιες μικροταινιακές κεραίες, η μία εκ των οποίων αποτελείται από 16 διατάξεις μεταλλικών περιοδικά διατεταγμένες στο υπόστρωμα και η άλλη από 36. Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων, διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος και το πλήθος των μεταλλικών έχουν άμεση επίδραση

στη τιμή της συχνότητας συντονισμού, στο εύρος ζώνης λειτουργίας, στο κέρδος και στην αντίσταση εισόδου της κεραίας. Αναμφίβολα, η συστηματική μελέτη μιας κεραίας είναι δυνατόν να συνεισφέρει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης της.

1.1.3 Αποτελεσματική Απομόνωση Ηλεκτρικά Μικρών Μονοπολικών Κεραίων με Διατάξεις Μεταϋλικών

Στο άρθρο με τίτλο «Efficient Isolation between Electrically Small Metamaterial Inspired Monopole Antennas» [6] παρουσιάζεται μια κεραία, η οποία αποτελείται από ένα μονόπολο με ενσωματωμένο συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR). Η προτεινόμενη κεραία λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και έχει χαμηλή συχνότητα συντονισμού καθιστώντας τη κατάλληλη για ασύρματες εφαρμογές. Στη συνέχεια, με τη χρήση του μονοπόλου ως βάση, κατασκευάστηκαν δυο διαφορετικές 2 x 2 διαμορφώσεις, επιτυγχάνοντας συστηματική ελαχιστοποίηση της αμοιβαίας σύζευξης με τη χρήση ενός μόνο αρνητικού συντονιστή μεταϋλικών (SNG). Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η αμοιβαία σύζευξη που δημιουργείται ελαττώνει τουλάχιστον κατά 27 dB τη συχνότητα συντονισμού. Η προτεινόμενη διάταξη υπερέχει εν συγκρίσει με άλλες χάρη στην απλοϊκή δομή, την ευκολία κατασκευής, το μικρό μέγεθος και την ικανοποιητική απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας.

1.1.4 Κεραία με Μεταϋλικά με Μειωμένους Κινδύνους Ακτινοβολίας για το Κεφάλι

Το άρθρο «A Metamaterial Antenna with Reduced Radiation Hazards towards Human Head» [26], παρουσιάζει μια κεραία, η οποία αποτελείται από ένα μονόπολο που τροφοδοτείται από έναν τροποποιημένο ομοεπίπεδο κυματοδηγό (CPW). Διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη συντονιστών διακεκομμένων δακτυλίων (SRR) στην προτεινόμενη κεραία ελαττώνει σημαντικά την ακτινοβολία που εκπέμπεται και κατ' επέκταση περιορίζει τις βλαβερές συνέπειες στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Συγκεκριμένα, μετά από μελέτη των χαρακτηριστικών της, αποδείχτηκε ότι μια ελάττωση 25 dB της ακτινοβολούμενης ισχύος, περιορίζει σημαντικά την ακτινοβολία που εκπέμπεται προς το κεφάλι των χρηστών. Αυτό διαπιστώθηκε και σε πειραματικό στάδιο από το διάγραμμα ακτινοβολίας, το οποίο έχει μηδενική τιμή στο οριζόντιο επίπεδο. Η προτεινόμενη κεραία λειτουργεί στη ζώνη 1800 του προτύπου GSM και η χρήση της ενδείκνυται για ενσωμάτωση σε ακουστικό κινητού τηλεφώνου.

1.1.5 Μικρή Κεραία Πολλαπλών Συχνοτήτων με Μεταϋλικά για WLAN / WiMAX Εφαρμογές

Στο άρθρο «Miniaturized Multiband Antenna with Modified Split-ring Resonator for WLAN/WiMAX Applications» [27], μελετήθηκε και σχεδιάστηκε μια κεραία μικρού μεγέθους, η οποία λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και υπάρχει η δυνατότητα μετακίνησης του κύριου λοβού ακτινοβολίας. Η προτεινόμενη κεραία αποτελείται από ένα επίπεδο γείωσης, το οποίο έχει κτενώδη δομή και από

ένα μεταϊλικό με διάταξη όμοια με του συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (SRR). Στο διάγραμμα ακτινοβολίας, ο λοβός ακτινοβολίας μετατοπίζεται κατά 90 μοίρες κατά τη μεταβολή συχνότητας από 3.8 GHz μέχρι 4 GHz. Η κεραία εμφανίζει ικανοποιητική απόδοση σε WLAN και WiMAX ζώνες και είναι κατάλληλη για LTE 2300, WiMAX και WLAN εφαρμογές.

1.1.6 Αμοιβαία Σύζευξη μεταξύ Παρασιτικών Στοιχείων Διακεκομμένων Δακτυλίων Συντονιστών σε Κεραία

Στην επιστημονική μελέτη με τίτλο «Mutual Coupling between Parasitic Elements of Split Ring Resonator on Antenna» [29] διερευνάται η επίδραση των συντονιστών διακεκομμένων δακτυλίων (SRR) σαν παρασιτικά στοιχεία σε μια κεραία. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια κεραία, η οποία αποτελείται από ένα συμβατικό μονόπολο και δυο ορθογώνιους συντονιστές διακεκομμένους δακτυλίου (SRR). Το μονόπολο λειτουργεί σαν ενεργός στοιχείο, ενώ οι συντονιστές διακεκομμένων δακτυλίων σαν παρασιτικά στοιχεία. Η κεραία με δύο συντονιστές έχει την ίδια επίδραση στα παρασιτικά στοιχεία, με αποτέλεσμα να παρατηρείται το φαινόμενο αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ δυο γειτονικών στοιχείων. Τα παρασιτικά στοιχεία βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση της κεραίας, κυρίως στις ασύρματες εφαρμογές.

1.1.7 Κεραία Μικροταινίας Ευρείας Ζώνης και Υψηλού Κέρδους

Στο άρθρο με τίτλο «A Broadband and High - Gain Metamaterial Microstrip Antenna» [28] παρουσιάζεται μια ορθογώνια κεραία μικροταινίας, στο άνω μέρος της οποίας υπάρχουν περιοδικά διατεταγμένα τριγωνικά κενά και στο επίπεδο γείωσης της είναι χαραγμένες ισαπέχουσες κάθετες και οριζόντιες λωρίδες. Ο συνδυασμός τους αποτελεί ένα χωρητικό - επαγωγικό κύκλωμα που εμφανίζει τα χαρακτηριστικά των αριστερόστροφων υλικών και βελτιώνει σημαντικά τη συμπεριφορά της κεραίας. Αναλυτικότερα, ο προτεινόμενος συνδυασμός αυξάνει την απόδοση της κεραίας σε ποσοστό μεγαλύτερο του 98%, διευρύνει το εύρος συχνοτήτων περίπου 15 φορές περισσότερο, ελαχιστοποιεί τις απώλειες και το λόγο στάσιμου κύματος (VSWR), καθώς και ισχυροποιεί την ακτινοβολία που εκπέμπεται στο οριζόντιο επίπεδο.

1.1.8 Δίπολο με Υπόστρωμα Μεταϊλικών για Υψηλό Κέρδος

Η μελέτη με τίτλο «A Metamaterial Backed Dipole Antenna for High Gain Directional Communications» [30] παρουσιάζει ένα δίπολο όπισθεν του οποίου υπάρχει ένα καλώδιο που ενώνει ένα σύνολο συντονιστών διακεκομμένου δακτυλίου (SRR), τα οποία είναι αρμόδια για τη διέγερση του H^\perp ρυθμού. Η διέγερση του H^\perp ρυθμού χρησιμοποιείται για τη βελτίωση του κέρδους μέχρι 9 dBi. Η προς τα πίσω αναλογία στη κατεύθυνση του διπόλου έχει τιμή 23 dB. Η βελτίωση των επιδόσεων της προτεινόμενης κεραίας πραγματοποιείται μέσω της ανάκλασης των μεταϊλικών και της ηλεκτρομαγνητικής ενίσχυσης του πεδίου που παράγεται από τη κάθετη πρόσπτωση στη δομή των μεταϊλικών.

1.1.9 Σχεδιασμός και Συγκριτική Ανάλυση μιας Κεραίας Μεταϋλικών με Σχισμές και Κάλυμμα Μεταϋλικού

Στο άρθρο «Design and Comparative analysis of a Metamaterial included Slotted Patch Antenna with a Metamaterial Cover over Patch» [31], πραγματοποιείται σύγκριση των ιδιοτήτων μιας κεραίας με σχισμές που περιλαμβάνει στο εσωτερικό της μια διάταξη μεταϋλικού και μιας κεραίας που καλύπτεται από ένα μεταϋλικό. Παρατηρήθηκε ότι στην πρώτη περίπτωση η κεραία λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, επιτυγχάνει χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού, αυξάνει τη κατευθυντικότητα και διευρύνει το εύρος συχνοτήτων σε ποσοστό 11.3%. Στη δεύτερη περίπτωση, διαπιστώθηκε ότι τα μεταϋλικά λειτουργούν σαν φακός και μπορούν να βελτιώσουν ουσιαστικά τη κατευθυντικότητα της κεραίας. Επιπλέον, μια αύξηση της τάξης των 5 χιλιοστών, επιμηκύνει περίπου κατά 9% το εύρος ζώνης. Τα μεταϋλικά είναι ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο για εφαρμογές σε ζώνες συχνοτήτων από megahertz έως terahertz.

1.1.10 Μελέτη Κυκλικής Στοιχειοκεραίας Υψηλού Κέρδους με Δομή Μεταϋλικών

Στο άρθρο με τίτλο «Study on High Gain Circular Waveguide Array Antenna with Metamaterial Structure» [32] παρουσιάζεται μια νέα δομή μεταϋλικών, που η χρήση της αυξάνει το κέρδος μιας κυκλικής στοιχειοκεραίας. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μιας κυκλικής διάταξης που η δομή της αποτελείται από μεταϋλικά, με μια συμβατική διάταξη και διαπιστώθηκε ότι στην πρώτη περίπτωση το κέρδος ήταν αυξημένο κατά 7 dB. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δομή μεταϋλικών δημιουργεί ένα δείκτη διάθλασης που προσεγγίζει το μηδέν και μπορεί να εξασφαλίσει τη συγκέντρωση ακτινοβολίας. Είναι αναμφίβολο ότι η συγκεκριμένη δομή μεταϋλικών μπορεί να βρει εφαρμογή σε ποικίλες κεραίες και να βελτιώσει την ακτινοβολία τους.

1.1.11 Σχεδιασμός και Κατασκευή μιας Μικρής Κεραίας Μικροταινίας που περιέχει DNG Μεταϋλικά

Στο άρθρο «Design and Fabrication of a Miniaturized Microstrip Antenna Loaded by DNG Metamaterial» [33], παρουσιάζεται η επίδραση των DNG μεταϋλικών σε μια ορθογώνια μικρή σε μέγεθος κεραία μικροταινίας. Το κάθε μεταϋλικό αποτελείται από δυο σπιδάλ κατασκευές και από μια ευθεία λωρίδα χαραγμένη σε δυο πλευρές. Ο συνδυασμός δυο μονάδων της συγκεκριμένης κατασκευής, που αποτελούν το διπλό αρνητικό DNG μέσο, με τον αέρα, που αποτελεί το διπλό θετικό DPS, συγκροτεί το υπόστρωμα της κεραίας. Με τη τοποθέτηση των διατάξεων των μεταϋλικών κάτωθεν της κεραίας λαμβάνει χώρα ένας μικρού μήκους κύματος συντονισμός, ο οποίος οδηγεί σε σημαντική μείωση του μεγέθους της κεραίας, της τάξης των 54.6%, εν συγκρίσει με μια συμβατική κεραία. Επιπλέον, είναι δυνατό να ελαττωθεί η συχνότητα συντονισμού όταν οι καταστατικές παράμετροι των μεταϋλικών έχουν αρνητικές τιμές.

1.1.12 Αρνητικό Διηλεκτρικό Μεταϋλικό Ευρείας Ζώνης για Μείωση του Μεγέθους του Φίλτρου σε Εφαρμογές Κεραιών

Στο άρθρο με τίτλο «Wideband Negative Permittivity Metamaterial for Size Reduction of Stopband Filter in Antenna Applications» [34], σχεδιάστηκε και μελετήθηκε ένας μικρός, ευρείας ζώνης συμπληρωματικός συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) με αρνητική διηλεκτρική σταθερά. Η προτεινόμενη σύνθεση μεταϋλικών αφορά τη καταστολή των υψηλών αρμονικών μέσω του φίλτρου της γραμμής τροφοδοσίας. Με τη χρήση ενός συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR), περιορίζονται οι ανώτεροι ρυθμοί, διατηρώντας την ίδια απόδοση της κεραίας. Με τη προσομοίωση της συγκεκριμένης διάταξης, προέκυψε μείωση της ισχύος των αρμονικών σε ποσοστό έως και 95%.

1.1.13 Σχεδιασμός Κεραίας με τη Χρήση Μεταϋλικών για Λειτουργία σε Πολλαπλές Ζώνες Συχνοτήτων

Το άρθρο με τίτλο « Design of Patch Antenna for Multiband Operation Using Metamaterial » [35], παρουσιάζει μια κεραία μικροταινίας, η οποία συντονίζεται σε τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και είναι ιδανική για συστήματα, όπως WiMax, Bluetooth και WiFi. Στο άνω τμήμα της κεραίας είναι χαραγμένοι είκοσι συμπληρωματικοί συντονιστές διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR), οι οποίοι εκτελούν τον ρόλο των μεταϋλικών. Η παρουσία τους οδηγεί σε ελάττωση της συχνότητας συντονισμού της κεραίας, σε σημαντική αύξηση του εύρους ζώνης συχνοτήτων και σε βελτίωση της απόδοσης της κεραίας.

1.2 Στόχος και περιεχόμενο της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των μεταϋλικών στη λειτουργία των σύγχρονων κεραιών. Συγκεκριμένα, θα μελετηθούν σε βάθος τις ιδιότητες των αριστερόστροφων υλικών και ο τρόπος με τον οποίο δύνανται να βελτιώσουν τη συμπεριφορά μιας κεραίας. Θα προσομοιωθούν διάφορα είδη κεραιών, στο λογισμικό CST STUDIO SUITE και παρακολουθούμε τον τρόπο λειτουργίας τους υπό την επίδραση των μεταϋλικών. Ως επί το πλείστον των περιπτώσεων τα μεταϋλικά έχουν θετικά αποτελέσματα στη συχνότητα συντονισμού, στο εύρος λειτουργίας, στην ακτινοβολία και το κέρδος των κεραιών. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων θα επιβεβαιωθεί ότι ο αριθμός, η γεωμετρία, η τοποθεσία και η διάταξη των μεταϋλικών έχουν καθοριστικό ρόλο στο αποτέλεσμα. Συνεπώς, η συστηματική και πλήρης μελέτη θα συνεισφέρει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των κεραιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Εισαγωγή

Τα μεταϋλικά (metamaterials) αποτελούν ένα νέο είδος υλικών, το οποίο έκανε την εμφάνιση του κάπου μετά το 2000 και κατά τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται όλο και πιο συχνά. Τα μεταϋλικά σχεδιάζονται, προκειμένου να φέρουν συγκεκριμένες επιθυμητές ιδιότητες, οι οποίες δεν μπορούν να βρεθούν στη φύση. Επί της ουσίας, πρόκειται για συνθετικές κατασκευές από γνωστά μέσα, οι οποίες λαμβάνουν τις προβλεπόμενες ιδιότητες, όχι από τη σύσταση των ήδη γνωστών συστατικών τους, αλλά από τη γεωμετρία της όλης διάταξης που επαναλαμβάνεται περιοδικά κατά μοναδιαία κελιά, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από την υπό μελέτη εφαρμογή. Μεταβάλλοντας τη δομή του μοναδιαίου κελιού, μπορούμε να μεταβάλουμε τις ιδιότητες του μεταϋλικού.

Ένα μεταϋλικό μπορεί να χαρακτηριστεί «μακροσκοπικά ομογενές» όταν το μέγεθος του κελιού είναι πολύ μικρότερο εν συγκρίσει με το μήκος κύματος λειτουργίας του. Το σύνολο των παραμέτρων που μπορεί να το περιγράψει ακριβώς είναι: η διηλεκτρική σταθερά (ϵ), η μαγνητική διαπερατότητα (μ), ο δείκτης διάθλασης (n) και η κυματική αντίσταση (z). Στα μεταϋλικά όταν το μέγεθος του κελιού είναι μικρό κλάσμα του μήκους κύματος, το προσπίπτον κύμα αδυνατεί να αντληφθεί τα κελιά μεταξύ των δομών του κάθε κελιού με αποτέλεσμα να επικρατούν φαινόμενα διάθλασης έναντι των φαινομένων σκέδασης. Απόρροια αυτού είναι μη αντιμετώπιση του υλικού ως άθροισμα σκεδαστών αλλά ως συνεχές.

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιδέα για πιθανή ύπαρξη μεταϋλικών ανήκει στον ρώσο φυσικό Victor Veselago, όταν το 1964, με τη βοήθεια των εξισώσεων Maxwell κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης εάν η διηλεκτρική σταθερά (ϵ) και η μαγνητική διαπερατότητα (μ) φέρουν αρνητικές τιμές ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, προέβλεψε τις μοναδικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητές τους, όπως η αντιστροφή του νόμου του Snell και η αντιστροφή του φαινομένου Doppler. Επιπλέον, απέδειξε ότι τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου σε ένα υλικό «αριστερού νόμου» δίνουν διάνυσμα Poynting, του οποίου η κατεύθυνση καθορίζεται από τον κανόνα του αριστερού χεριού, εν αντιθέσει με τα συνήθη υλικά. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση κυμάτων που διαδίδονται “προς τα πίσω”, καθώς προκειμένου να ισχύει η αρχή διατήρησης της ενέργειας, η ταχύτητα φάσης έχει αντίθετη κατεύθυνση από την ταχύτητα ομάδας (διεύθυνση διάδοσης της ισχύος), με αποτέλεσμα την εμφάνιση οπισθοδιαδεδομένων κυμάτων (backward waves).

Το θέμα που ανέδειξε ο Veselago αγνοήθηκε ως το 1999 [36], όταν ο φυσικός John Pendry εισηγήθηκε ότι μια άλλη διάταξη διακεκομμένων δακτυλίων χαλκού (SRR) μπορούσε να αντιστρέψει το μαγνητικό πεδίο, δηλαδή να μιμηθεί τη συμπεριφορά μαγνητικού υλικού με αρνητική διαπερατότητα σε συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη συστοιχία δομικών μονάδων θα είχε $\mu <$

0 στο εύρος συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, με αποτέλεσμα ο συνδυασμός τους με τα λεπτά μεταλλικά σύρματα, τα οποία θα προκαλούσαν $\epsilon < 0$, να δημιουργεί μια διάταξη με ταυτόχρονα αρνητικές τιμές σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων. Επομένως, ήταν θέμα διάταξης κοινών αγώγιμων υλικών η αντιστροφή του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου.

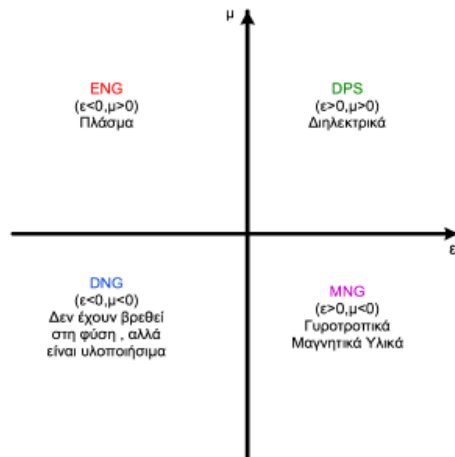
Την επόμενη χρονιά οι Smith και Schultz [11] συνδύασαν δύο είδη διατάξεων και κατόρθωσαν να κατασκευάσουν το υλικό που είχε οραματιστεί ο Victor Veselago. Το υλικό αυτό ήταν μια ενεργά ομογενής δομή που αποτελούνταν από μια συστοιχία χάλκινων διαχωρισμένων δακτυλίων (SRRs) και λεπτών χάλκινων συρμάτων διαθέτοντας αρνητική μαγνητική διαπερατότητα (μ) και αρνητική διηλεκτρική σταθερά (ϵ) αντίστοιχα.

Τέλος, ο Κώστας Σούκουλης [36] απέδειξε ότι κατά τη στιγμή της διέλευσης από δεξιόστροφο σε αριστερόστροφο υλικό το φως δεν διαθλάται απευθείας, αλλά παγιδεύεται στιγμιαία στα σύνορα της αριστερόστροφης επιφάνειας, με αποτέλεσμα να δημιουργεί την εντύπωση ότι οι εξώτερες ακτίνες της δέσμης του ταξιδεύουν ταχύτερα.

2.2 Κατηγοριοποίηση υλικών

Οι παράμετροι της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ) και της μαγνητικής διαπερατότητας (μ), λόγω του ότι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του συστήματος σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Με βάση το πρόσημο των ϵ και μ τα υλικά διακρίνονται σε 4 βασικές κατηγορίες.

- Υλικά με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon > 0$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu > 0$ ονομάζονται **double-positive (DPS)**. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται τα περισσότερα υλικά που συναντώνται τη φύση.
- Υλικά με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon < 0$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu > 0$ ονομάζονται **epsilon-negative (ENG)**. Πολλά είδη πλάσματος εμφανίζουν αυτή τη συμπεριφορά σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. Παράδειγμα αυτών αποτελούν ορισμένα ευγενή μέταλλα, όπως ο χρυσός και ο άργυρος, τα οποία παρουσιάζουν τέτοια χαρακτηριστικά στην υπέρυθη περιοχή και σε περιοχές ορατού φάσματος.
- Υλικά με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon > 0$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu < 0$ ονομάζονται **mu-negative (MNG)**. Αυτό το χαρακτηριστικό παρατηρείται σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων στα γυροτροπικά και φερρομαγνητικά υλικά, όπου οι ποσότητες ϵ και μ είναι τανυστές, δηλαδή τα υλικά είναι ανισοτροπικά.
- Υλικά με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon < 0$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu < 0$ ονομάζονται **double-negative (DNG)** ή αλλιώς διπλάρνητικά. Πρόκειται για υλικά τα οποία κατασκευάζονται από τον άνθρωπο και δεν τα συναντάμε στη φύση. Άλλες ορολογίες των υλικών αυτών είναι: Left - Handed Materials (LHM - αριστερόστροφα υλικά), Backward - Wave Media (υλικά οπισθοκατευθυντικού κύματος), Media with Negative Refractive Index (υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης).

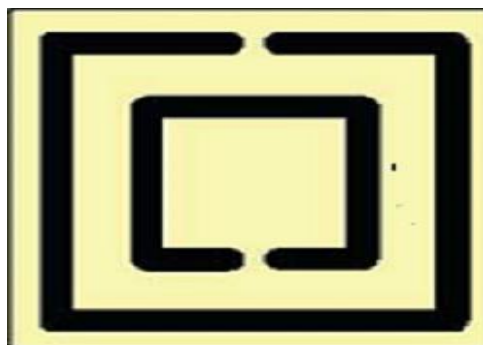


Σχήμα 1 : Κατηγοριοποίηση των υλικών με βάση τις τιμές των ϵ και των μ [10].

2.3 Ηλεκτρομαγνητικά Μεταύλικά

Τα μεταύλικά εξελίχθηκαν σε ένα νέο πεδίο στο πλαίσιο της φυσικής και του ηλεκτρομαγνητισμού και παρουσιάζουν σημαντικές προοπτικές για οπτικές και μικροκυματικές εφαρμογές, όπως είναι διαμορφωτές, ζωνοπερατά (basspass) φίλτρα, μικροκυματικοί συζεύκτες. Επιπλέον, χάρη στη δυνατότητα για άμεση διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μια ηλεκτρομαγνητική επιφάνεια μπορούν να συμβάλλουν στην βελτίωση των ολοκληρωμένων συστημάτων.

Για τη ζώνη των μικροκυμάτων, οι δομές απαιτείται να έχουν μέγεθος λίγα χιλιοστά. Τα μεταύλικά μικροκυματικών συχνοτήτων είναι συνήθως συνθετικά και κατασκευάζονται ως συστοιχίες από ηλεκτρικά αγωγικά στοιχεία που διαθέτουν κατάλληλα επαγωγικά και χωρητικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι γνωστά ως Split Ring αντηχεία.

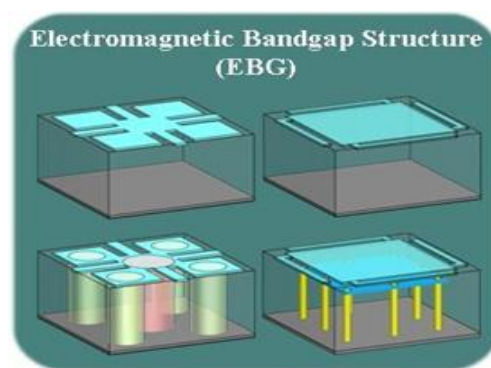


Εικόνα 2.1 : Μεταύλικο SRR [3].

Τα ηλεκτρομαγνητικά μεταύλικά συντίθενται με την ενσωμάτωση τεχνητά κατασκευασμένων προσθηκών σε ένα συγκεκριμένο μέσο υποδοχής με ένα σύνολο διαθέσιμων παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι είναι ιδιαίτερα σημαντικές λόγω του ότι περιλαμβάνουν τις ιδιότητες των υλικών υποδοχής, το σχήμα, το μέγεθος και τη σύνθεση των προσθηκών. Με τον καθορισμό των παραμέτρων στο στάδιο της κατασκευής, το μεταύλικο σχεδιάζεται για να λειτουργεί σε συγκεκριμένες λειτουργίες ηλεκτρομαγνητικής απόκρισης.

Τα ηλεκτρομαγνητικά μεταϋλικά διαχωρίζονται επιπλέον με βάση τις παρακάτω κατηγορίες:

- **Μονά αρνητικά μεταϋλικά (SNG):** Τα μονά αρνητικά μεταϋλικά (SNG) μπορούν να έχουν αρνητική είτε την επιτρεπτότητα είτε τη διαπερατότητα, αλλά όχι και τις δύο μαζί. Τα ENG και MNG μεταϋλικά εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία. Έχουν διεξαχθεί αξιολογικά πειράματα με δύο στρώματα σε ένα μεταϋλικό, τα οποία δημιουργούν μια άλλη μορφή DNG μεταϋλικού. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί το πείραμα ενώνονται μια πλάκα υλικού ENG με μια πλάκα υλικού MNG. Απόρροια αυτού είναι ιδιότητες όπως η διαφάνεια, η μηδενική ανάκλαση και το ανώμαλο tunneling. Με τη συχνότητα μεταβάλλονται ο δείκτης διάθλασης, η διαπερατότητα και η επιτρεπτότητα τις.
- **Διπλά αρνητικά μεταϋλικά (DNG):** Στα διπλά αρνητικά μεταϋλικά (DNG), τόσο η επιτρεπτότητα όσο και η διαπερατότητα είναι αρνητικές, με αποτέλεσμα και ο δείκτης διάθλασης να είναι αρνητικός. Τα DNG μεταϋλικά είναι εκ φύσεως υλικά διασποράς, καθώς η επιτρεπτότητα και η διαπερατότητα τις εξαρτώνται από τη συχνότητα.
- **Μεταϋλικά ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης (Electromagnetic band gap metamaterials):** Τα μεταϋλικά ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης (EBG) ελέγχουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω των φωτονικών κρυστάλλων (PC) είτε μέσω των αριστερόστροφων υλικών (LHM). Οι PC και LHM σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν φασματικά κενά στην επιθυμητή συχνότητα και απαγορεύουν εντελώς ή επιτρέπουν μόνο τις ορισμένες κατευθύνσεις τη διάδοση του φωτός. Ο φωτονικός κρύσταλλος διακρίνεται από τις μικρότερες του μήκους κύματος δομές του. Η παραγωγή του EBG θέτει σαν στόχο τη δημιουργία περιοδικών διηλεκτρικών δομών με χαμηλές απώλειες. Το EBG επηρεάζει αρκετά τις ιδιότητες των φωτονίων. Ο κρύσταλλος είναι ένα τέλειο EBG υλικό, καθώς δεν επιτρέπει τη διάδοση του φωτός.



Εικόνα 2.2: Δομή ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης (ENG).

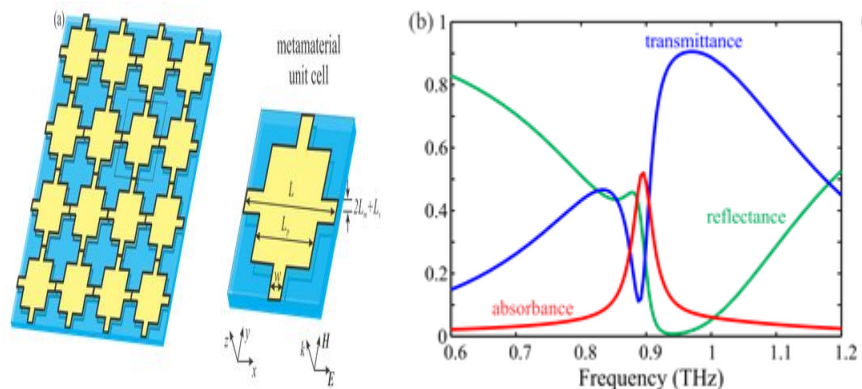
Η εμπορική παραγωγή των διηλεκτρικών διατάξεων EBG έχει καθυστερήσει, λόγω των περιορισμένων εμπορικών οφελών. Ορισμένες νεοσύστατες επιχειρήσεις δραστηριοποιούνται στην αξιοποίηση των μεταλλικών EBG, τα οποία κατασκευάζονται για συχνότητες που κυμαίνονται από λίγα Gigahertz (GHz), έως και πολλά Terahertz (THz).

- **Δισισοτροπικά και δισανισοτροπικά μεταλλικά (Bi-Isotropic And Bi-Anisotropic Metamaterials):** Τα μεταλλικά στα οποία το μαγνητικό πεδίο προκαλεί μαγνητική πόλωση και το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί ηλεκτρική πόλωση (δηλαδή ηλεκτρό-μαγνητική ζεύξη) ονομάζονται δισισοτροπικά.

Στα δισισοτροπικά μέσα δύνανται να εμφανίσουν διαφορετικά αποτελέσματα όταν η παράμετρος Tellegen (χ) έχει μηδενική τιμή, ενώ η δύναμη χειροτροπίας (κ) έχει μη μηδενική τιμή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ανάλογα με τη δύναμη της χειροτροπίας μπορούν να εμφανιστούν είτε ένα κύμα προς τα εμπρός, είτε ένα προς τα πίσω, είτε δύο κύματα προς τα εμπρός και δύο προς τα πίσω.

- **Terahertz μεταλλικά:** Τα Terahertz μεταλλικά αλληλεπιδρούν στις συχνότητες Terahertz. Η περιοχή συχνοτήτων που ορίζεται συνήθως ανήκει στο διάστημα από 0.1 έως 10 THz.

Η τεχνολογία Terahertz μπορεί να επωφεληθεί σε σημαντικό βαθμό από τα μεταλλικά, καθώς τα τελευταία παρέχουν τα δομικά στοιχεία για τις συσκευές THz και προσφέρουν προηγμένες μεταδόσεις.



Εικόνα 2.3: (α) Αναπαραγωγή κυττάρου για σύνθεση πλάκας μεταλλικών (β) Διαπερατότητα, ανάκλαση και απορρόφηση τη δομής [7].

Η διάταξη δομής ενός THz μεταλλικού παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 (α), όπου ένα κελί, με διαστάσεις 150 x 150 μm, αναπαράγεται με σκοπό να συνθέσει μια πλάκα μεταλλικών. Η διαθλαστικότητα, η ανάκλαση και η απορρόφηση αυτής της δομής απεικονίζονται στο σχήμα 1 (β). Να σημειωθεί ότι η απορρόφηση μεγιστοποιείται κοντά στο συντονισμό του μεταλλικού και πηγάζει από τις απώλειες του διηλεκτρικού διαχωριστή.

- **Συντονιζόμενα ή ελεγχόμενα μεταϋλικά (Tunable Metamaterials):** Τα συντονιζόμενα μεταϋλικά έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται σε αυθαίρετες αλλαγές συχνότητας στο δείκτη διάθλασης. Η δομή ενός συντονιζόμενου μεταϋλικού ρυθμίζεται σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας δυνατή την επαναδιαμόρφωση της συσκευής κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της.



Εικόνα 2.4: Δείγμα από ένα συντονισμένο μεταϋλικό [8].

- **Μη γραμμικά μεταϋλικά (non linear):** Μη γραμμικά μεταϋλικά ονομάζονται αυτά των οποίων οι ιδιότητες μεταβάλλονται με την ισχύ του προσπίπτοντος κύματος, λόγω του γεγονότος ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία των εγκλείστων (inclusions) δύνανται να είναι αρκετά μεγαλύτερα από τη μέση τιμή του πεδίου.



Εικόνα 2.5: Δομή μη γραμμικών μεταϋλικών. Απεικονίζει μια κοντινή προβολή ενός SRR αντηχείου με δίοδο μεταβλητής χωρητικότητας. Κάθε αντηχείο έχει διάσταση περίπου 1 cm. [9].

2.4 Ιδιότητες μεταϋλικών

Στην ενότητα αυτήν θα παρουσιαστούν οι κύριες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των μεταϋλικών, οι οποίες τα διαφοροποιούν σε μεγάλο βαθμό εν συγκρίσει με τα συμβατικά μέσα διάδοσης.

2.4.1 Αριστερόστροφα Υλικά

Αν συνδυάσουμε τις εξισώσεις Maxwell $\nabla \times \mathbf{E}' = -i\omega\mu\mathbf{H}$ και $\nabla \times \mathbf{H} = i\omega\varepsilon\mathbf{E}'$ με τη διανυσματική ταυτότητα $\nabla \times (\mathbf{f}\mathbf{F}) = \nabla\mathbf{f} \times \mathbf{F} + \mathbf{f}\nabla \times \mathbf{F}$ και τη σχέση $\nabla e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} = -i\mathbf{k}e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ λαμβάνουμε το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega\mu\mathbf{H} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega\varepsilon\mathbf{E} \quad (2.2)$$

Στα συμβατικά υλικά, όπου το μ και το ε έχουν θετικές τιμές, οι ανωτέρω εξισώσεις ορίζουν ότι το ηλεκτρικό (\mathbf{E}) και το μαγνητικό (\mathbf{H}) πεδίο, καθώς και το διάνυσμα διάδοσης (\mathbf{k}) συνθέτουν ένα δεξιόστροφο σύστημα. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου τα μ και ε έχουν αρνητικές τιμές, τα διανύσματα \mathbf{E} , \mathbf{H} και \mathbf{k} ορίζουν ένα αριστερόστροφο σύστημα. Απόρροια του συγκεκριμένου γεγονότος είναι η ταχύτητα φάσης, η οποία προκύπτει από τη σχέση $U_p = \frac{\omega}{k}$ να έχει αντίθετο πρόσημο εν συγκρίσει με την ταχύτητα φάσης σε ένα συμβατικό υλικό. Συνεπώς, η φάση των κυμάτων διαδίδεται ανάποδα, με φορά προς την πηγή και σε αντίθετη κατεύθυνση από την ενέργεια, που αντιπροσωπεύεται από την ταχύτητα ομάδας και διαδίδεται πάντοτε απομακρυνόμενη από την πηγή. Τέλος, αρνητικό πρόσημο θα έχει και η πυκνότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, η οποία προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$W_{em} = \frac{\varepsilon}{2} |\mathbf{E}|^2 + \frac{\mu}{2} |\mathbf{H}|^2 \quad (2.3)$$

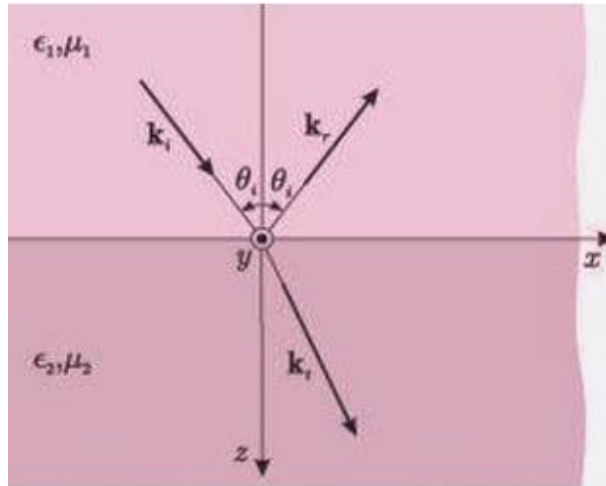
2.4.2 Αντιστροφή Νόμου Snell

Η αντιστροφή του νόμου του Snell κατά την πρόσπτωση ενός κύματος σε μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ ενός υλικού και ενός μεταυλικού περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (2.4)$$

όπου θ_i και θ_t οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης αντίστοιχα, ενώ n_1 και n_2 οι δείκτες διάθλασης του υλικού και του μεταυλικού. Στην περίπτωση που $n_2 < 0$, η διάθλαση πραγματοποιείται κατά την αντίθετη κατεύθυνση από ότι συνήθως, διότι η γωνία διάθλασης θ_t έχει αρνητική τιμή.

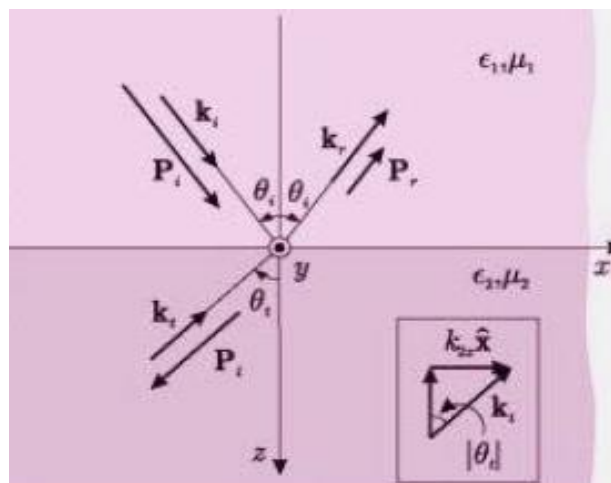
Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται ένα επίπεδο κύμα που προσπίπτει από ένα συμβατικό υλικό σε ένα μεταυλικό με γωνία θ_i προς τον άξονα z . Στο σημείο αυτό υποθέτουμε ότι ο χώρος διακρίνεται σε δύο περιοχές την άνω με $z < 0$ που καταλαμβάνεται από ένα συμβατικό υλικό με καταστατικές παραμέτρους ε_1, μ_1 και την κάτω με $z > 0$ που καταλαμβάνεται από μεταυλικό με καταστατικές παραμέτρους ε_2, μ_2 .



Εικόνα 2.6: Πρόσπτωση ενός επίπεδου κύματος από ένα συμβατικό υλικό σε ένα μεταυλικό [14].

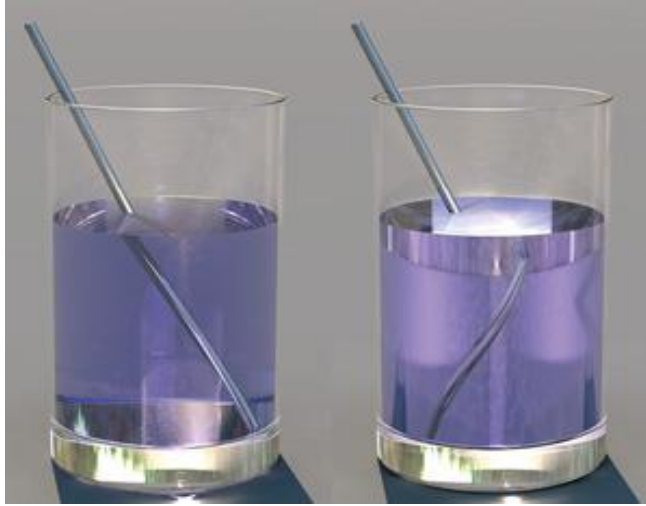
Εξαιτίας της συνέχειας των εφαπτομενικών συνιστωσών της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης στη διαχωριστική επιφάνεια, η εφαπτομενική συνιστώσα του κυματικού διάνυσματος του διαθλώμενου κύματος (\mathbf{k}_t) θα ισούται με την εφαπτομενική συνιστώσα των κυματικού διάνυσματος του προσπίπτοντος κύματος (\mathbf{k}_i) και την εφαπτομενική συνιστώσα του κυματικού διάνυσματος του ανακλώμενου κύματος (\mathbf{k}_r).

Επιπλέον, η ισχύς στο συμβατό υλικό θα ρέει προς την κατεύθυνση του θετικού άξονα z , ενώ στο μεταυλικό η φορά διάδοσης της ισχύος θα είναι προς τα αρνητικά του άξονα z . Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται το κυματικό διάνυσμα και το διάνυσμα Poynting του προσπίπτοντος, ανακλώμενου και διαθλώμενου κύματος για πρόσπτωση από ένα συμβατικό υλικό σε ένα μεταυλικό.



Εικόνα 2.7: Κυματικό διάνυσμα και διάνυσμα Poynting του προσπίπτοντος, ανακλώμενου και διαθλώμενου κύματος, για πρόσπτωση από ένα συμβατικό υλικό σε ένα μεταυλικό [14].

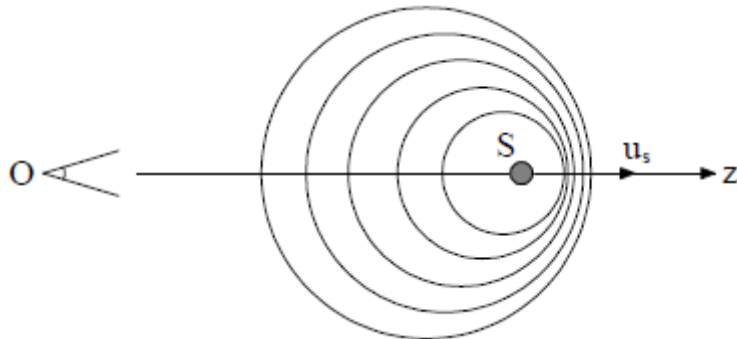
Ενδεικτικά αποτελέσματα της αντιστροφής του νόμου του Snell απεικονίζονται στην ακόλουθη εικόνα, όπου στην πρώτη περίπτωση ο δείκτης διάθλασης είναι θετικός ($n > 0$), ενώ στη δεύτερη περίπτωση αρνητικός ($n < 0$).



Εικόνα 2.8: Αριστερή εικόνα – Ποτήρι με νερό και $n > 0$, Δεξιά εικόνα – Ποτήρι με νερό και $n < 0$ [15].

2.4.3 Αντιστροφή του φαινομένου Doppler

Άλλη μια σημαντική ιδιότητα των μεταλλικών είναι η αντιστροφή του φαινομένου Doppler. Θεωρούμε μια πηγή S που κατευθύνεται προς τη θετική πλευρά του άξονα z , με ταχύτητα $u_s = \frac{z}{t}$ και προς την ίδια κατεύθυνση ακτινοβολεί ένα κύμα γωνιακής συχνότητας ω , όπως απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα.



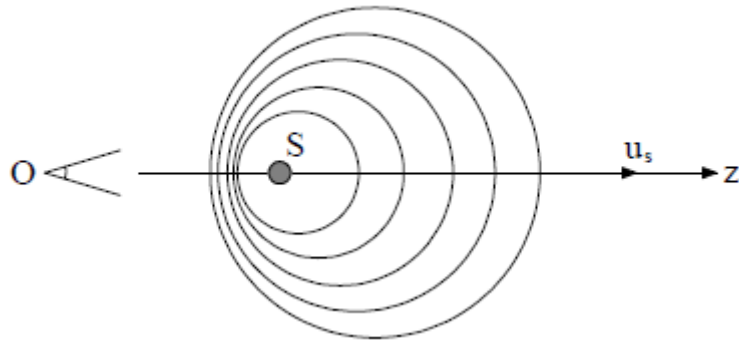
Εικόνα 2.9: Φαινόμενο Doppler σε ένα συμβατό υλικό όπου $\Delta\omega > 0$ [11].

Η φάση που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής στο σημείο O έχει την παρακάτω μορφή:

$$\varphi = \omega t - kz = \omega t - ku_s t = \omega \left(1 - \frac{k}{\omega} u_s \right) t = \omega \left(1 - \frac{u_s}{u_p} \right) t \quad (2.5)$$

όπου $u_p = \frac{\omega}{k}$. Να διευκρινιστεί ότι ο συντελεστής t ορίζεται ως η διαφορά της συχνότητας ω της ακτινικής πηγής και της συχνότητας ολίσθησης $\Delta\omega \left(\Delta\omega = \omega \frac{u_s}{u_p} \right)$ και ονομάζεται συχνότητα Doppler.

Λόγω του γεγονός ότι στα αριστερόστροφα υλικά η ταχύτητα έχει αρνητική τιμή ($u_p < 0$) και η ολίσθηση Doppler θα είναι αρνητική ($\Delta\omega < 0$). Απόρροια αυτού, σε ένα μεταϋλικό μέσο είναι, καθώς η πηγή απομακρύνεται από τον παρατηρητή, ο τελευταίος να αντιλαμβάνεται μεγαλύτερη συχνότητα από αυτή του εκπεμπόμενου κύματος. Αντίθετα, σε ένα συμβατικό μέσο, καθώς κατευθύνεται η πηγή προς τον παρατηρητή, αυτός βλέπει μικρότερη συχνότητα από την εκπεμπόμενη. Συμπερασματικά, η αντιστροφή του φαινομένου Doppler επιτυγχάνεται στα αριστερόστροφα υλικά.

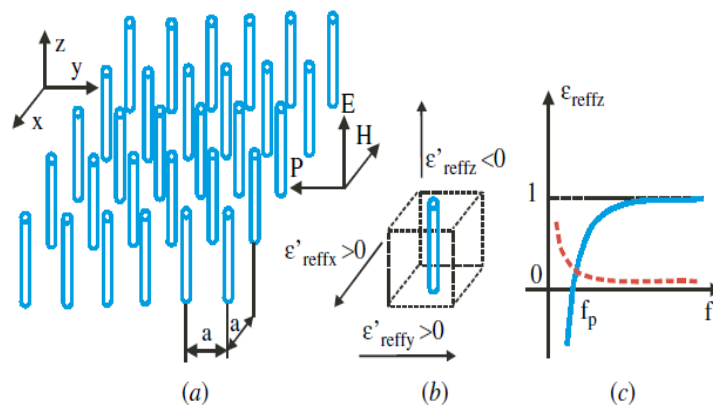


Εικόνα 2.10: Φαινόμενο Doppler σε ένα μεταϋλικό όπου $\Delta\omega < 0$ [11].

2.5 Βασικοί Τύποι Μεταϋλικών

2.5.1 ENG μεταϋλικό από λεπτούς αγωγούς

Είναι γενικώς αποδεδειγμένο ότι μια διάταξη παραλλήλων αγωγών παρουσιάζει μια υψιπερατή συμπεριφορά σε ένα προσπίπτον επίπεδο κύμα, του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο E είναι παράλληλο στους αγωγούς.



Εικόνα 2.11: (α) Διάταξη παράλληλων λεπτών αγωγών, (β) Μοναδιαίο Κελί (c) Ενεργός διηλεκτρική σταθερά της δομής: με συνεχή γραμμή το πραγματικό και με διακεκομμένη το φανταστικό μέρος [1].

Κάτω από μια συγκεκριμένη συχνότητα, τη συχνότητα αποκοπής της δομής, το κύμα υφίσταται ολική ανάκλαση, καθώς δεν υπάρχει διάδοση. Στην περίπτωση που η σταθερά (α) είναι πολύ μικρότερη του μήκους κύματος ($a \ll \lambda$), η διάταξη των αγωγών λαμβάνεται σαν ένα συνεχές υλικό με τη συμπεριφορά πλάσματος, το οποίο

περιγράφεται από μια ισοδύναμη μακροσκοπική σχετική διηλεκτρική σταθερά ($e^{j\omega t}$ η εξάρτηση του χρόνου με $\omega = 2\pi f$ η γωνιακή συχνότητα):

$$\varepsilon_{\text{reff},z} = \varepsilon'_{\text{reff},z} - \varepsilon''_{\text{reff},z} = 1 - \frac{f^2 p}{f^2 - j\gamma f} \quad (2.6)$$

Να σημειωθεί ότι το $\varepsilon_{\text{reff},z}$ αντιπροσωπεύει την ενεργό σχετική διηλεκτρική σταθερά στη διεύθυνση z , τα σύμβολα f και f_p εκφράζουν τη συχνότητα του σήματος και τη συχνότητα αποκοπής της διάταξης, ενώ ο συντελεστής γ τις απώλειες. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά στις κάθετες διευθύνσεις (διεύθυνση x και y) έχει θετική τιμή, ενώ στην περίπτωση λεπτών αγωγών πλησιάζει τη μονάδα ($\varepsilon_{\text{reff},x} \approx 1$, $\varepsilon_{\text{reff},y} \approx 1$). Λόγω του ότι η διηλεκτρική σταθερά στη διεύθυνση παράλληλα στους αγωγούς εξαρτάται και από τη συνιστώσα του κυματικού διανύσματος στην κατεύθυνση z , η ανωτέρω εξίσωση χρησιμοποιείται μόνο εάν δεν υπάρχει συνιστώσα του κυματικού διανύσματος στη διεύθυνση z . Σε αυτή την περίπτωση, το μέσο με λεπτούς αγωγούς (wire medium) θεωρείται ένα ισοτροπικό δισδιάστατο ENG μεταϋλικό που περιγράφεται από μια βαθμωτή σχετική διηλεκτρική σταθερά $\varepsilon_{\text{reff},z}$.

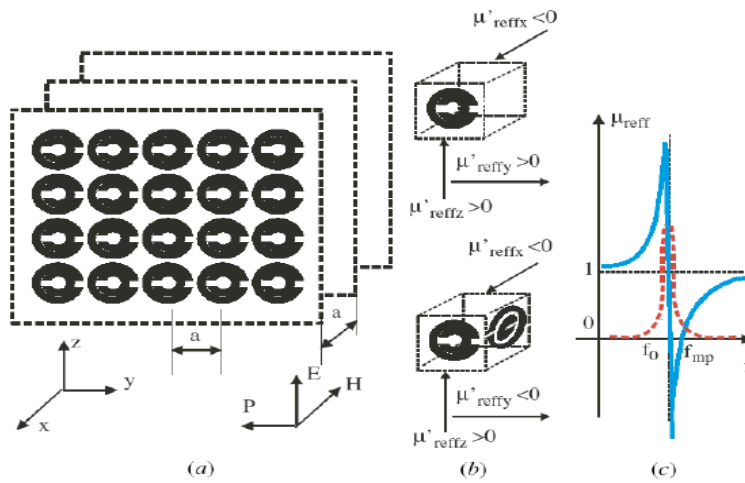
2.5.2 MNG μεταϋλικό με SRRs

Μια διάταξη από διακοπτόμενους συντονιστές δακτυλίους (SRRs) χρησιμοποιείται εκτενώς για τη σύνθεση των MNG ($\mu < 0$) μεταϋλικών. Ο SRR λαμβάνεται ως μια μικρή κυκλική κεραία με χωρητικό φορτίο. Στην περίπτωση που η κεραία λειτουργεί λίγο πάνω από τη συχνότητα συντονισμού, το τοπικό σκεδαζόμενο μαγνητικό πεδίο είναι σχεδόν εκτός φάσης με το προσπίπτον πεδίο, με αποτέλεσμα το τοπικό μαγνητικό πεδίο να είναι μικρότερο του προσπίπτοντος. Απόρροια αυτού είναι η αρνητική μαγνητική πόλωση και η αρνητική ενεργός μαγνητική διαπερατότητα του μεταϋλικού. Η μαγνητική διαπερατότητα του συγκεκριμένου έχει την παρακάτω μορφή:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu'_{\text{eff}} - j\mu''_{\text{eff}} = 1 - \frac{f_{\text{mp}}^2 - f_0^2}{f^2 - f_0^2 - j\gamma f} \quad (2.7)$$

Να διευκρινιστεί ότι το f αντιπροσωπεύει τη συχνότητα σήματος, το f_{mp} τη συχνότητα στην οποία $\mu_{\text{eff}} = 0$ (περίπτωση μηδενικών απωλειών), το f_0 τη συχνότητα στην οποία το μ_{eff} αποκλίνει, ενώ το γ εκφράζει το συντελεστή απωλειών. Οι συχνότητες f_{mp} και f_0 εξαρτώνται από τη σταθερά του πλέγματος και τις γεωμετρικές παραμέτρους του SRR. Η σχέση εξάρτησης του μ_{eff} με τη συχνότητα απεικονίζεται στο σχήμα 2.11 (γ). Η ανωτέρω εξίσωση περιγράφει το πιο απλό SRR μοντέλο και

δεν λαμβάνει υπόψη τη μικρή ηλεκτρική πόλωση που επηρεάζει την ενεργό διηλεκτρική σταθερά.

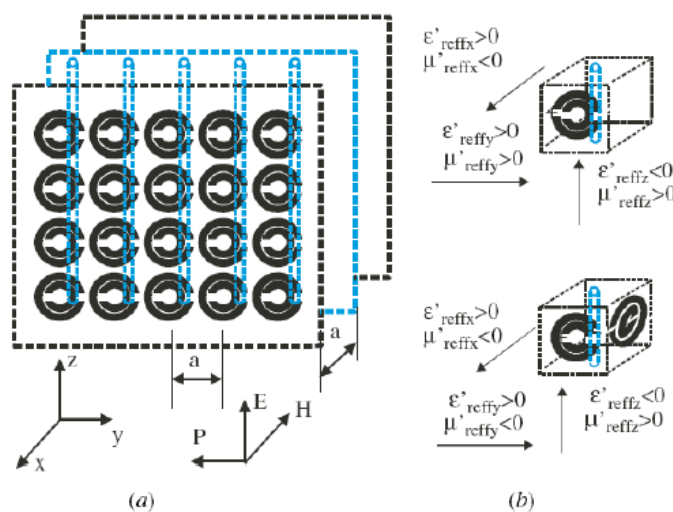


Εικόνα 2.12: (α) Διάταξη των SRRs (β) Επάνω απεικόνιση: Μονοδιάστατο μοναδιαίο κελί, Κάτω απεικόνιση: Δισδιάστατο μοναδιαίο κελί (γ) Ενεργός μαγνητική διαπερατότητα που αναπαρίσταται με συνεχή γραμμή το πραγματικό και με διακεκομμένη το φανταστικό μέρος [1].

Στην περίπτωση που το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου του προσπίπτοντος επίπεδου κύματος και το SRR είναι κάθετα, θα προκληθούν επαγόμενα ρεύματα που σταδιακά θα δημιουργήσουν την αρνητική μαγνητική διαπερατότητα. Τουναντίον, αν το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου και το SRR είναι παράλληλα, δεν μπορούν να προκληθούν επαγόμενα ρεύματα και έτσι η παρουσία του SRR δεν επηρεάζει την ενεργό μαγνητική διαπερατότητα.

2.5.3 DNG μεταλλικό με λεπτούς αγωγούς και SRRs

Το πρώτο ENG μεταλλικό ήταν ένας συνδυασμός της ENG δομής με λεπτούς αγωγούς και της MNG δομής με SRRs, που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.13 : (α) DNG μεταλλικό βασισμένο σε λεπτούς αγωγούς και SRRs (β) Επάνω Απεικόνιση: Μονοδιάστατο μοναδιαίο κελί, Κάτω απεικόνιση: Δισδιάστατο μοναδιαίο κελί [1]

Θεωρήθηκε ότι το νέο σύνθετο μέσο παρουσίαζε μακροσκοπική διηλεκτρική σταθερά που ισούταν με το MNG μέσο με SRRs και αμελούνταν οι επιδράσεις μεταξύ των αγωγών και των SRRs. Με το συγκεκριμένο μοντέλο, ένα δισδιάστατο μεταλλικό περιγράφεται από μια βαθμωτή μακροσκοπική διηλεκτρική σταθερά που οφείλεται στους λεπτούς αγωγούς και από μια μακροσκοπική μαγνητική διαπερατότητα που έχει τη μορφή ενός 2×2 μονοαξονικού τανυστή που οφείλεται στα SRRs. Το δισδιάστατο DNG μεταλλικό είναι είτε μαγνητικά ανισοτροπικό (πάνω απεικόνιση σχήματος 2.13 b), είτε μαγνητικά ισοτροπικό (κάτω απεικόνιση σχήματος 2.13 b)

2.6 Εφαρμογές Μεταλλικών

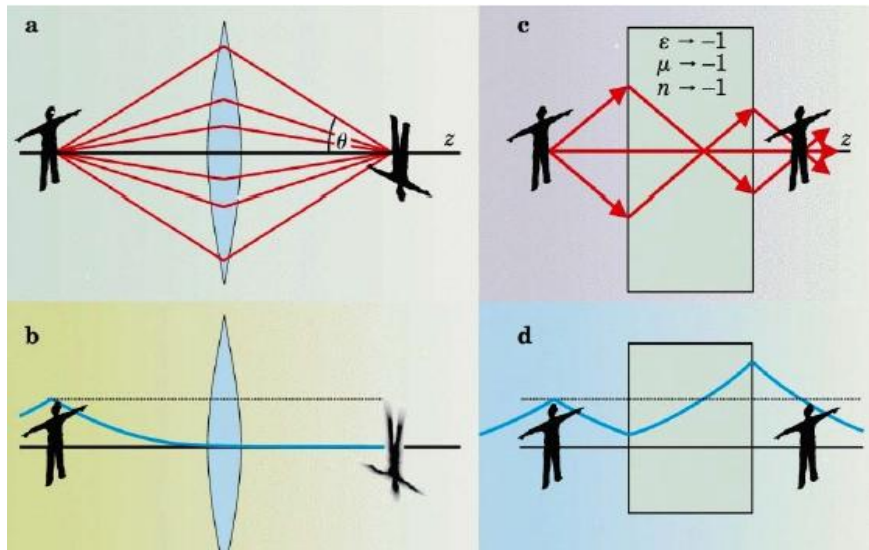
2.6.1 Τέλειος φακός Pendry

Ο τέλειος φακός είναι μια από τις πιο σημαντικές ιδέες που έχουν προταθεί για τη χρήση των μεταλλικών. Αυτός που συνέλαβε την ιδέα ήταν ο βρετανός John Pendry κατά το έτος 2000, στην προσπάθεια του να αυξήσει τη διακριτική ικανότητα των φακών.

Σύμφωνα με την οπτική Fourier, η ανάλυση που μπορεί να δώσει κάθε συνήθης φακός περιορίζεται από το όριο περίθλασης. Η αναλυτικότητα των φακών μπορεί να περιοριστεί και από κατασκευαστικούς παράγοντες και έχει ως κατώτατο όριο, εφόσον οι ανωτέρω περιορισμοί εξαλειφθούν, το ελάχιστο μήκος κύματος που μπορεί να συλλάβει το ανθρώπινο μάτι, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή του οπτικού φάσματος. Απόρροια αυτού είναι η συμπεριφορά του φακού σαν ένα δισδιάστατο φίλτρο (2D BPF – Band Pass Filter) στη συχνότητα. Οι αρμονικές που βρίσκονται εκτός της περιοχής διέλευσης δεν συλλαμβάνονται από τα αισθητήρια όργανα, λόγω του μεγάλου συντελεστή εξασθένισης.

Η κατασκευή του τέλειου φακού βασίζεται στη χρήση μιας προσαρμοσμένης πλάκας DNG υλικού ($\epsilon = \mu = -1$), που θα ενισχύσει τα φθίνοντα, με αποτέλεσμα να υπερβεί το όριο περίθλασης. Εξαιτίας του αρνητικού δείκτη διάθλασης ($n = -1$), τα διαδιδόμενα κύματα που εκπέμπονται από την πηγή θα εστιάζονται. Με χρήση των φαινομένων αυτών θεωρητικά επιτυγχάνεται τέλεια διακριτική ικανότητα. Συγκεκριμένα, όλες οι πληροφορίες που εκπέμπονται από την πηγή, συλλέγονται στο επίπεδο ειδώλου.

Οι ακτίνες υφίστανται αρνητική διάθλαση μέσα στην πλάκα, για το λόγο αυτό συγκλίνουν σε ένα εστιακό σημείο μέσα και σε ένα έξω από αυτήν. Η μεταβολή φάσης που υφίσταται το διαδιδόμενο κύμα μπορεί να ισοσκελιστεί από την αντίθετη μεταβολή φάσης που προκαλείται από την πλάκα. Με κατάλληλη επιλογή της θέσης της πλάκας ως προς τη θέση της πηγής επιτυγχάνεται ο καθορισμός των θέσεων των σημείων εστίασης.



Εικόνα 2.14: a) Οι συμβατικοί φακοί χρειάζονται ένα μεγάλο άνοιγμα για να διαθλώνται οι ακτίνες σε μεγάλες γωνίες θ . Παρόλα αυτά, η διακριτική ικανότητα περιορίζεται από το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται. b) Οι συνιστώσες Fourier της εικόνας που απουσιάζουν, περιλαμβάνονται στο κοντινό οπτικό πεδίο, το οποίο μειώνεται εκθετικά (μπλε καμπύλη) και έχει αμελητέα συνεισφορά στο είδωλο. c) Ένας φακός που κατασκευάζεται από μια λεπτή διαφανή πλάκα ενός υλικού με αρνητικό δείκτη εστιάζει τις ακτίνες. d) Ο φακός ενισχύει το κοντινό οπτικό πεδίο προκειμένου να συνεισφέρει στο σχηματισμό ειδώλου [25].

2.6.2 Κεραίες μεταλλικών και μικροκυματικά φίλτρα

Με τη διεξαγωγή ποικίλων πειραμάτων οδηγηθήκαμε στην παραδοχή ότι η χρήση των DNG μέσω βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά των κεραιών.

Ορισμένα από αυτά είναι:

- Η σμίκρυνση του μεγέθους την κεραίας έως και 90%
- Η μείωση του κόστους
- Η αύξηση του εύρους ζώνης
- Η βελτίωση της αποδοτικότητας

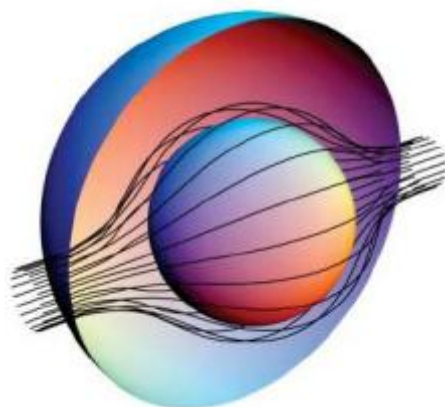
Επιπλέον η συνεισφορά των μεταλλικών σε μικροκυματικές διατάξεις είναι ουσιαστική, καθώς:

- Κατασκευάζονται μικρές και συμπαγείς διατάξεις
- Εξασφαλίζεται καλύτερη προσαρμογή διατάξεων με τα υπόλοιπα τμήματα του μικροκυματικού δικτύου, χάρη στην ιδιότητα των DNG μεταλλικών να διαθέτουν αρνητική χαρακτηριστική αντίσταση. Επιτυγχάνεται καλύτερη συμπεριφορά διατάξεων, καθώς είναι δυνατόν να μεταβάλλουμε την κατευθυντικότητα μιας κεραίας χωρίς να μεταβάλλουμε το μέγεθος της

2.6.3 Μανδύας αορατότητας

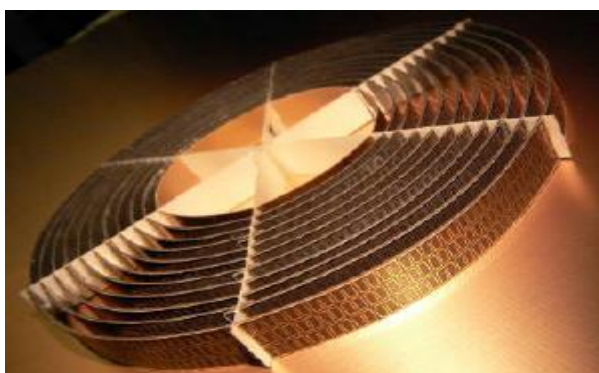
Μια άλλη εφαρμογή των μεταλλικών, που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ο «αόρατος μανδύας», με τη χρήση του οποίου δεν θα γίνονται ορατά τα αντικείμενα με γυμνό μάτι. Η πλήρης υλοποίηση του δεν έχει ακόμη επιτευχθεί, παρόλα αυτά έχει επιτευχθεί αορατότητα σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.

Η έννοια της αορατότητας είναι στενά συνδεδεμένη με το cloaking. Cloaking είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα αντικείμενο, είναι μερικώς ή πλήρως αόρατο σε τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Υπάρχουν και κάποιες άλλες μέθοδοι, όπως η χρήση τεχνητών ηλεκτρομαγνητικών επιφανειών, οι οποίες επιτρέπουν να κρύβονται αντικείμενα ορισμένων ειδικών σχημάτων για μία μόνο κατεύθυνση πρόσπτωσης, ή με τη χρήση των πλασμονικών δομών συντονισμού. Παρόλα αυτά, η επιστήμη εστιάζει στη μέθοδο cloaking.



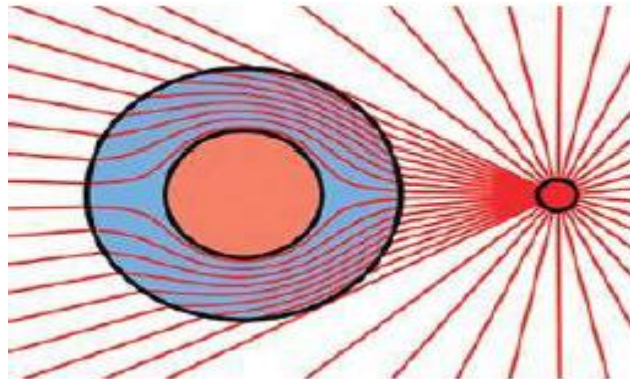
Εικόνα 2.15: Cloaking σφαιρικού αντικειμένου [16].

Με τη χρήση των DNG υλικών θα ήταν δυνατό να κατευθυνθούν οι ακτίνες από πηγές ακόμη και γύρω από ένα αντικείμενο. Αν περιοριστούν και οι ανακλάσεις με προσαρμογή στην χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του μέσου διάδοσης, τότε το αντικείμενο καθίσταται ουσιαστικά αόρατο στα αισθητήρια που λειτουργούν στις συχνότητες διάδοσης των συγκεκριμένων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.



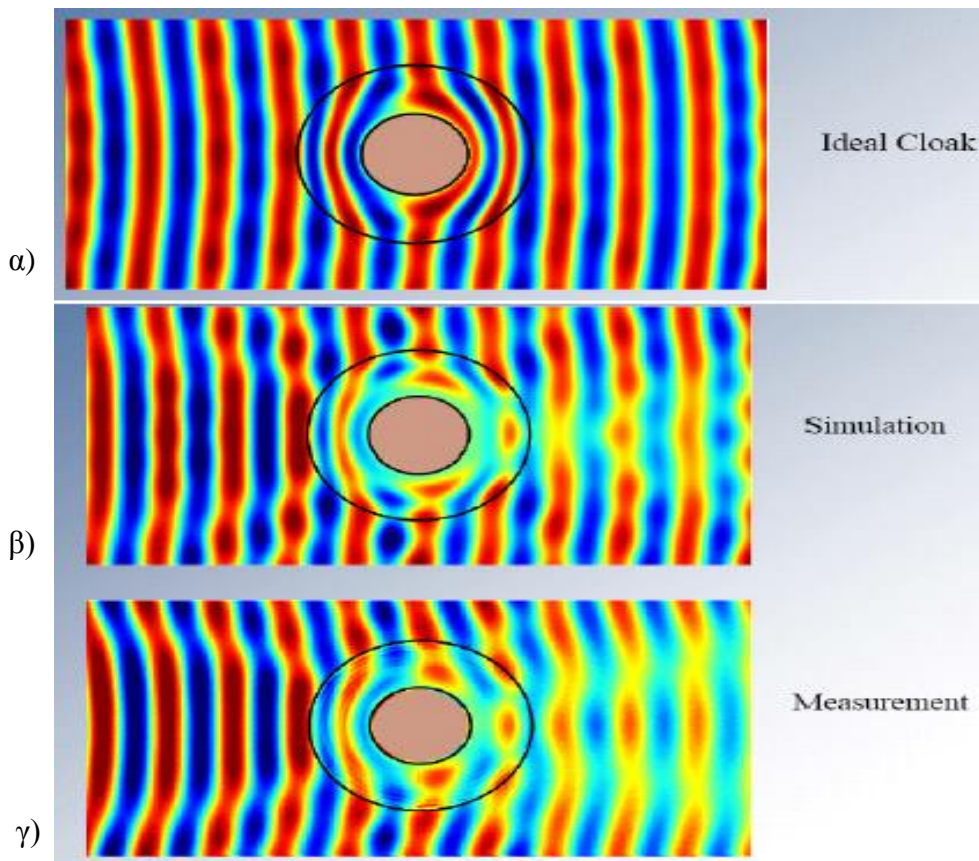
Εικόνα 2.16: Δομή από μεταϊλικό η οποία συνθέτει το ‘μανδύα αορατότητας’ (invisibility cloak) που χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές του Πανεπιστημίου Duke [17].

Θα μπορούσε ένα αντικείμενο να θεωρηθεί αόρατο, όταν δεν ανακλά κύματα, δεν σκεδάζει κύματα προς άλλες κατευθύνσεις και δεν δημιουργεί σκιά (δηλαδή δεν υπάρχει διασπορά με κατεύθυνση προς τα εμπρός). Τέλος, το αντικείμενο δεν θα πρέπει να απορροφά οποιαδήποτε ενέργεια.



Εικόνα 2.17: Θεωρητική λειτουργία ‘μανδύα αορατότητας’: κάμψη ακτινών γύρω από ένα αντικείμενο, ώστε να φαίνεται σαν ο θεατής να βλέπει απευθείας διαμέσου του αντικειμένου [18].

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται η μορφή της δέσμης σε έναν ιδανικό ‘μανδύα’, καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της μέτρησης του ‘μανδύα’ που κατασκεύασαν οι ερευνητές του Πανεπιστημίου Duke. Τέτοιοι ‘μανδύες’ θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε ασύρματες επικοινωνίες και εφαρμογές ραντάρ.



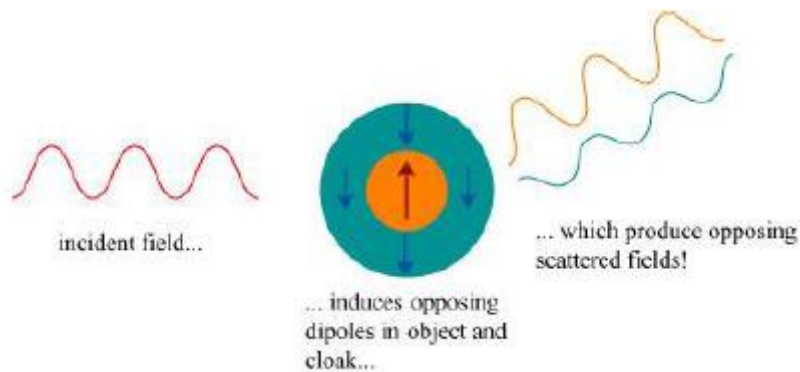
Εικόνα 2.18: Μορφή δέσμης σε έναν ιδανικό ‘μανδύα’ (ideal cloak), αποτελέσματα προσομοίωσης (Simulation) και μέτρησης (Measurement) του ‘μανδύα’ του 2.18 β) που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές του Πανεπιστημίου Duke [19].

2.6.4 Τεχνικές Σκέδασης

Κατά τη σκέδαση κυμάτων από ένα αντικείμενο η προσθήκη ενός άλλου αντικειμένου στο σύστημα ελαττώνει τη συνολική σκέδαση του συστήματος, η

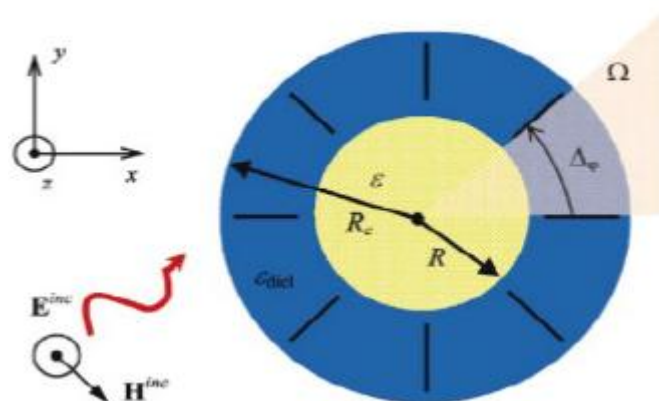
σκέδαση του οποίου δρα συμπληρωματικά εν συγκρίσει με τον κύριο σκεδαστή. Αυτός ο τύπος μείωσης της σκέδασης μπορεί να πραγματοποιηθεί, με την κάλυψη του κυρίως αντικειμένου από μία ή πολλαπλές στρώσεις διηλεκτρικού υλικού.

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της αρχής ακύρωσης της σκέδασης. Ένα σφαιρικό διηλεκτρικό αντικείμενο με μεγαλύτερη ηλεκτρική επιδεκτικότητα από το περιβάλλον μέσο καλύπτεται από ένα διηλεκτρικό περίβλημα με ηλεκτρική επιδεκτικότητα μικρότερη σε σχέση με το περιβάλλον μέσο. Η διάμετρος του περιβλήματος επιλέγεται με κριτήριο την αλληλοακύρωση της σκέδασης του πυρήνα και του περιβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι διπολικές ροπές έχουν αντίθετο πρόσημο.



Εικόνα 2.19: Αρχή διατήρησης σκέδασης [20].

Έχει προταθεί ο σχεδιασμός ενός μανδύα ακύρωσης σκέδασης, ο οποίος συγκροτείται από μεταλλικά εμφυτεύματα λεπτών πλακών παράλληλων μεταξύ τους. Αυτές τοποθετούνται ακτινωτά γύρω από την κυλινδρική περιοχή που είναι τοποθετημένο ένα διηλεκτρικό αντικείμενο. Αυτή η δομή αποτελεί παράδειγμα μιας διάταξης ακύρωσης σκέδασης, η οποία αποτελείται από ένα τεχνητό μεταύλικό και παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2.20: Παράδειγμα σχεδιασμού μιας συσκευής ακύρωσης σκέδασης, η οποία αποτελείται από μεταλλικές παράλληλες πλάκες, ενσωματωμένες σε ένα διηλεκτρικό. Το αντικείμενο που πρέπει να γίνει αόρατο είναι ένας διηλεκτρικός κύλινδρος. [21].

Η ακύρωση σκέδασης συνεισφέρει στην υλοποίηση του μανδύα αορατότητας, καθώς είναι απλούστερη σε σχεδίαση και δομή (με την προϋπόθεση ότι τα υλικά με

τις επιθυμητές ιδιότητες είναι διαθέσιμα), με ιστροπικά και ομοιογενή υλικά. Παρόλα αυτά, ανάλογα με το είδος του αντικειμένου που πρέπει να γίνεται άρατο απαιτείται να υλοποιηθούν τα μεταυλικά με τις ανάλογες ιδιότητες.

2.7 Υπολογιστική μοντελοποίηση διατάξεων

2.7.1 Αριθμητικές μέθοδοι στα μεταυλικά

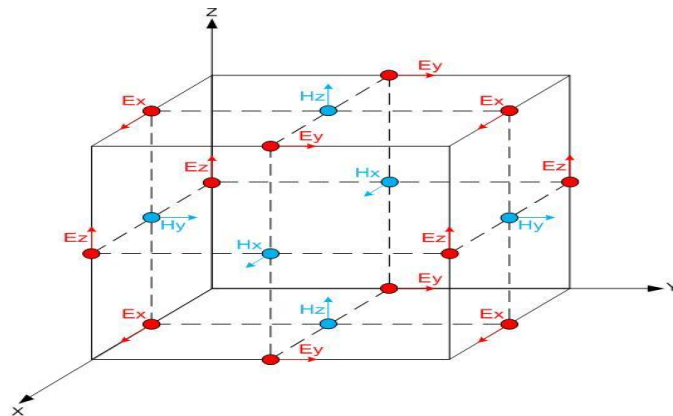
Ποικίλες αριθμητικές μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί ότι για την αριθμητική μελέτη της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα μεταυλικά. Οι πιο δημοφιλείς παρατίθενται στην συνέχεια.

- **Μέθοδος επίπεδου κύματος (Plane - Wave Method):** Η συγκεκριμένη μέθοδος αφορά κυρίως τον υπολογισμό της καμπύλης διασποράς σε διηλεκτρικά, μη μαγνητικά και χωρίς απώλειες μέσα. Με τη μετατροπή του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος σε πρόβλημα ιδιοτιμών, που έχει ως λύσεις τις ιδιοσυχνότητες $\omega(\vec{k})$ για κάθε κυματικό διάνυσμα \vec{k} υπολογίζουμε τη σχέση διασποράς.
- **Η μέθοδος του πίνακα μεταφοράς (Transfer Matrix Method):** Η παρούσα μέθοδος επικεντρώνεται σε συγκεκριμένη συχνότητα $(\vec{k}) = \vec{k}(\omega)$ και στοχεύει στην εκτίμηση των στατικών ιδιοτήτων σκέδασης, δηλαδή της μιγαδικής συνάρτησης μεταφοράς (t) και ανάκλασης (r) μιας πεπερασμένης πλάκας μεταυλικού.
- **Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method):** Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στη τμηματοποίηση ενός χωρίου, στο οποίο αναζητούμε τη λύση μιας διαφορικής εξίσωσης, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που θέτουν οι οριακές συνθήκες σε πεπερασμένα στοιχεία ενός απλοϊκού γεωμετρικού σχήματος.
- **Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time-Domain Method):** Η μέθοδος αυτή επιλύει τις εξισώσεις του Maxwell στο πεδίο του χρόνου, με αποτέλεσμα ο υπολογισμός των τιμών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου να πραγματοποιείται σε διακριτά βήματα στον χρόνο. Σημαντικό πλεονέκτημα της παρούσας μεθόδου είναι η αυξανόμενη αποτελεσματικότητα της, καθώς εκτείνεται το μέγεθος του προβλήματος.

2.7.2 Μέθοδος FDTD

Με τη μέθοδο FDTD τόσο ο χρόνος όσο και ο χώρος τμηματοποιούνται σε διακριτά διαστήματα. Οι τρεις διαστάσεις του χώρου διακριτοποιούνται σε κελιά σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, τα οποία ονομάζονται κελιά Yee και είναι η βάση της FDTD μεθόδου. Από την ακόλουθη εικόνα γίνεται εμφανές το γεγονός ότι

οι ηλεκτρικές συνιστώσες εντοπίζονται στις ακμές του κελιού, ενώ οι μαγνητικές στις πλευρές, δηλαδή χωρικά βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις.



Εικόνα 2.21: Ηλεκτρομαγνητικές Συνιστώσες κελιού Yee [22].

Ο χρόνος διακριτοποιείται σε βήματα, όπου κάθε βήμα αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για να μεταβεί το πεδίο από το ένα κελί στο αμέσως επόμενο. Οι ηλεκτρομαγνητικές συνιστώσες μέσω μιας επαναλαμβανόμενης, αλλά σχετικά απλής διαδικασίας, ανανεώνονται και υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα. Ο συνδυασμός πολλών κελιών για το σχηματισμό ενός τρισδιάστατου μοντέλου αναφέρεται ως πλέγμα FDTD.

2.7.3 Μέθοδος FDTD τριών διαστάσεων

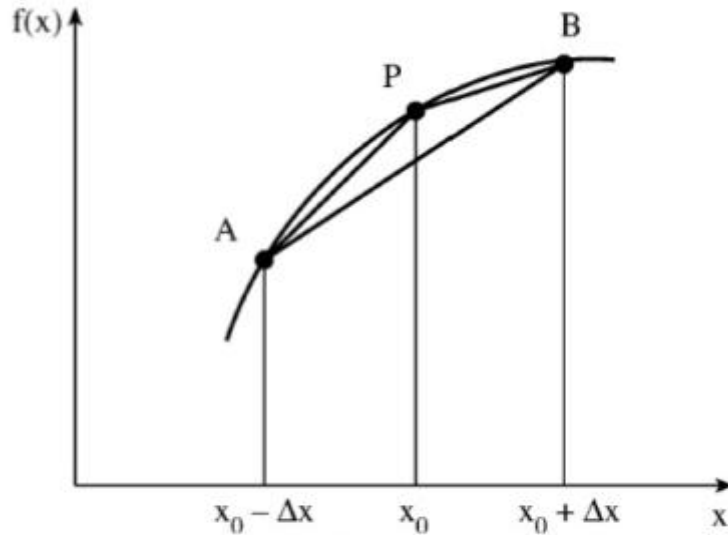
Η κεντρική ιδέα της μεθόδου FDTD στηρίζεται στη προσέγγιση της παραγώγου μιας συνάρτησης με μια παράσταση κεντρικών διαφορών. Για την προσέγγιση της πρώτης παραγώγου επιλέγεται η ακόλουθη έκφραση με ακρίβεια β' τάξης:

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (2.8)$$

Οπότε, για τη χρονική παράγωγο, η προσέγγιση πραγματοποιείται ως εξής:

$$\frac{\partial \phi(r, t)}{\partial t} = \frac{\phi\left(r, t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \phi\left(r, t - \frac{\Delta t}{2}\right)}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Η ακόλουθη γραφική παράσταση παρουσιάζει τη λογική των ανωτέρω προσεγγίσεων.



Εικόνα 2.22: Προσέγγιση κεντρικών διαφορών β' τάξης [24].

Τέλος, τη χωρική παράγωγο μιας συνάρτησης ως προς x τη προσεγγίζουμε ως ακολούθως:

$$\frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial x} = \frac{\phi\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y, z\right) - \phi\left(x - \frac{\Delta x}{2}, y, z\right)}{\Delta x} \quad (2.10)$$

2.7.4 Εφαρμογή της μεθόδου FDTD στις εξισώσεις Maxwell

Στην παρακάτω μαθηματική ανάλυση της μεθόδου FDTD, θα θεωρήσουμε τους ακόλουθους συμβολισμούς:

- Ο συμβολισμός ενός χωρικού σημείου σε ένα ομοιόμορφο πλέγμα είναι $(i, j, k) \rightarrow (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ (2.11) όπου Δx , Δy και Δz είναι η χωρική διαμέριση κατά μήκος των αξόνων x , y , z αντίστοιχα.
- Η συνάρτηση u του χώρου και του χρόνου, υπολογιζόμενη σε διακριτά σημεία του χώρου και του χρόνου συμβολίζεται ως ακολούθως:

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad (2.12)$$

Στα γραμμικά, ιστροπικά υλικά χωρίς διασπορά κάνουμε χρήση των ακόλουθων σχέσεων:

$$B = \mu \cdot H \quad (2.13)$$

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (2.14)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα [H / μ] και ε η διηλεκτρική σταθερά [F/m]. Στην περίπτωση που τα υλικά που εξετάζουμε παρουσιάζουν ηλεκτρικές ή μαγνητικές απώλειες ορίζουμε ένα ισοδύναμο μαγνητικό ρεύμα που αντιστοιχεί

στους μηχανισμούς μαγνητικών απωλειών $J_m = \rho' \cdot H$ και ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο αντιστοιχεί στους μηχανισμούς ηλεκτρικών απωλειών $J_e = \sigma \cdot E$, όπου ρ' είναι η ισοδύναμη ειδική μαγνητική αντίσταση [Ω/m] και σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα [S/m].

Οι εξισώσεις στροβιλισμού Maxwell με την βοήθεια των σχέσεων των ισοδύναμων ρευμάτων μετασχηματίζονται ως ακολούθως:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times E - \frac{\rho'}{\mu} H \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times H - \frac{\sigma}{\varepsilon} E \quad (2.16)$$

Με την ανάλυση των ανωτέρω σχέσεων σε βαθμωτές εξισώσεις, λαμβάνουμε τις ακόλουθες εξισώσεις, οι οποίες απευθύνονται σε ένα τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho' \cdot H_x \right) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \rho' \cdot H_y \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' \cdot H_z \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma \cdot E_x \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma \cdot E_y \right) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma \cdot E_z \right) \quad (2.22)$$

Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε τις προσεγγίσεις (2.9) και (2.10) στις εξισώσεις (2.17) και (2.22), με σκοπό να λάβουμε τις τιμές της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για το χρονικό βήμα n στο σημείο του πλέγματος (i, j, k) . Συνεπώς, η εξίσωση (2.17) θα λάβει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{H_x|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \left[\frac{E_y|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_y|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} - \frac{E_z|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - E_z|_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} \right] - \rho'_{i,j,k} \cdot H_x|_{i,j,k}^n \quad (2.23)$$

την ανωτέρω σχέση εμφανίζεται ο παράγοντας $H_x |_{i,j,k}^n$. Παρόλα αυτά, λόγω του ότι τη χρονική στιγμή n δεν έχει υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο, χρησιμοποιούμε τη

$$\text{προσέγγιση } H_{i,j,k}^n = \frac{H_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{2}.$$

Συνεπώς, μετά την εκτέλεση των πράξεων προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$H_x |_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}} \cdot H_x |_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}} \left[\frac{E_y |_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_y |_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} - \frac{E_z |_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - E_z |_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} \right] \quad (2.24)$$

$$H_y |_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}} \cdot H_y |_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}} \left[\frac{E_z |_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - E_z |_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} - \frac{E_x |_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_x |_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} \right] \quad (2.25)$$

$$H_z |_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}} \cdot H_z |_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j,k}}} \left[\frac{E_x |_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - E_x |_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} - \frac{E_y |_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - E_y |_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} \right] \quad (2.26)$$

$$E_x |_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}} \cdot E_x |_{i,j,k}^n + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}} \left[\frac{H_z |_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z |_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_y |_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y |_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right] \quad (2.27)$$

$$E_y |_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}} \cdot E_y |_{i,j,k}^n + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}} \left[\frac{H_x |_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_x |_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} - \frac{H_z |_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z |_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right] \quad (2.28)$$

$$E_z |_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}} \cdot E_z |_{i,j,k}^n + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j,k}}} \left[\frac{H_y |_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_y |_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - \frac{H_x |_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_x |_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \right] \quad (2.29)$$

Με τις ανωτέρω εξισώσεις είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τις τιμές των ηλεκτρικών και μαγνητικών συνιστωσών σε οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι η υπολογιζόμενη τιμή μιας συνιστώσας εξαρτάται μόνο από την προηγούμενη τιμή της, τις προηγούμενες τιμές των άλλων δύο συνιστωσών του πεδίου στα γειτονικά σημεία και από το ηλεκτρικό και μαγνητικό ρεύμα.

2.7.5 Συνοριακές Συνθήκες Απορρόφησης

Ένας σημαντικός περιορισμός της μεθόδου FDTD είναι ότι οι πολλές προς προσομοίωση γεωμετρίες περιλαμβάνουν μη φραγμένες περιοχές με άπειρα όρια, στις οποίες το χωρικό φάσμα των υπολογιζόμενων πεδίων δεν περιορίζεται κατά μία ή περισσότερες διευθύνσεις. Συνεπώς, λόγω του περιορισμένου χώρου αποθήκευσης δεδομένων των υπολογιστών, απαιτείται η εφαρμογή μιας κατάλληλης οριακής συνθήκης στο εξωτερικό σύνορο του χώρου για την προσομοίωση της έκτασης του χώρου ως το άπειρο. Υπάρχουν διάφορες συνοριακές συνθήκες, οι σημαντικότερες εκ των οποίων περιγράφονται στη συνέχεια.

Συνθήκη Liao: Η συνθήκη Liao είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη, καθώς ελαττώνει το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων που δημιουργούνται από τις ασυνέχειες που βρίσκονται στα οριακά σημεία. Επιπλέον, με τη συνθήκη αυτή υπολογίζεται το ηλεκτρικό πεδίο στα σύνορα της διάταξης, για την οποία εφαρμόζεται η μέθοδος FDTD. Για να ισχύει η συνθήκη και να μειωθούν σημαντικά οι ανακλάσεις στα τοιχώματα της διάταξης, απαιτείται ο αγωγός και το διηλεκτρικό που περικλείει τη διάταξη να βρίσκονται σε απόσταση τουλάχιστον 10 κελιών.

Συνθήκη Mur: Η συνθήκη Mur πρώτης τάξης υπολογίζει το πεδίο στο σύνορο με τιμές της προηγούμενης χρονικής στιγμής και του πρώτου γειτονικού σημείου του συνόρου και αποτελεί την πιο απλή μορφή απορροφητικής συνθήκης που υπάρχει.

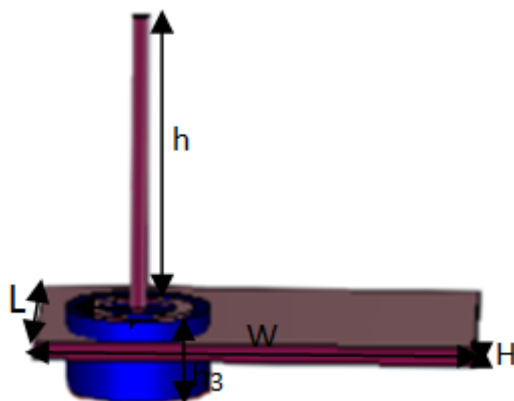
Τέλεια προσαρμοσμένο στρώμα PML (Perfectly Matched Layer): Η απορροφητική συνθήκη PML ικανοποιεί με μεγάλη ακρίβεια την ανάγκη για προσομοίωση του άπειρου χώρου χάρη στις τεχνητές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες. Η καινοτομία της μεθόδου οφείλεται στην αντιστάθμιση των επίπεδων κυμάτων αυθαίρετης πρόσπτωσης, πόλωσης και συχνότητας με το σύνορο της γεωμετρίας που προσομοιώνουμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η σχεδίαση των κεραιών που μελετήθηκαν και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκτελέστηκαν πολλές προσομοιώσεις, προκειμένου να διερευνηθεί ο τρόπος λειτουργίας ορισμένων κεραιών υπό την επίδραση διαφόρων διατάξεων μεταλλικών. Θα διαπιστωθεί ότι η προσθήκη των αριστερόστροφων υλικών επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά των κεραιών και τα χαρακτηριστικά τους.

3.1 Μικρή ηλεκτρικά κεραία - Ανάλυση κεραίας

Η προτεινόμενη κεραία [4] που έχουμε μελετήσει και προσομοιώσει, βασίζεται στην απλή μονοπολική κεραία και αποτελείται κυρίως από έναν εσωτερικό αγωγό ενός ομοαξονικού καλωδίου. Το εσωτερικό καλώδιο είναι μήκους h και ακτίνας r . Ένα τμήμα του εσωτερικού καλωδίου περιβάλλεται από ομοαξονικό καλώδιο που αποτελείται από ένα εύκαμπτο σωληνοειδές στρώμα, υλικού Teflon, το οποίο με τη σειρά του περιβάλλεται από ένα σωληνωτό αγωγίμο πλέγμα. Η όλη διάταξη του ομοαξονικού καλωδίου καλύπτεται από ένα κυλινδρικό Teflon φύλλο, μήκους h_3 και ακτίνας r_3 . Το επίπεδο γείωσης της κεραίας είναι μήκους W , με πλάτος L και πάχους H .



Εικόνα 3.1: Γεωμετρία προτεινόμενης κεραίας.

Στον πίνακα που ακολουθεί παραθέτουμε τις βασικές παραμέτρους της γεωμετρίας της κεραίας.

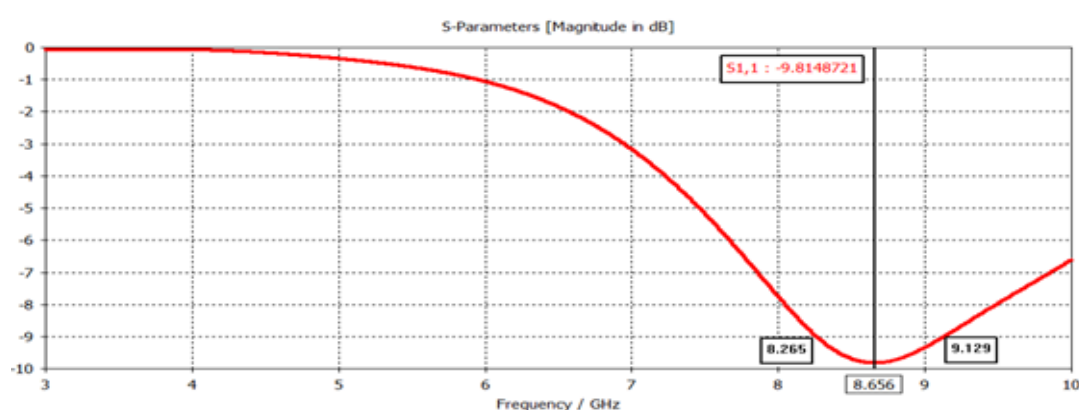
Πίνακας 1: Βασικές παράμετροι κεραίας.

Επίπεδο Γείωσης	Εσωτερικό Καλώδιο	Σωληνοειδές Στρώμα	Σωληνωτό Πλέγμα	Κυλινδρικό Φύλλο
$W = 17.285 \text{ mm}$	$h = 10.62 \text{ mm}$	$h_1 = 2.3 \text{ mm}$	$h_2 = 2.3 \text{ mm}$	$h_3 = 2.3 \text{ mm}$
$H = 0.5 \text{ mm}$	$r = 0.245 \text{ mm}$	$r_1 = 1.325 \text{ mm}$	$r_2 = 1.805 \text{ mm}$	$r_3 = 2.285 \text{ mm}$
$L = 7.5 \text{ mm}$	-	-	-	-

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Οι προσομοιώσεις όλων των διατάξεων που θα παρουσιαστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του εμπορικά διαθέσιμου λογισμικού CST STUDIO SUITE. Το λογισμικό αυτό είναι κατάλληλο για το σχεδιασμό, την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων και χαρακτηρίζεται από ακρίβεια, ταχύτητα και ευχρηστία.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κεραίας, σχετικά με την υπολογισμένη απώλεια επιστροφής σε dB. Η κεραία επιτυγχάνει απώλεια επιστροφής -9.81 dB στη συχνότητα 8.656 GHz. Επιπλέον, από την προσομοίωση του αντίστοιχου διαγράμματος προέκυψε ότι το κέρδος της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού είναι $G = 1.87$ dB και η κατευθυντικότητα της ισούται με $D = 1.83$ dBi.



Εικόνα: 3.2 Διάγραμμα απώλειας επιστροφής – συχνότητας κεραίας.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πινάκας 2: Ζώνη λειτουργίας της κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	9 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
8.656	8.265 – 9.129 GHz	864	9.98

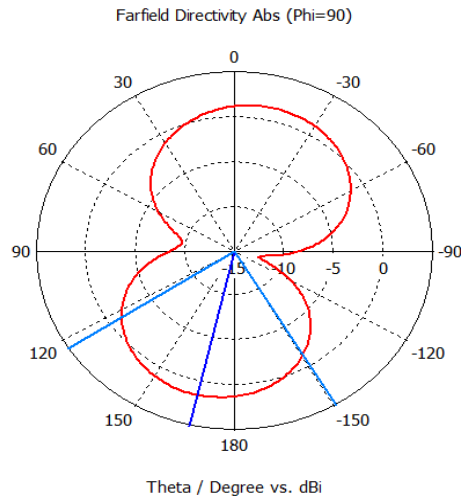
Για τον υπολογισμό του % εύρους ζώνης, χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$BW = \frac{(f_2 - f_1)}{f_0} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

όπου f_0 είναι η κεντρική συχνότητα ή η συχνότητα που η παράμετρος S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της, f_1 και f_2 αντίστοιχα, είναι οι συχνότητες που η παράμετρος S_{11} είναι ίση με -9dB.

3.1.2 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Στην εικόνα 3.3, παρουσιάζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας σε πολική μορφή ως προς το επίπεδο xz για τη συχνότητα 8.656 GHz.

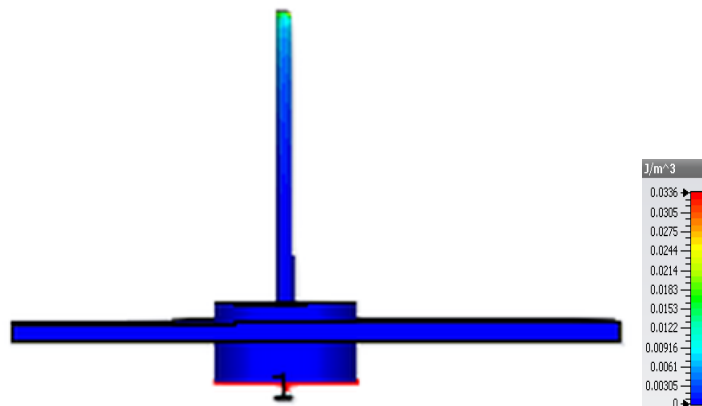


Εικόνα 3.3: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή στη συχνότητα 8.656 GHz.

Από το ανωτέρω διάγραμμα πληροφορούμαστε ότι το μέγεθος και η κατεύθυνση του κύριου λοβού αναλογούν στις τιμές 1.49 dBi και 167.0 deg αντίστοιχα.

Μέση πυκνότητα ηλεκτρικής ενέργειας

Στο σχήμα 3.4, παρουσιάζεται η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας της κεραίας για τη συχνότητα 8.656 GHz. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η ηλεκτρική ενέργεια συγκεντρώνεται κυρίως στο άνω τμήμα του εσωτερικού καλωδίου.

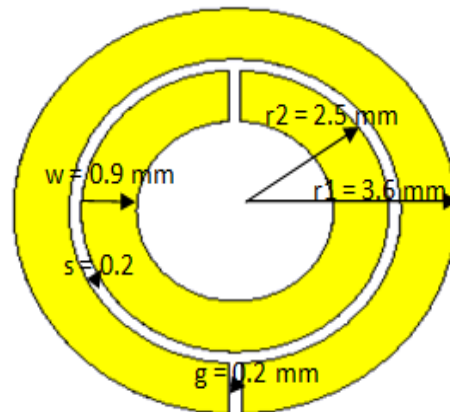


Εικόνα 3.4: Μέση πυκνότητα ηλεκτρικής ενέργειας για συχνότητα 8.656 GHz.

3.1.1 Κεραία με υπόστρωμα μεταλλικών

Λόγοι βελτιστοποίησης της συμπεριφοράς της κεραίας, ώθησαν στην προσθήκη ενός τυπωμένου SRR στο υπόστρωμα της. Το διηλεκτρικό υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό της κεραίας ήταν FR-4 (lossy) με πάχος 1.6 mm, το οποίο παρουσιάζει διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 3.5$ και με εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0.025$. Η δομή που επιλέχθηκε είναι ένα συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου (Split Ring Resonator), ο οποίος παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5. Το μέγεθος είναι $0.095\lambda_0 \times 0.100\lambda_0$, όπου λ_0 το μήκος κύματος στον αέρα. Η συγκεκριμένη κεραία

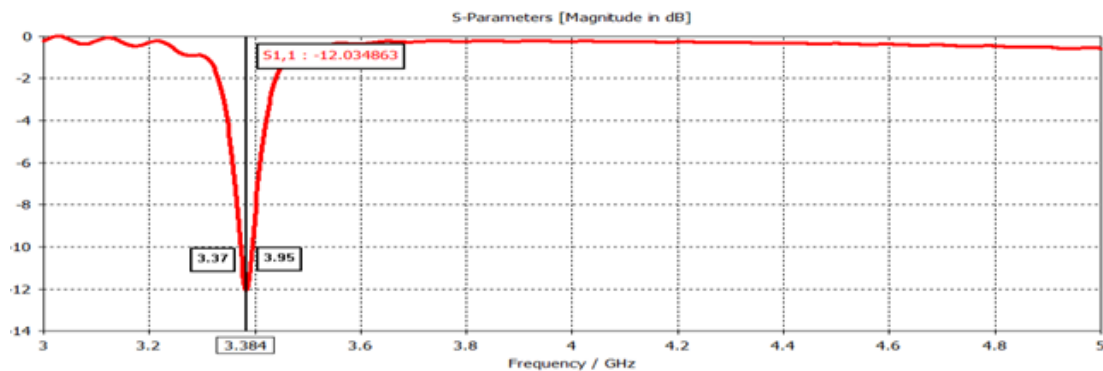
μελετήθηκε και αναλύθηκε στην επιστημονική μελέτη των Kamil Boratay Alici and Ekmel Ozbay [4].



Εικόνα: 3.5: Δομή συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα απώλειας επιστροφής - συχνότητας. Η προσομοίωση των συχνοτήτων πραγματοποιήθηκε για το εύρος από 3 – 5 GHz. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η κεραία παρουσιάζει ελάχιστη απώλεια επιστροφής (return loss) -12.035 dB στη συχνότητα 3.384 GHz.



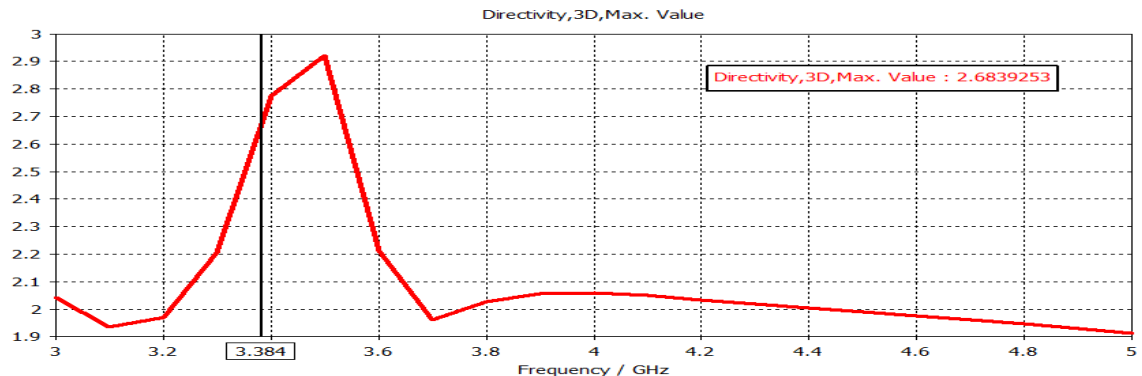
Εικόνα 3.6: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής - συχνότητας της κεραίας υπό την επίδραση μιας διάταξης μεταλλικών.

Παρατηρούμε ότι με την εισαγωγή των μεταλλικών ελαττώνεται σε ποσοστό 155.8% η συχνότητα, όπου η παράμετρος S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή. Συμπεραίνουμε ότι η προτεινόμενη αλλαγή στη γεωμετρία έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά της κεραίας. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πινάκας 3: Η ζώνη λειτουργίας της κεραίας υπό την επίδραση μιας διάταξης μεταλλικών.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	9 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
3.384	3.337 – 3.395 GHz	25	0.325

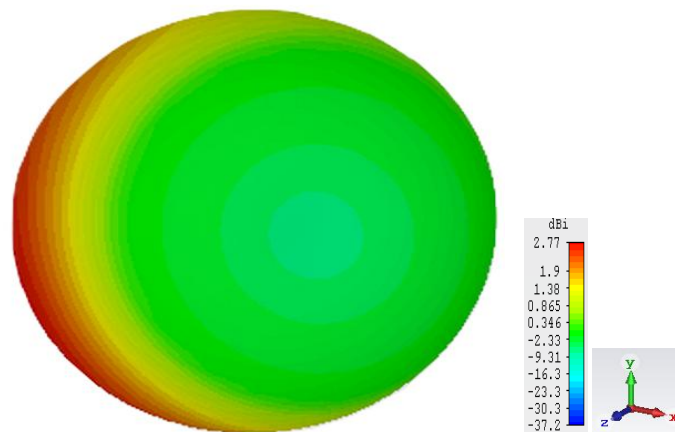
Η κατευθυντικότητα της κεραίας για τη συχνότητα 3.384 GHz αντιστοιχεί στην τιμή $D = 2.68$ dBi και η μέγιστη κατευθυντικότητα που παρατηρείται (εικόνα 3.7) για τη συχνοτική περιοχή από 3 – 5 GHz είναι στα 3.5 GHz, με τιμή $D_{\max} = 2.922$ dBi.



Εικόνα 3.7: Διάγραμμα κατευθυντικότητας - συχνότητας της κεραίας υπό την επίδραση μιας διάταξης μεταλλικών.

Διάγραμμα ακτινοβολίας

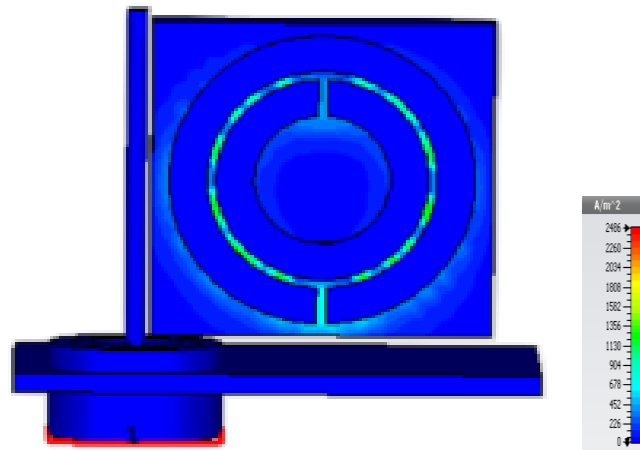
Στην εικόνα 3.8, προβάλλεται το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας σε τρισδιάστατη μορφή για τη συχνότητα συντονισμού.



Εικόνα 3.8: 3-D διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας υπό την επίδραση μιας διάταξης μεταλλικών.

Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ρεύματος

Η ρευματική κατανομή της κεραίας παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα (σχήμα 3.9). Το ρεύμα συγκεντρώνεται κυρίως ενδιάμεσα των συντονιστών διακεκομμένου δακτυλίου (SRR).



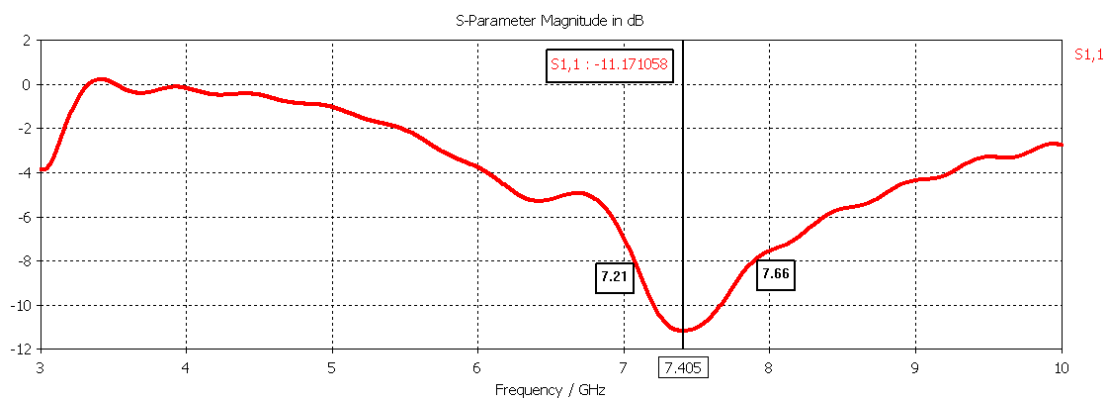
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ρεύματος της κεραίας υπό την επίδραση μιας διάταξης μεταλλικών.

3.1.3 Κεραία με τροποποιημένη γεωμετρία υποστρώματος και μεταλλικών

Με σκοπό την πληρέστερη μελέτη της συμπεριφοράς της κεραίας αυξήσαμε τις διαστάσεις του υποστρώματος και των τυπωμένων μεταλλικών σε ποσοστό 20% για την εξέταση πιθανών μεταβολών.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στη συνέχεια, οπτικοποιείται τα διάγραμμα απώλειας επιστροφής σε σχέση με τη συχνότητα, που προέκυψε έπειτα από την προσομοίωση της προτεινόμενης κεραίας.



Εικόνα 3.10: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής – συχνότητας κεραίας με κατά 20% αύξηση του υποστρώματος και της διάταξης των τυπωμένων μεταλλικών.

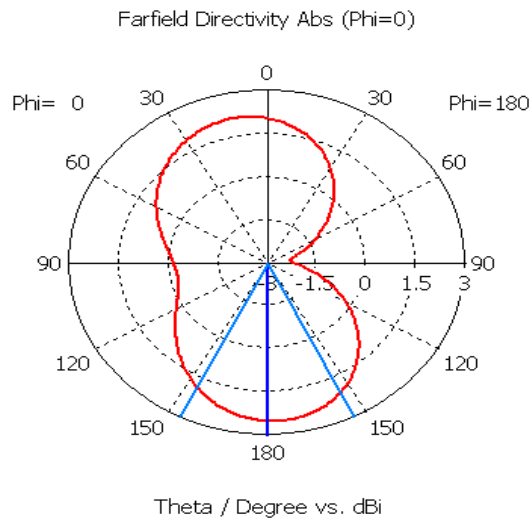
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα η απώλεια επιστροφής λαμβάνει την ελάχιστη τιμή στα 7.405 GHz. Λειτουργεί στην περιοχή μεταξύ των συχνοτήτων 7.21 GHz και 7.66 GHz, με εύρος 450 MHz. Παρατηρούμε ότι στη συχνότητα 3.384 GHz ο συντονισμός είναι πιο ασθενής στην κεραία.

Διαπιστώνουμε ότι μια μικρή ενίσχυση των διαστάσεων του υποστρώματος και των συντονιστών διακεκομμένου δακτυλίου, η συχνότητα συντονισμού αυξάνεται σε

ποσοστό 119%. Επιπλέον, σημειώνεται και μια σπουδαία άνοδος του εύρος ζώνης λειτουργίας της κεραίας. Συνεπώς, γίνεται εμφανής η σημασία της σωστής γεωμετρίας των μεταλλικών στη συμπεριφορά της κεραίας.

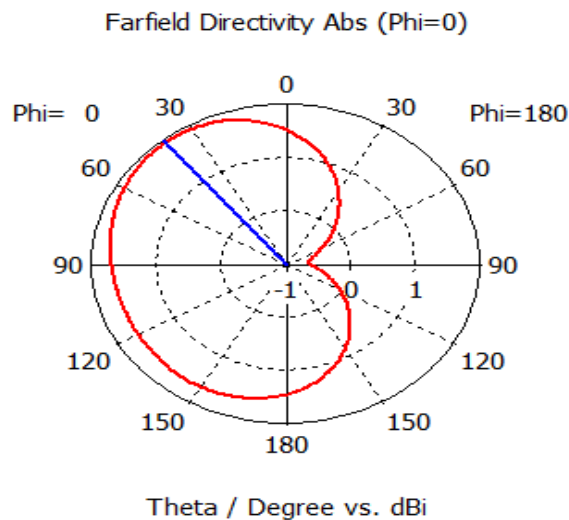
Διάγραμμα ακτινοβολίας

Από τις προσομοιώσεις διαπιστώσαμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας, ως προς το επίπεδο xz, της νέας κεραίας εν συγκρίσει με τη προηγούμενη διαφοροποιείται ως προς τη κατεύθυνση του κυρίου λοβού. Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή στη συχνότητα 7.405 GHz.



Εικόνα 3.11: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή στα 7.405 GHz της κεραίας με κατά 20% αύξηση του υποστρώματος και της διάταξης των τυπωμένων μεταλλικών.

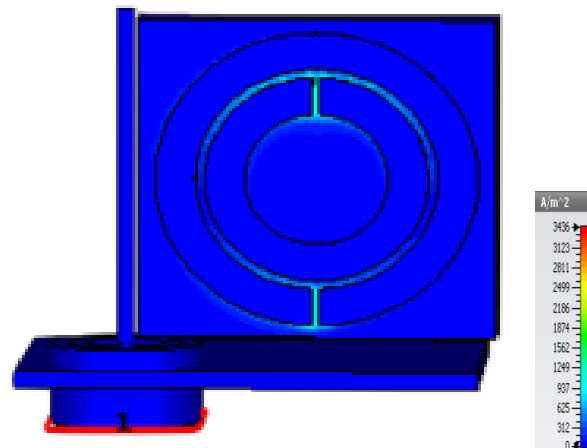
Στη συχνότητα 3.384 GHz, το πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας λαμβάνει την ακόλουθη μορφή (εικόνα 3.12). Το μέγεθος του κύριου λοβού είναι 1.94 dBi και η κατεύθυνση του αντιστοιχεί στην τιμή 39.0 deg.



Εικόνα 3.12: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή στα 3.384 GHz της κεραίας με κατά 20% αύξηση του υποστρώματος και της διάταξης των τυπωμένων μεταλλικών.

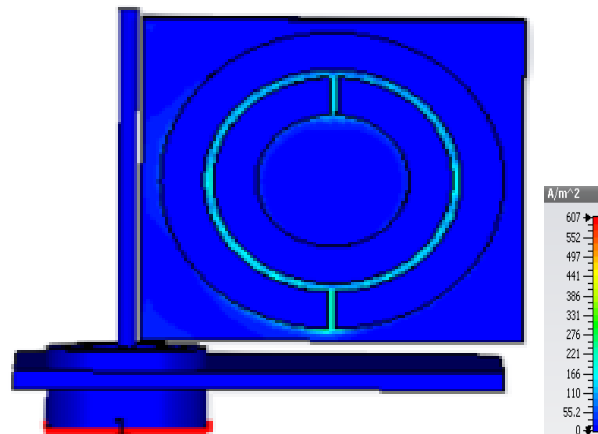
Κατανομή μέσης πυκνότητας ρεύματος

Στην εικόνα 3.13 παρουσιάζεται η μέση κατανομή της πυκνότητας της μαγνητικής ενέργειας στη συχνότητα 7.405 GHz. Η μαγνητική ενέργεια συσσωρεύεται κατά κύριο λόγο στην περιοχή που βρίσκονται τα διαχωρίσματα των συντονιστών διακεκομμένων δακτυλίων (SRR).



Εικόνα 3.13: Κατανομή μέσης πυκνότητας ρεύματος στα 7.405 GHz κεραίας με κατά 20% αύξηση του υποστρώματος και της διάταξης των τυπωμένων μεταλλικών.

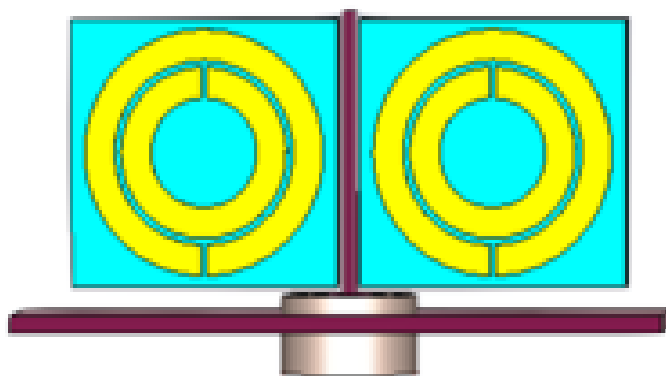
Στη συχνότητα 3.384 GHz, η μέση κατανομή της πυκνότητας της μαγνητικής ενέργειας λαμβάνει την ακόλουθη μορφή.



Εικόνα 3.14: Κατανομή μέσης πυκνότητας ρεύματος στα 3.384 GHz κεραίας με κατά 20% αύξηση του υποστρώματος και της διάταξης των τυπωμένων μεταλλικών.

3.1.4 Κεραία με δυο υποστρώματα μεταλλικών

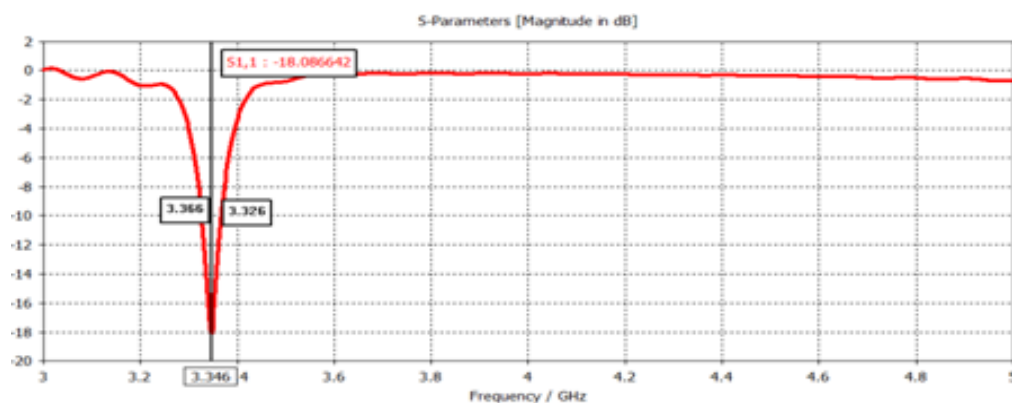
Στη συνέχεια, διατηρώντας τη διάταξη της κεραίας που παραθέσαμε στην υποενότητα 3.1.1, προσθέσαμε συμμετρικά με το εσωτερικό καλώδιο από την αριστερή πλευρά ένα όμοιο υπόστρωμα με όμοιες τυπωμένες διατάξεις, προκειμένου να διερευνήσουμε κάποια πιθανή μεταβολή που θα επιφέρει η προσθήκη τους στη συμπεριφορά της κεραίας.



Εικόνα 3.15: Κεραία με 2 υποστρώματα μεταλλικών.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

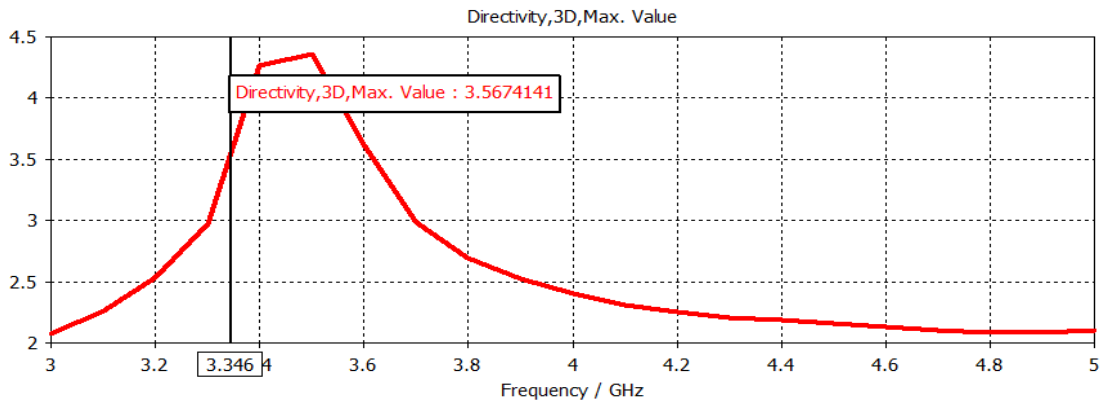
Όπως παρουσιάζεται και στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 3.16), η συχνότητα συντονισμού της κεραίας είναι 3.346 GHz.



Εικόνα 3.16: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας υπό την επίδραση δυο διατάξεων μεταλλικών.

Παρατηρούμε ότι η επίδραση των δυο διατάξεων μεταλλικών στην κεραία δεν διαφέρει σημαντικά από την επιρροή που ασκεί μόνο η μια, καθώς η τιμή της συχνότητας συντονισμού και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας της κεραίας δεν έχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις εν συγκρίσει με την κεραία που περιγράφεται στην υποενότητα 3.1.1.

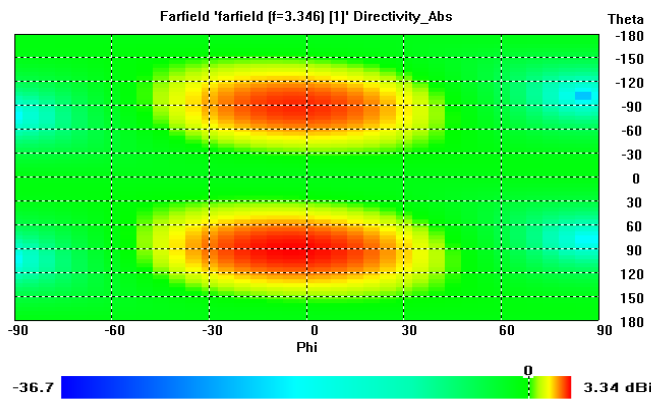
Το διάγραμμα κατευθυντικότητας της κεραίας απεικονίζεται στην εικόνα 3.17. Παρατηρούμε ότι στα 3.346 GHz, η κατευθυντικότητα έχει τιμή 3.467 dBi, ενώ η μέγιστη τιμή που λαμβάνει είναι 4.3576 dBi στα 3.5 GHz. Παρατηρούμε ότι κατευθυντικότητα της κεραίας είναι εμφανώς πιο βελτιωμένη εν συγκρίσει με αυτή της κεραίας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.1.2.



Εικόνα 3.17: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας.

Διάγραμμα ακτινοβολίας

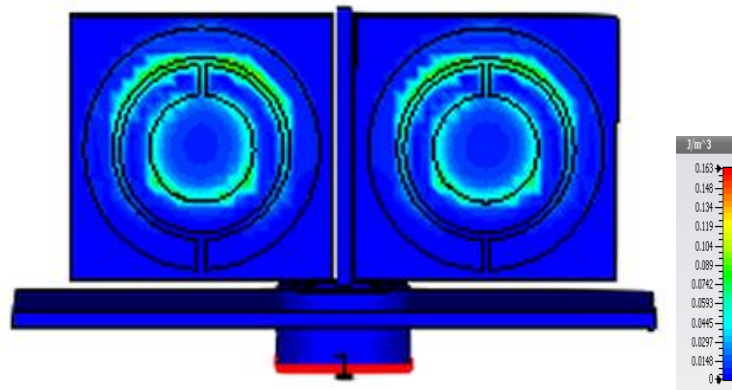
Το δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας λαμβάνει την ακόλουθη μορφή (εικόνα 3.18).



Εικόνα 3.18: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε δισδιάστατη μορφή της προτεινόμενης κεραίας υπό την επίδραση δυο διατάξεων μεταλλικών.

Πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας

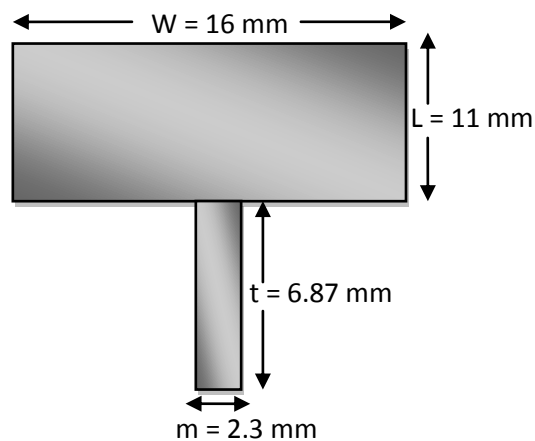
Στην ακόλουθη εικόνα (εικόνα 3.19) παρουσιάζεται η πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας της κεραίας. Παρατηρούμε ότι η μαγνητική ενέργεια πυκνώνει στο άνω τμήμα μεταξύ των συντονιστών διακεκομμένων δακτυλίων και στο εσωτερικό τμήμα του εσωτερικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου.



Εικόνα 3.19: Πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας της προτεινόμενης κεραίας υπό την επίδραση δυο διατάξεων μεταλλικών.

3.2 Κεραία Μικροταινίας

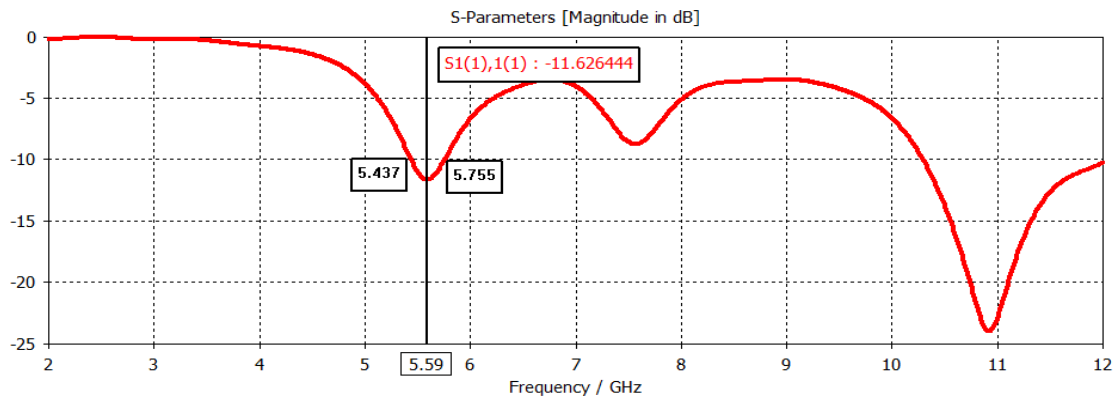
Στη συνέχεια, μελετήσαμε τη λειτουργία μιας κεραίας (σχήμα 3.20), η οποία ανήκει στην κατηγορία των τυπωμένων μικροταινιακών μονοπολικών κεραίων. Η προτεινόμενη κεραία είναι τυπωμένη πάνω σε ένα FR-4 (lossy) υπόστρωμα με πάχος 3.1 mm, το οποίο παρουσιάζει διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.4$ και χαμηλές απώλειες δοσμένης της τιμής της εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta = 0.0017$ [5]. Αποτελείται από μια λεπτή μεταλλική ταινία (patch) μήκους L και πλάτους W και από μια γραμμή τροφοδοσίας μήκους t και πλάτους m . Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε κατά το σχεδιασμό της κεραίας είναι χαλκός και έχει πάχος 0.017 mm.



Εικόνα 3.20: Διαστάσεις προτεινόμενης κεραίας.

Αποτελέσματα προσομοίωσης προτεινόμενης γεωμετρίας

Στην εικόνα 3.21 αποτυπώνεται το διάγραμμα απώλειας επιστροφής σε σχέση με τη συχνότητα. Παρατηρούμε ότι η κεραία λειτουργεί σε δυο ζώνες συχνοτήτων. Επιτυγχάνει απώλεια επιστροφής -11.62 dB στη συχνότητα 5.59 GHz και -23.97 dB στη συχνότητα των 10.92 GHz.

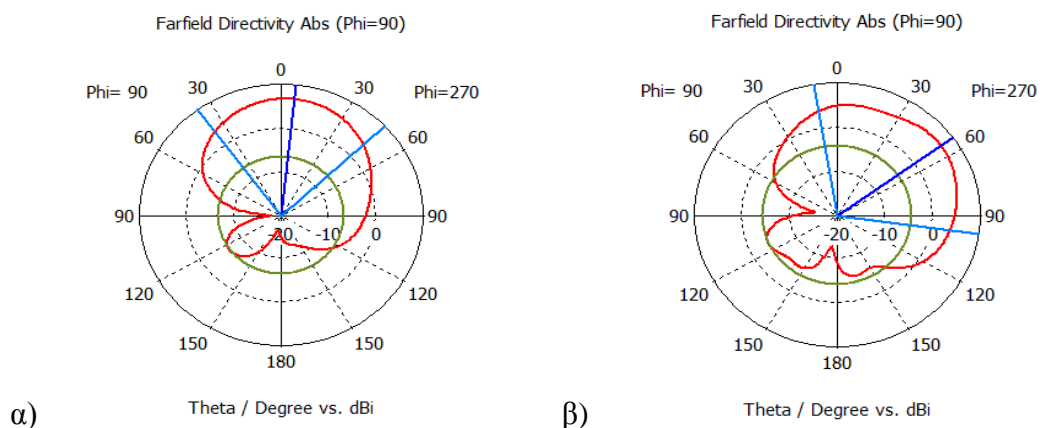


Εικόνα 3.21: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής – συχνότητα.

Από το διάγραμμα κέρδους - συχνότητας, διαπιστώσαμε ότι το κέρδος είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη συχνότητα. Η τιμή του κέρδους είναι $G = 5.5$ dB στα 5.59 GHz και $G = 5.4$ dB στα 10.92 GHz.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

Στα σχήματα που έπονται, απεικονίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας σε πολική μορφή ως προς το επίπεδο y για τις συχνότητες 7.55 GHz και 11.17 GHz αντίστοιχα.

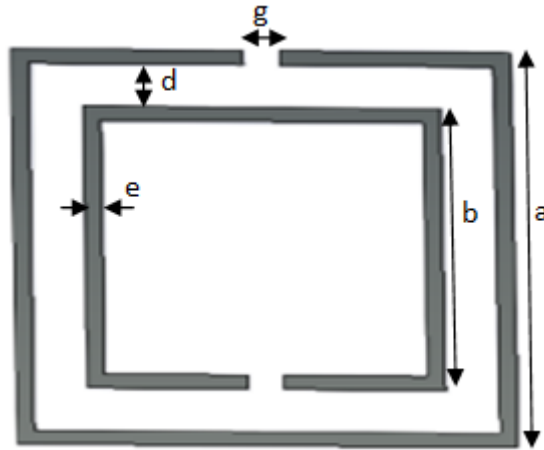


Εικόνα 3.22: Διάγραμμα σε πολική μορφή για συχνότητες α) 5.59 GHz και β) 10.92 GHz.

Στην πρώτη περίπτωση (εικόνα 3.22α) το μέγεθος και η κατεύθυνση του κύριου λοβού είναι 6.67 dBi και 6.0 deg αντίστοιχα, ενώ στη δεύτερη (εικόνα 3.22β) τα προαναφερθέντα μεγέθη έχουν τιμές 6.82 dBi και 54.0 deg.

3.2.1 Κεραία με υπόστρωμα μεταλλικών

Στη συνέχεια, εξετάσαμε την επίδραση των αριστερόστροφων υλικών και της γεωμετρίας τους στη συμπεριφορά της κεραίας. Για το λόγο αυτό, ενσωματώσαμε στην πίσω όψη του υποστρώματος, 4, 9, 16, 25 και 36 περιοδικά διατεταγμένους συντονιστές διακεκομμένων δακτυλίων (SRR) με μηδενικό πάχος και προσθέσαμε ένα όμοιο υπόστρωμα, έτσι ώστε τα μεταλλικά να βρίσκονται στο ενδιάμεσο των δυο υποστρωμάτων.



Εικόνα 3.23: Δομή συντονιστή διακεκομένου δακτυλίου.

3.2.2 Υπόστρωμα με 4 διατάξεις μεταλλικών

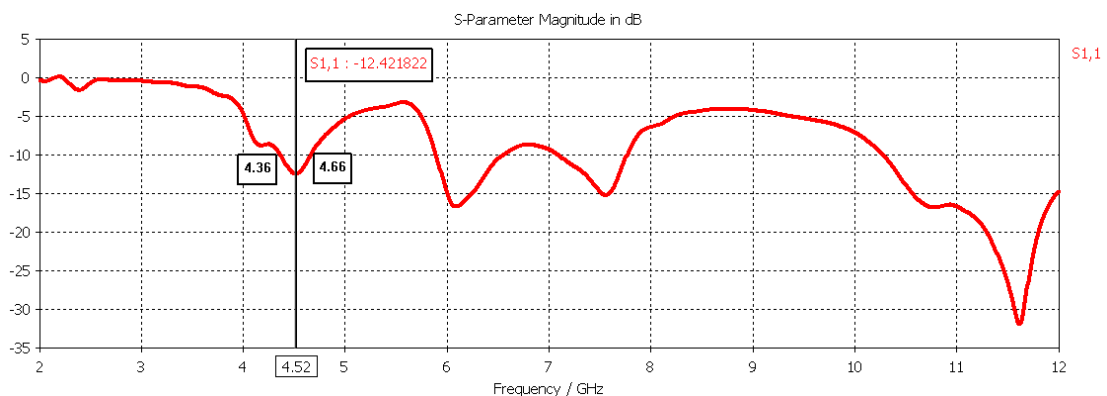
Οι βασικές παράμετροι της γεωμετρίας των SRR, οι οποίες επιλέχθηκαν ως βέλτιστες βάσει των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, παραθέτονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4: Βασικές παράμετροι SRR.

Εξωτερικός Δακτύλιος (a)	Εσωτερικός Δακτύλιος (b)	Πάχος δακτυλίου (e)	Κενό μεταξύ των δακτυλίων (g)	Απόσταση δυο δακτυλίων (d)
7 mm	5 mm	0.25 mm	0.5 mm	1 mm

Αποτελέσματα προσομοίωσης

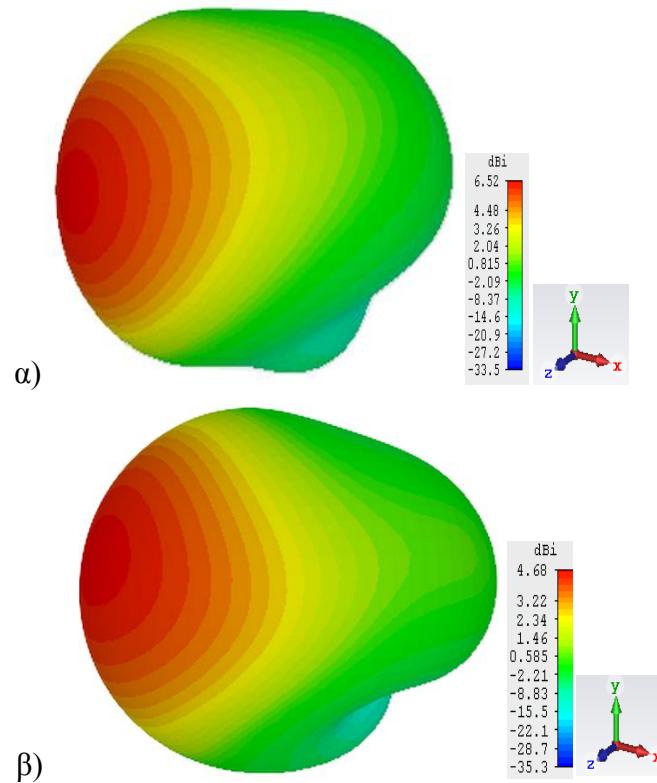
Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24, η κεραία λειτουργεί σε τέσσερις ζώνες συχνοτήτων. Η προσθήκη των μεταλλικών ελαττώνει σημαντικά τη συχνότητα συντονισμού και αυξάνει το εύρος ζώνης λειτουργίας της κεραίας.



Εικόνα 3.24: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

Στη συνέχεια, παρατηρούμε το 3-D διάγραμμα ακτινοβολίας για τις δυο πρώτες συχνότητες συντονισμού.

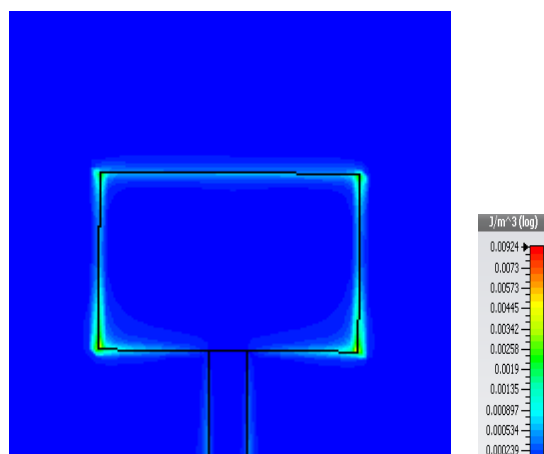


Εικόνα 3.25: α) 3-D διάγραμμα ακτινοβολίας για α) 4.51 GHz β) 6.08 GHz.

Στην πρώτη περίπτωση (εικόνα 3.25α) η μέγιστη κατευθυντικότητα είναι 6.52 dBi, ενώ στη δεύτερη (εικόνα 3.25β) 4.68 dBi.

Διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος

Στην εικόνα 3.26 οπτικοποιείται το διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος για τη πρώτη συχνότητα συντονισμού.



Εικόνα 3.26: Διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος στα 4.51 GHz.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό το ρεύμα συγκεντρώνεται στα τέσσερα άκρα, και κυρίως σε αυτά που βρίσκονται στο κάτω τμήμα, της μεταλλικής ταινίας της κεραίας.

3.2.3 Υπόστρωμα με 9 διατάξεις μεταλλικών

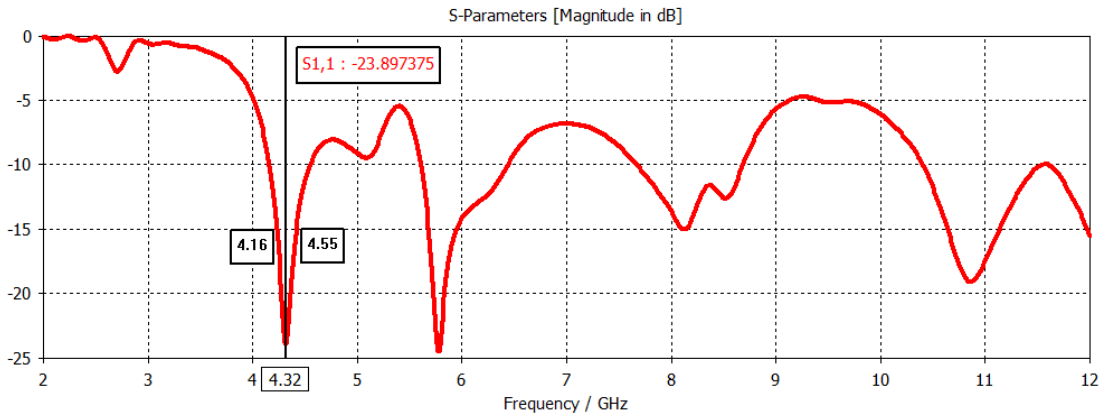
Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται οι ακριβείς διαστάσεις των μεταλλικών που τοποθετήθηκαν περιοδικά μεταξύ των δυο όμοιων υποστρωμάτων.

Πίνακας 5: Βασικές παράμετροι SRR.

Εξωτερικός Δακτύλιος (a)	Εσωτερικός Δακτύλιος (b)	Πάχος δακτυλίου (e)	Κενό μεταξύ των δακτυλίων (g)	Απόσταση δυο δακτυλίων (d)
7.32 mm	4.32 mm	0.5 mm	1 mm	1.25 mm

Αποτελέσματα προσομοίωσης της προτεινόμενης κεραίας

Όπως γίνεται φανερό και από το διάγραμμα της εικόνας 3.27, η κεραία με την προτεινόμενη διάταξη μεταλλικών λειτουργεί σε πέντε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Παρατηρούμε ότι η συχνότητα, στην οποία παρουσιάζεται ο πρώτος συντονισμός είναι χαμηλότερη και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας της κεραίας ιδιαίτερα αυξημένο εν συγκρίσει με τη διάταξη που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.2.2. Συμπερασματικά, η προσθήκη 9 διαφορετικών διατάξεων μεταλλικών στο ενδιάμεσο των δυο υποστρωμάτων της κεραίας, επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την επιλογή των τεσσάρων διατάξεων.



Εικόνα 3.27: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

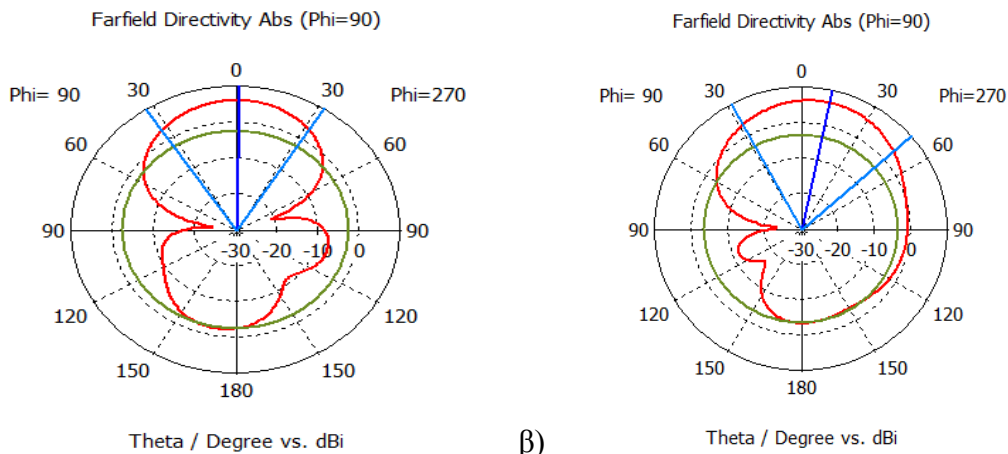
Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Πίνακας 6: Απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	10 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
4.32	4.16 – 4.55	390	9.03
5.77	5.6 – 6.38	780	13.52
8.13	7.67 – 8.68	1010	12.42
10.86	10.4 – 11.55	1150	10.59

Διαγράμματα ακτινοβολίας

Το διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή ως προς το επίπεδο γ για τις δυο πρώτες συχνότητες συντονισμού παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



α) Θeta / Degree vs. dBi β) Θeta / Degree vs. dBi
Εικόνα 3.28: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για τη συχνότητα α) 4.32 GHz β) 5.77 GHz.

3.2.4 Υπόστρωμα με 16 διατάξεις μεταλλικών

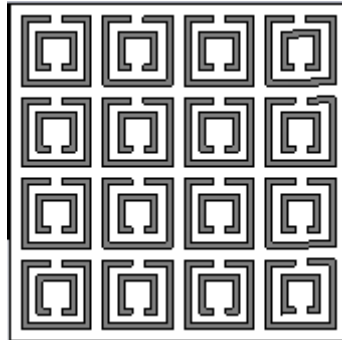
Κατόπιν, μελετήσαμε τη συμπεριφορά της κεραίας με 16 περιοδικά διατεταγμένα μεταλλικά. Η συγκεκριμένη κεραία αναλύθηκε και παρουσιάστηκε στο επιστημονικό άρθρο των Jose L. da Silva, Humberto D. de Andrade, Humberto C. C. Fernandes, Isaac B.T. da Silva, Idalmir de S.Q. Junior, Jonathan P.P. Pereira και Almir S.S. Neto

[5]. Η γεωμετρία των διατάξεων των μεταλλικών που προτάθηκε περιγράφεται στη συνέχεια.

Πίνακας 7: Βασικές παράμετροι SRR.

Εξωτερικός Δακτύλιος (a)	Εσωτερικός Δακτύλιος (b)	Πάχος δακτυλίου (e)	Κενό μεταξύ των δακτυλίων (g)	Απόσταση δυο δακτυλίων (d)
5.75 mm	3.66 mm	0.5 mm	1 mm	0.795 mm

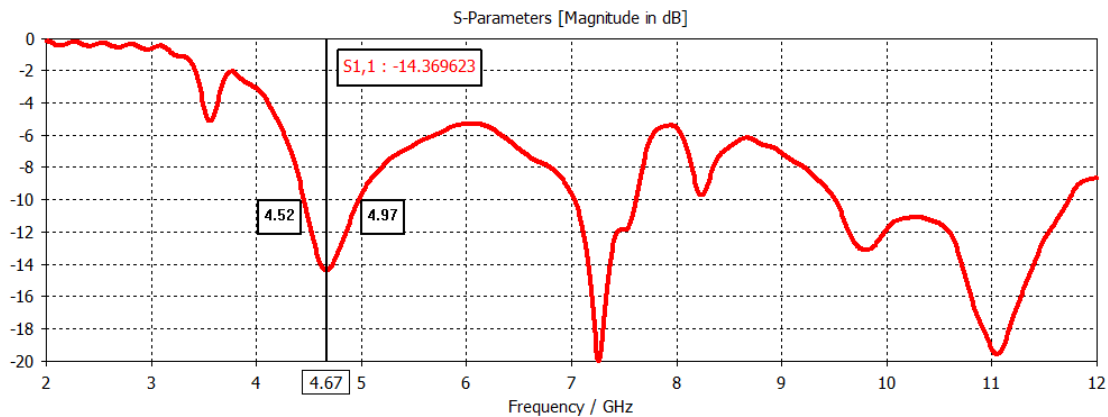
Το υπόστρωμα με την προσθήκη των διατάξεων των μεταλλικών οπτικοποιείται στην εικόνα 3.30.



Εικόνα 3.29: Υπόστρωμα κεραίας με προσθήκη μεταλλικών.

Αποτελέσματα προσομοίωσης της προτεινόμενης κεραίας

Το διάγραμμα απώλειας επιστροφής – συχνοτήτων παρουσιάζεται στην εικόνα 3.30. Παρατηρούμε ότι με την προτεινόμενη διάταξη η κεραία λειτουργεί σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Επιπλέον, το εύρος ζώνης λειτουργίας της είναι ιδιαίτερα αυξημένο.



Εικόνα 3.30: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

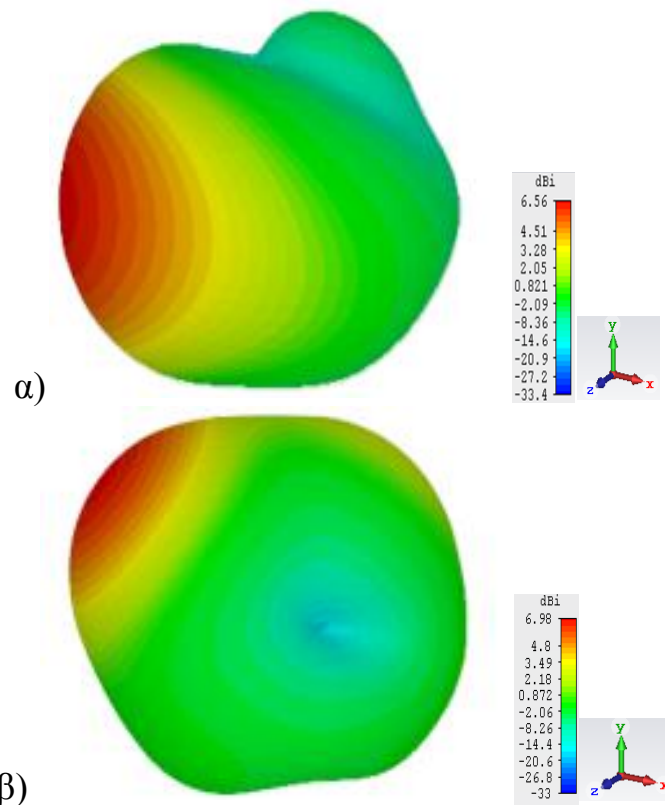
Η πρώτη συχνότητα στην οποία η παράμετρος S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της (-14.369 dB) είναι τα 4.67 GHz. Η προσθήκη 16 περιοδικά διατεταγμένων μεταλλικών στο ενδιάμεσο των δυο υποστρωμάτων επιδεινώνει το αποτέλεσμα ως προς τη συχνότητα εν συγκρίσει με τις προηγούμενες δυο περιπτώσεις.

Στο επιστημονικό άρθρο [5], η ελάχιστη τιμή απώλειας επιστροφής είναι -29.1 dB στη συχνότητα 4.94 GHz. Το αποτέλεσμα που εξάγαμε εν συγκρίσει με του άρθρου

έχει μια μικρή διαφορά. Αυτή μπορεί να οφείλεται σε διαφορετική επιλογή διαστάσεων του port ή πυκνότητας πλέγματος πριν την προσομοίωση της κεραίας.

Τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας

Τα τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας που αναφέρονται στις δυο πρώτες συχνότητες συντονισμού παριστάνονται στην εικόνα 3.31.

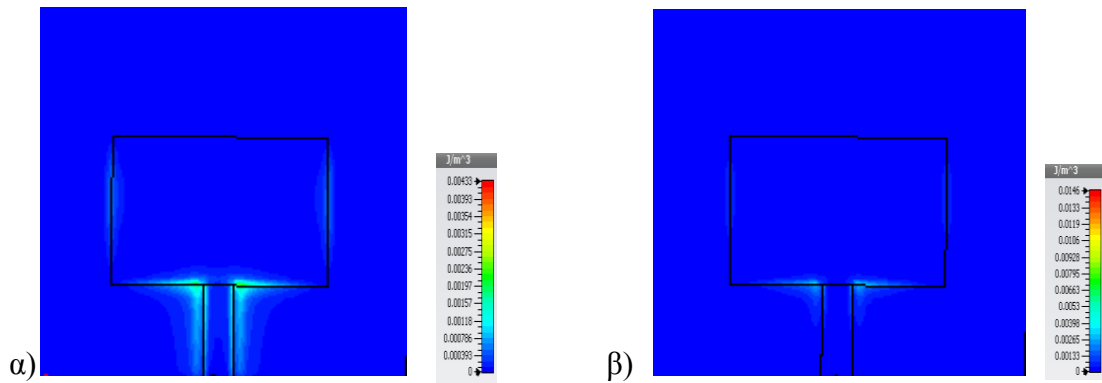


Εικόνα 3.31: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για α) 4.67 GHz και β) 7.26 GHz.

Η μέγιστη κατευθυντικότητα στην πρώτη περίπτωση (εικόνα 3.31α) είναι 6.56 dBi, ενώ στη δεύτερη (εικόνα 3.31β) είναι 6.98 dBi.

Διάγραμμα πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας

Η μαγνητική ενέργεια για τη συχνότητα 4.67 GHz, όπως αποδεικνύεται και από την εικόνα 3.32α, συσσωρεύεται κυρίως στο κάτω τμήμα της μεταλλικής ταινίας στο ύψος της ταινίας τροφοδοσίας. Αντιθέτως, για τη συχνότητα 7.26, υπάρχει ελάχιστη ποσότητα μαγνητικής ενέργειας στο κάτω μέρος της μεταλλικής ταινίας αριστερά της ταινίας τροφοδοσίας.



Εικόνα 3.32: Μαγνητική ενέργεια για τη συχνότητα α) 4.67 GHz και β) 7.26 GHz.

3.2.5 Υπόστρωμα με 25 διατάξεις μεταλλικών

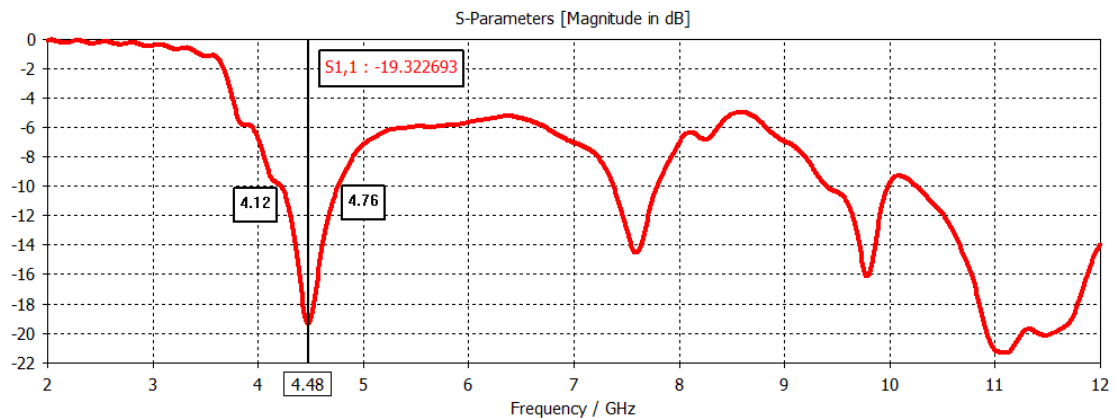
Η γεωμετρία των περιοδικά διατεταγμένων μεταλλικών που επιλέχθηκε ως βέλτιστη παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 8: Βασικές παράμετροι SRR.

Εξωτερικός Δακτύλιος (a)	Εσωτερικός Δακτύλιος (b)	Πάχος δακτυλίου (e)	Κενό μεταξύ των δακτυλίων (g)	Απόσταση δυο δακτυλίων (d)
5 mm	3 mm	0.5 mm	1 mm	0.75 mm

Αποτελέσματα προτεινόμενης γεωμετρίας

Το διάγραμμα απώλειας επιστροφής σε σχέση με τη συχνότητα απεικονίζεται την ακόλουθη εικόνα.

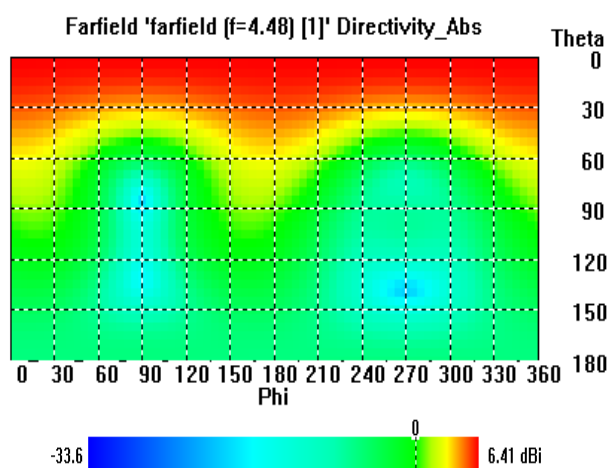


Εικόνα 3.33: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Παρατηρούμε ότι η συχνότητα του πρώτου συντονισμού είναι στα 4.48 GHz και σημειώνεται ελάττωση εν συγκρίσει με τη κεραία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Επιπλέον, διευρύνεται ικανοποιητικά το φάσμα λειτουργίας της κεραίας. Συνεπώς, η κεραία που περιγράφηκε σε αυτήν την ενότητα προτιμάται εν συγκρίσει με τη κεραία που προτάθηκε στην υποενότητα 3.2.4.

Διάγραμμα ακτινοβολίας

Ακολούθως, παρουσιάζεται το δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για τη συχνότητα 4.48 GHz. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η κατευθυντικότητα είναι 6.41 dBi.



Εικόνα 3.34: Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στα 4.48 GHz.

3.2.6 Υπόστρωμα με 36 διατάξεις μεταλλικών

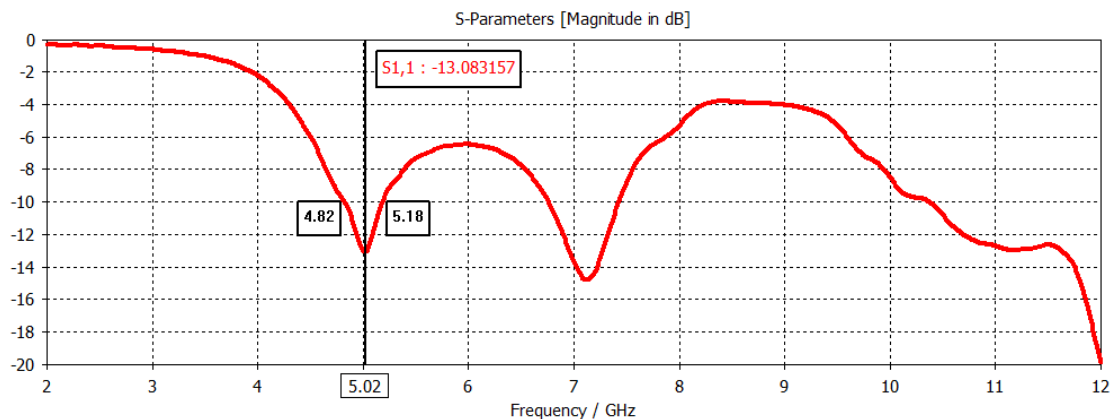
Με σκοπό την πληρέστερη μελέτη, προσομοιώσαμε τη κεραία με 36 περιοδικά διατεταγμένα μεταλλικά. Η συγκεκριμένη κεραία έχει αναλυθεί και προσομοιωθεί στην επιστημονική μελέτη [5]. Οι ακριβείς διαστάσεις των μεταλλικών δίνονται στο πίνακα 10.

Πίνακας 9: Βασικές παράμετροι SRR.

Εξωτερικός Δακτύλιος (a)	Εσωτερικός Δακτύλιος (b)	Πάχος δακτυλίου (e)	Κενό μεταξύ των δακτυλίων (g)	Απόσταση δυο δακτυλίων (d)
3.66 mm	2.16 mm	0.25 mm	0.5 mm	0.625 mm

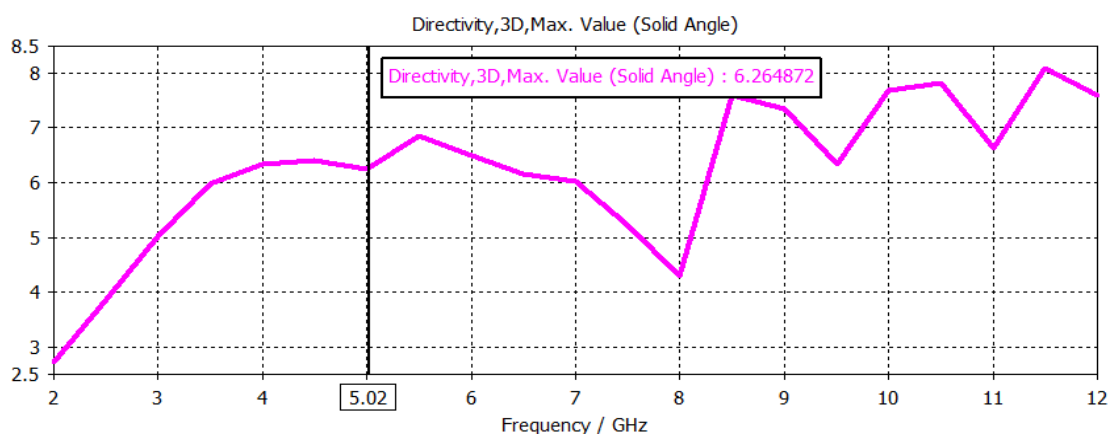
Αποτελέσματα προσομοίωσης

Από την εικόνα 3.35 αντιλαμβανόμαστε ότι με 36 διατάξεις μεταλλικών η συμπεριφορά της κεραίας επιδεινώνεται. Η συχνότητα του πρώτου συντονισμού είναι στα 5.02 GHz με απώλεια επιστροφής -13.083 dB. Στο άρθρο, η πρώτη συχνότητα συντονισμού είναι στα 5.01 GHz με απώλεια επιστροφής -20.97 dB. Το αποτέλεσμα που έχουμε εξάγει συμβαδίζει με το αποτέλεσμα του άρθρου. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η κεραία λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές ζώνες, το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας είναι ικανοποιητικό και τα μεταλλικά επιδρούν θετικά στη συμπεριφορά της κεραίας.



Εικόνα 3.35: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

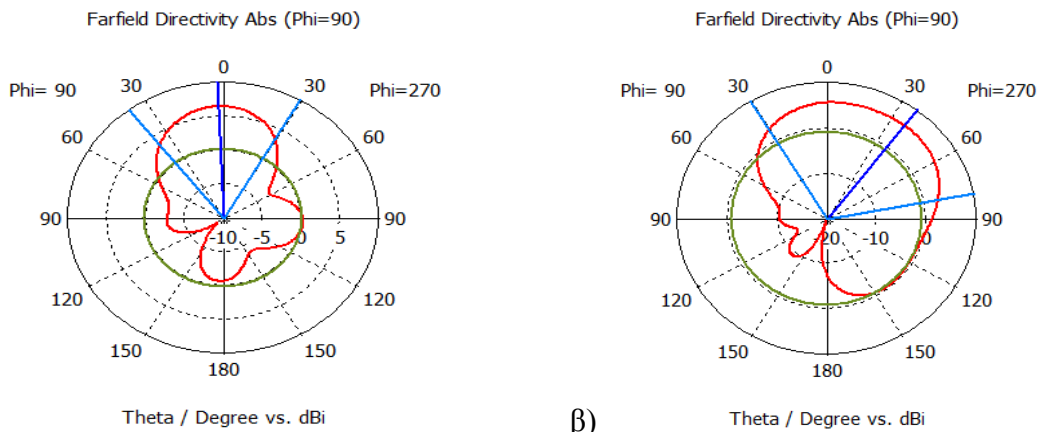
Το διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας για το εύρος συχνοτήτων από 1-12 GHz οπτικοποιείται στην εικόνα 3.36. Για την πρώτη συχνότητα συντονισμού η κατευθυντικότητα έχει τιμή 6.26 dBi, ενώ η μέγιστη τιμή που λαμβάνει είναι 8.08 dBi στα 11.5 GHz.



Εικόνα 3.36: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

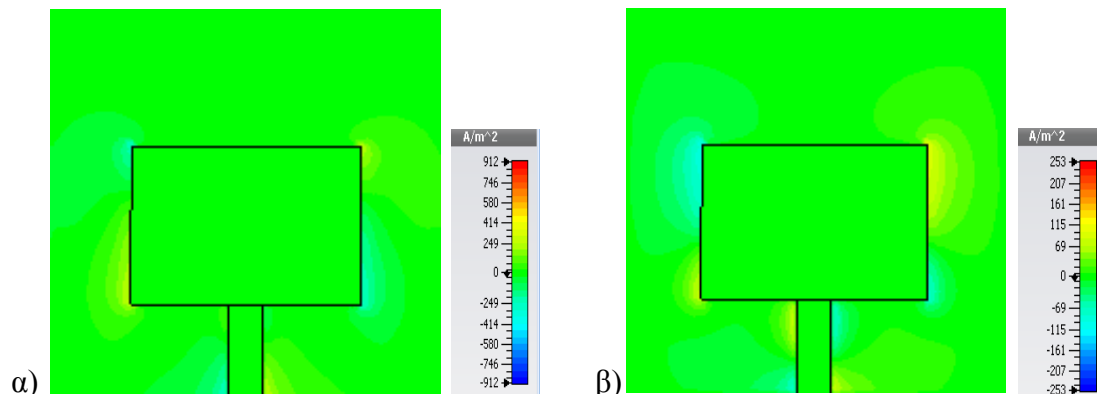
Τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή ως προς το επίπεδο y για τις δύο πρώτες συχνότητες που η παράμετρος S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



α) β)
 Εικόνα 3.37: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή στις συχνότητες α) 5.02 GHz και β) 7.13 GHz.

Διαγράμματα μέσης πυκνότητας ρεύματος

Τα διαγράμματα μέσης πυκνότητας ρεύματος για τις δυο πρώτες συχνότητες συντονισμού παρουσιάζονται στην εικόνα 3.38. Παρατηρούμε στην εικόνα 3.38β, ότι το ρεύμα συγκεντρώνεται κυρίως παράλληλα της μεταλλικής ταινίας και της ταινίας τροφοδοσίας.



Εικόνα 3.38: Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ρεύματος στα α) 5.02 GHz β) 7.13 GHz.

3.2.7 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

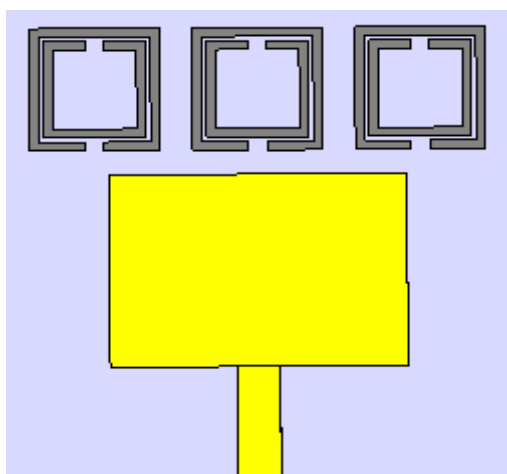
Μετά την εξαγωγή των ανωτέρων αποτελεσμάτων καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι τα μεταλλικά μπορούν να επιδράσουν θετικά στη λειτουργία της κεραίας μικροταινίας. Παρόλα αυτά, η επιλογή του σωστού αριθμού και της κατάλληλης γεωμετρίας των αριστερόστροφων υλικών έχει σπουδαίο ρόλο στη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος. Συμπεράναμε ότι η προσθήκη των 9 διατάξεων μεταλλικών στο υπόστρωμα της κεραίας, με τις διαστάσεις που περιγράφηκαν στην υποενότητα 3.2.3, οι οποίες επιλέχθηκαν ως βέλτιστες, φέρει τη χαμηλότερη συχνότητα του πρώτου συντονισμού και ένα ικανοποιητικό εύρος συχνοτήτων. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ως η καλύτερη επιλογή, εν συγκρίσει με τις υπόλοιπες.

3.3 Κεραία με τυπωμένες διατάξεις μεταλλικών

Επιθυμώντας να ελέγξουμε την επίδραση που ασκεί η θέση των διατάξεων των μεταλλικών στη συμπεριφορά της κεραίας, τυπώσαμε τις διατάξεις των αριστερόστροφων υλικών στην άνω όψη του υποστρώματος. Επαναλάβαμε τη διαδικασία για 3, 6, 15, 18 διατάξεις μεταλλικών.

3.3.1 Κεραία με 3 τυπωμένες διατάξεις μεταλλικών

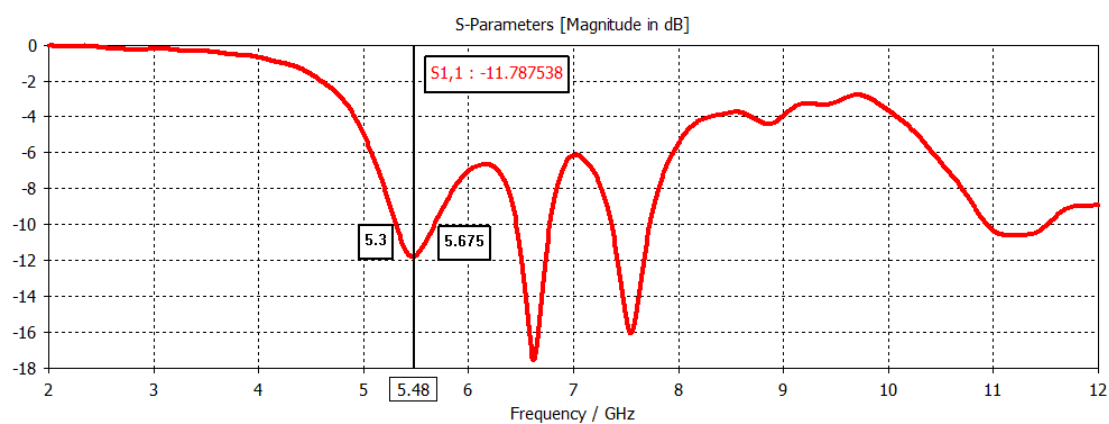
Διατηρώντας τις διαστάσεις των μεταλλικών που περιγράψαμε στην ενότητα 3.2.3, τυπώσαμε 3 διατάξεις αριστερόστροφων υλικών, περιοδικά διατεταγμένων, στο άνω τμήμα του υποστρώματος.



Εικόνα 3.39: Προτεινόμενη κεραία.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Έπειτα, αφού προσομοιώσαμε την κεραία (εικόνα 3.40), διαπιστώσαμε ότι με την επίδραση των μεταλλικών η συχνότητα, στην οποία εμφανίζει η κεραία τον πρώτο συντονισμό μειώνεται.



Εικόνα 3.40: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

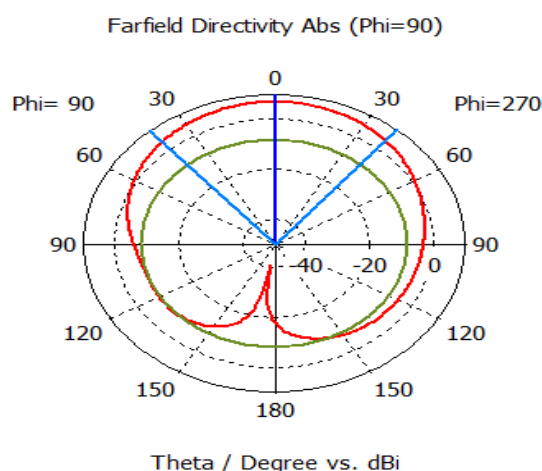
Πίνακας 10: Απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	10 dB Impedence Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
5.48	5.3 – 5.675	375	6.84
6.62	6.45 – 6.775	325	4.91
7.55	7.36 – 7.73	370	4.9
11.22	10.94 – 11.52	580	5.2

Η κεραία έχει κέρδος 5.149 dB και προς τα πίσω αναλογία στη κατεύθυνση 25.6 μοίρες στη συχνότητα συντονισμού.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή ως προς το επίπεδο y για τη συχνότητα 5.48 GHz, λαμβάνει την ακόλουθη μορφή (εικόνα 3.41).



Εικόνα 3.41: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή στη συχνότητα 5.48 GHz.

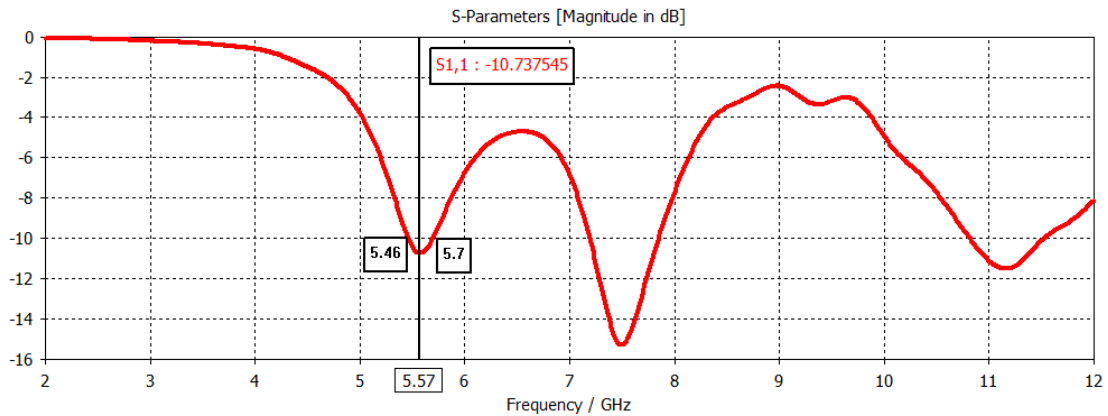
Από το διάγραμμα ακτινοβολίας πληροφορούμαστε ότι το ο κύριος λοβός έχει μέγεθος 7.1 dBi και κατεύθυνση 0.0 deg.

3.3.2 Κεραία με 6 τυπωμένες διατάξεις μεταλλικών

Διατηρώντας τη διάταξη των μεταλλικών που περιγράψαμε στην υποενότητα 3.2.4, τυπώσαμε 4 διατάξεις στο άνω τμήμα της μπροστινής όψης του υποστρώματος και 2 διατάξεις στο κάτω μέρος, δεξιά και αριστερά της ταινίας τροφοδοσίας της κεραίας.

Αποτελέσματα προσομοίωσης προτεινόμενης γεωμετρίας

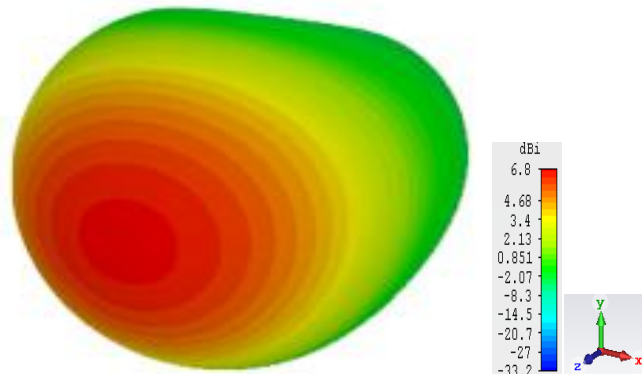
Παρατηρούμε ότι η προσθήκη των μεταλλικών δρα ουδέτερα στη συμπεριφορά της κεραίας, καθώς τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από το διάγραμμα απώλειας επιστροφής – συχνότητας δεν έχουν καμία σημαντική διαφοροποίηση εν συγκρίσει με τη συμπεριφορά της κεραίας χωρίς μεταλλικά.



Εικόνα 3.42: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Διάγραμμα ακτινοβολίας

Στην εικόνα που έπεται απεικονίζεται το 3D διάγραμμα ακτινοβολίας για συχνότητα 5.57 GHz.



Εικόνα 3.43: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για συχνότητα 5.57 GHz.

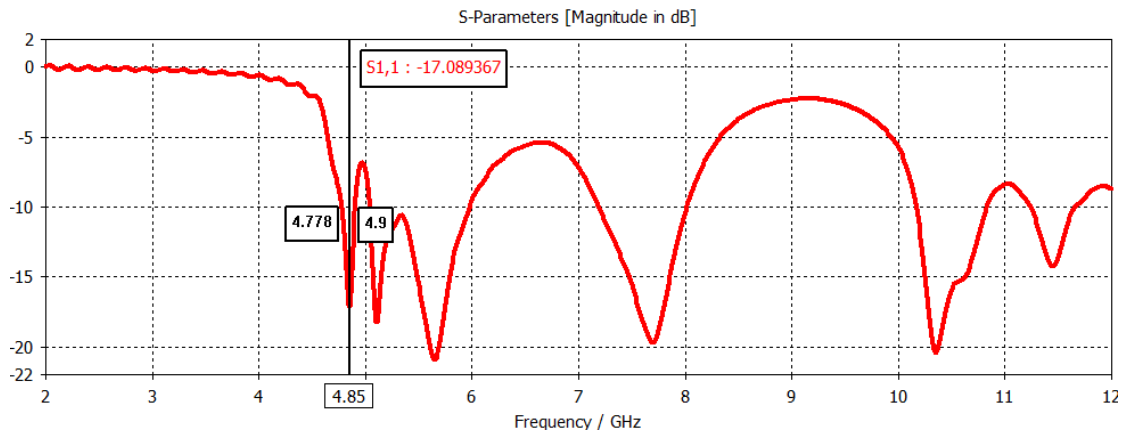
Η απόδοση ακτινοβολίας στα 5.57 GHz είναι -1.81 dB, η συνολική απόδοση είναι -2.193 dB και η κατευθυντικότητα έχει μέγιστη τιμή 6.8 dBi.

3.3.3 Κεραία με 15 τυπωμένες διατάξεις μεταλλικών

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία των μεταλλικών που περιγράψαμε στην ενότητα 3.2.5, τυπώσαμε 15 διατάξεις στην μπροστινή όψη του υποστρώματος της κεραίας και παρακολούθησαμε τη συμπεριφορά της.

Αποτελέσματα προτεινόμενης γεωμετρίας

Παρατηρήσαμε ότι τα μεταλλικά έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ελάττωση της συχνότητας συντονισμού και στην αύξηση του εύρους ζώνης λειτουργίας της κεραίας. Αναμφίβολα, σε σύγκριση με τις προηγούμενες δυο κεραίες που περιγράφηκαν, η προσθήκη 15 διατάξεων εμφανίζει καλύτερα χαρακτηριστικά. Διαπιστώνουμε ότι παράμετρος S_{11} , λαμβάνει την ελάχιστη τιμή -17.089 dB, στη συχνότητα 4.85 GHz.



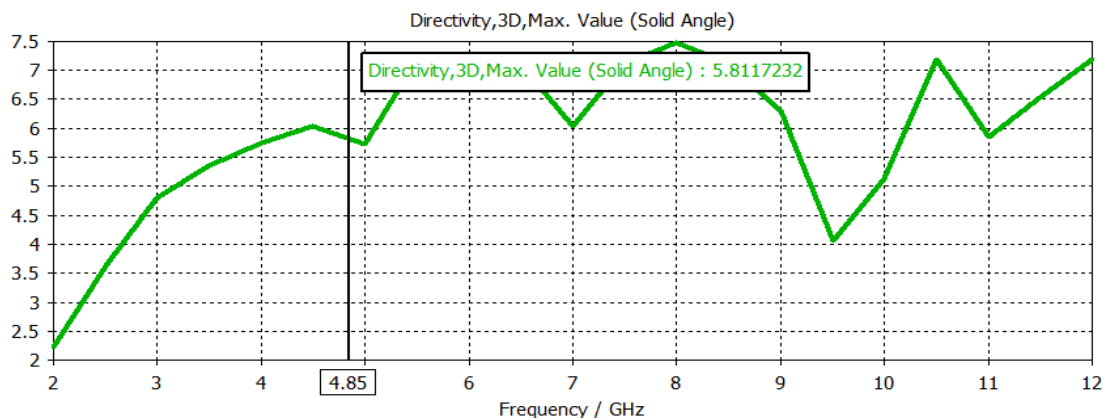
Εικόνα 3.44: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζεται η απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Πίνακας 11 Απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	9 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
4.85	4.778 - 4.9	122	2.52
5.11	5.03 – 5.975	945	18.5
7.7	7.19 – 8.014	824	10.7
10.35	10.16 – 10.83	670	6.47
11.45	11.24 – 11.66	420	3.67

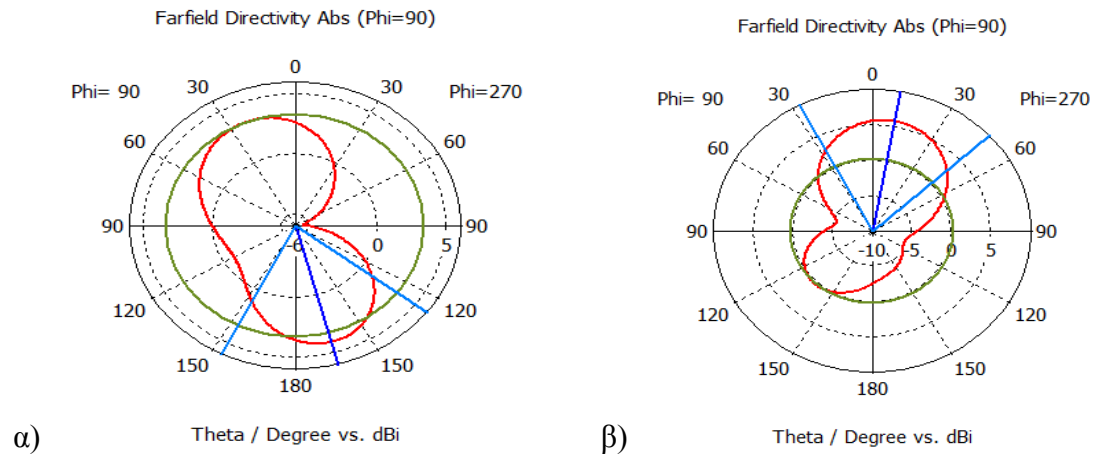
Στη συνέχεια απεικονίζεται το διάγραμμα κατευθυντικότητας – κέρδους της κεραίας. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, στα 4.85 GHz η κατευθυντικότητα είναι 5.811 dBi.



Εικόνα 3.46: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

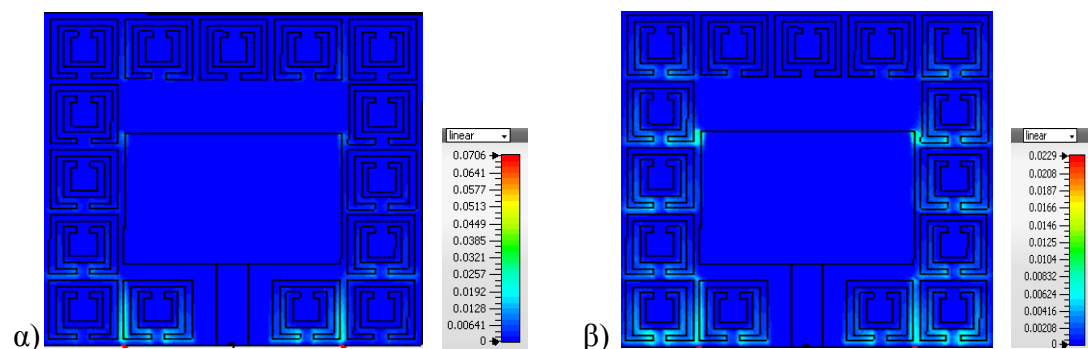
Τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας σε πολική μορφή ως προς το επίπεδο γ για τις δυο πρώτες συχνότητες συντονισμού απεικονίζονται στην εικόνα 3.47.



Εικόνα 3.47: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για τις συχνότητες α) 4.85 GHz β) 5.11 GHz.

Διαγράμματα ηλεκτρικής ενέργειας

Ακολουθως, απεικονίζονται τα διαγράμματα της μέσης κατανομής ηλεκτρικής ενέργειας για τις δυο πρώτες συχνότητες που η απώλεια επιστροφής λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της.



Εικόνα 3.48: Διάγραμμα μέσης κατανομής ηλεκτρικής ενέργειας για α) 4.85 GHz β) 5.11 GHz.

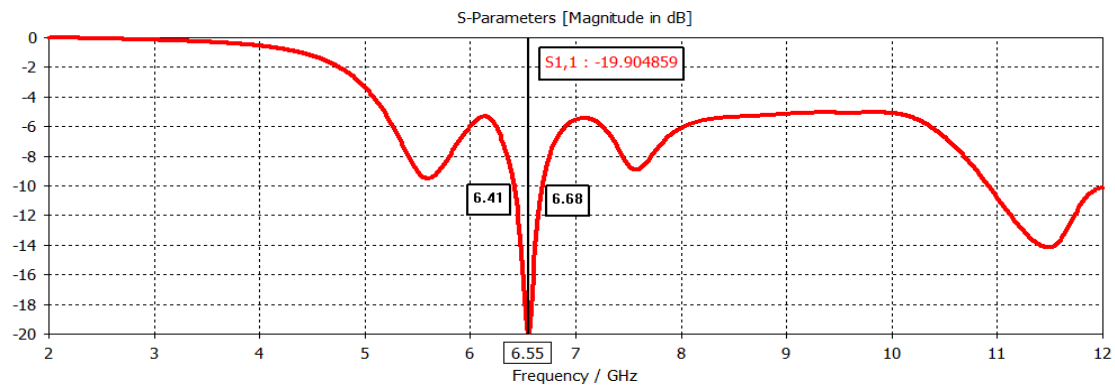
Στην εικόνα 3.48α παρατηρούμε ότι η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο έντονη στις δυο διατάξεις των μεταλλικών που βρίσκονται δεξιά και αριστερά της ταινίας τροφοδοσίας, ενώ στην εικόνα 3.48β συμπεραίνουμε ότι η ηλεκτρική ενέργεια πυκνώνει στις διατάξεις που βρίσκονται στη δεξιά και αριστερή πλευρά της γραμμής τροφοδοσίας.

3.3.4 Κεραία με 18 τυπωμένες διατάξεις μεταλλικών

Κάνοντας χρήση της γεωμετρίας των μεταλλικών που περιγράψαμε στην υποενότητα 3.2.6, τοποθετήσαμε 18 διατάξεις αριστερόστροφων υλικών στην μπροστινή όψη του υποστρώματος, προκειμένου να εξετάσουμε κάποια πιθανή μεταβολή στη συμπεριφορά της κεραίας.

Αποτελέσματα προτεινόμενης γεωμετρίας

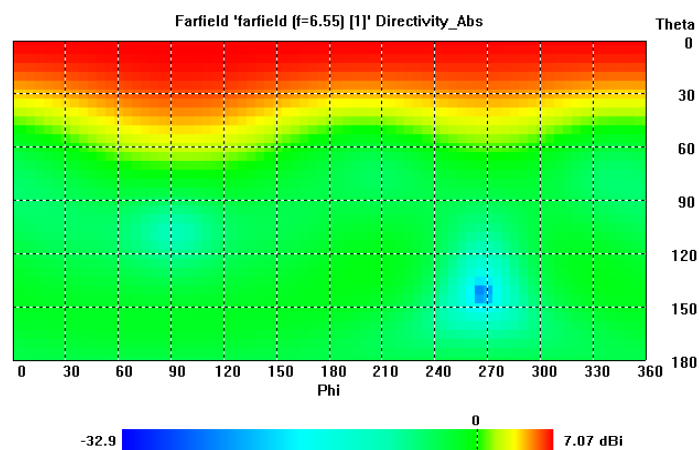
Αφού προσομοιώσαμε την προτεινόμενη κεραία, παρατηρήσαμε σοβαρή επιδείνωση των αποτελεσμάτων. Διαπιστώνουμε ότι η επίδραση των μεταλλικών στη κεραία, επιβαρύνει τη λειτουργία της με την αύξηση της πρώτης συχνότητας συντονισμού και την ελάττωση του εύρους ζώνης λειτουργίας της κεραίας. Η πρώτη συχνότητα που η παράμετρος S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή των -19.9 dB είναι τα 6.55 GHz. Το κέρδος στην συγκεκριμένη συχνότητα είναι 3.81 dB.



Εικόνα 3.49: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Διάγραμμα ακτινοβολίας

Το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στα 6.55 GHz, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.50. Για τη προαναφερθείσα συχνότητα η απόδοση ακτινοβολίας είναι -3.259 dB, η συνολική ακτινοβολία είναι -3.303 dB και η κατευθυντικότητα έχει τιμή 7.066 dBi.



Εικόνα 3.50: Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στα 6.55 GHz.

3.3.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από την ενότητα που προηγήθηκε έγινε εμφανής η σημασία της θέσης των διατάξεων των μεταλλικών. Ανάλογα με τον αριθμό των διατάξεων, η προσθήκη των μεταλλικών στην μπροστινή όψη του υποστρώματος έφερε θετικά, ουδέτερα, αλλά

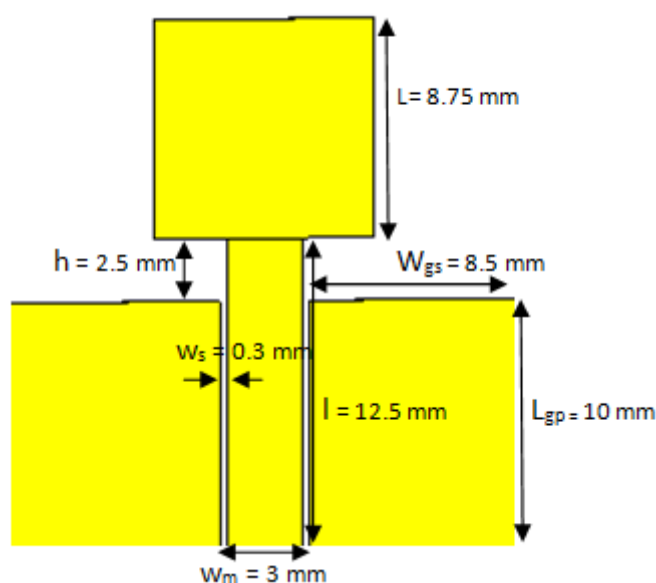
και αρνητικά αποτελέσματα στη λειτουργία της κεραίας. Βάσει των αποτελεσμάτων, η προσθήκη των διατάξεων των αριστερόστροφων υλικών ενδιάμεσα των δυο υποστρωμάτων είχε ικανοποιητικότερη επίδραση στη λειτουργία της κεραίας σε σχέση με την τοποθέτησή τους στην μπροστινή όψη του υποστρώματος.

3.4 Επίδραση μεταλλικών σε μονοπολική κεραία

Στη συνέχεια, μελετήσαμε την επίδραση διαφόρων διατάξεων μεταλλικών στη μονοπολική κεραία που απεικονίζεται στην εικόνα 3.51. Προσομοιώσαμε τη κεραία κάνοντας χρήση ενός τυπωμένου συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) και ενός τυπωμένου ανοιχτού συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (OCSRR). Επιπλέον, ελέγξαμε τη λειτουργία δυο όμοιων μονοπόλων με ενσωματωμένους συμπληρωματικούς συντονιστές διακεκομμένου δακτυλίου.

3.4.1 Μονοπολική κεραία

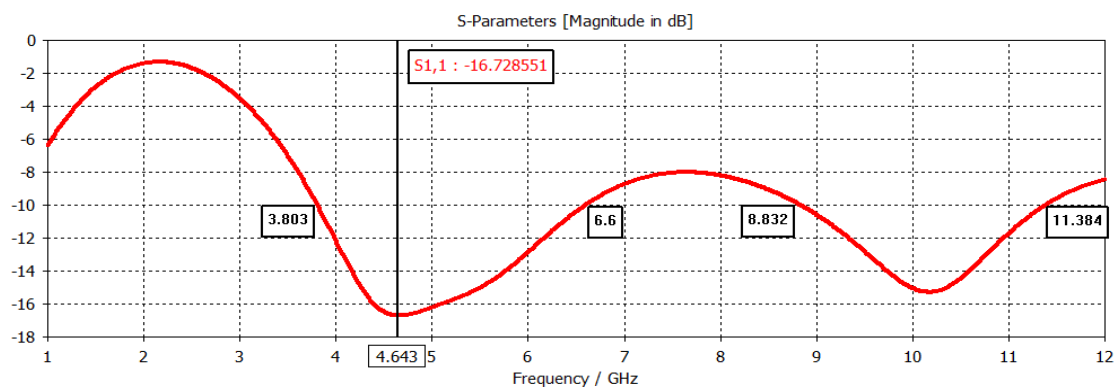
Η κεραία που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.45 αποτελείται από μια λεπτή τετράγωνη μεταλλική ταινία μήκους L και από μια γραμμή τροφοδοσίας μήκους l και πλάτους w_m . Η μονοπολική κεραία έχει πάχος $z = 30 \mu\text{m}$ και είναι τυπωμένη πάνω σε ένα FR-4 υπόστρωμα, το οποίο παρουσιάζει διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.4$ και απώλειες δοσμένης της τιμής απωλειών $\tan\delta = 0.02$ [6]. Στη δεξιά και αριστερή πλευρά του υποστρώματος, σε απόσταση h από τη μεταλλική ταινία και w_s από τη γραμμή τροφοδοσίας τυπώνεται το επίπεδο γείωσης με πλάτος L_{gp} και μήκος W_{gp} . Η κεραία μελετήθηκε και αναλύθηκε στο επιστημονικό άρθρο των Bourgis B. Nektarios και Yioultsis V. Traianos [6].



Εικόνα 3.51: Διαστάσεις μονοπολικής κεραίας.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην εικόνα 3.52 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης της κεραίας, με όρους της υπολογισμένης απώλειας επιστροφής (return loss – S11) σε dB. Η κεραία επιτυγχάνει απώλεια επιστροφής -16.72 dB στη συχνότητα 4.634 GHz και -15.3 dB στη συχνότητα 10.196 GHz. Το κέρδος που παρουσιάζει στην πρώτη συχνότητα συντονισμού είναι 1.481 dB.



Εικόνα 3.52: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 13, απ' όπου είναι εμφανές ότι το εύρος ζώνης σε αμφότερες τις ζώνες λειτουργίας είναι μεγάλο.

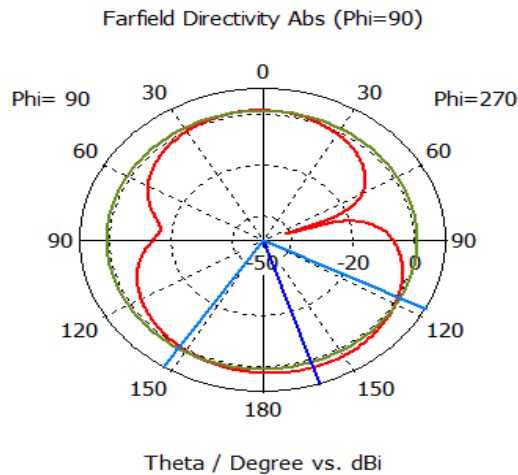
Πίνακας 12: Απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	9 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
4.643	3.803 – 6.6	2797	60.24
10.192	8.832 – 11.384	25520	25

Στην επιστημονική μελέτη [6], η πρώτη συχνότητα που η παράμετρος S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή είναι 5.858 GHz. Παρατηρείται μια μικρή διαφορά στο αποτέλεσμα που εξάγαμε εν συγκρίσει με του άρθρου. Η διαφοροποίηση αυτή ενδεχομένως να οφείλεται σε χρήση διαφορετικού λογισμικού προσομοίωσης.

Διάγραμμα ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή της κεραίας ως προς το επίπεδο y στα 4.643 GHz οπτικοποιείται στην ακόλουθη εικόνα.

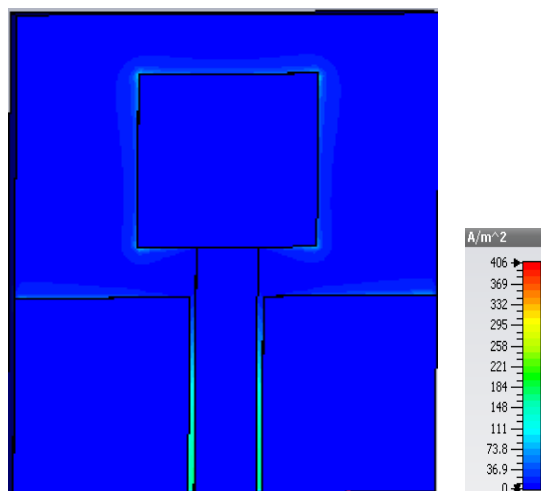


Εικόνα 3.53: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για τη συχνότητα 4.643 GHz.

Από το ανωτέρω διάγραμμα πληροφορούμαστε ότι το μέγεθος και η κατεύθυνση του κύριου λοβού έχουν τιμές 2.81 dBi και 162 deg. αντίστοιχα.

Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ρεύματος

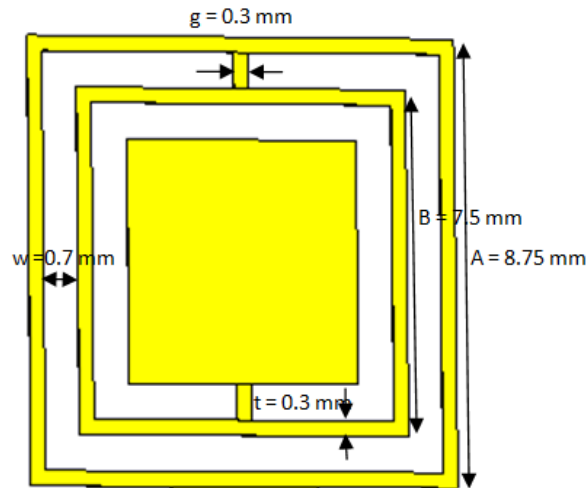
Στο σχήμα 3.54 απεικονίζεται η πυκνότητα ρεύματος της μονοπολικής κεραίας στη συχνότητα 4.643 GHz. Παρατηρούμε ότι η ροή ρεύματος πυκνώνει ενδιάμεσα της γραμμής τροφοδοσίας και του επιπέδου γείωσης.



Εικόνα 3.54: Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ρεύματος στα 4.63 GHz.

3.4.2 Μονοπολική κεραία με συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου

Ελαττώνοντας το μήκος L της ορθογώνιας μεταλλικής ταινίας σε $L = 4.7$ mm, ενσωματώσαμε στο εξωτερικό της μέρος ένα συμπληρωματικό διασπαστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR). Η γεωμετρία της ορθογώνιας μεταλλικής ταινίας με τον ενσωματωμένο συμπληρωματικό διασπαστή διακεκομμένου δακτυλίου αποτυπώνεται στην εικόνα 3.55. Η κεραία μελετήθηκε και αναλύθηκε στο επιστημονικό άρθρο [6].



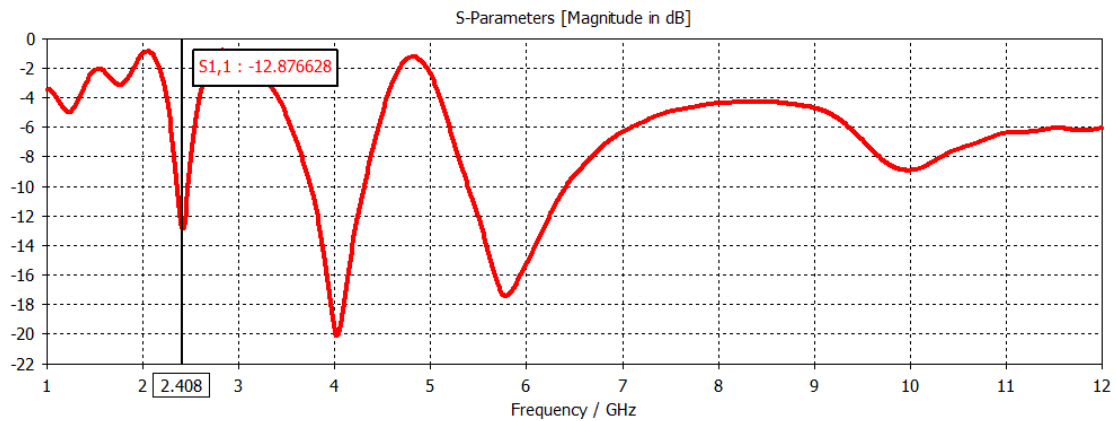
Εικόνα 3.55: Γεωμετρία συμπληρωματικού διασπαστή διακεκομμένου δακτυλίου.

Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συμπληρωματικός συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) οφείλεται στην εμφάνιση υψηλότερης συχνότητας συντονισμού εν συγκρίσει με το διπλό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (SRR). Απόρροια αυτού είναι η αύξηση των διαστάσεων του CSRR για την επίτευξη της ίδιας συχνότητας συντονισμού με έναν αντίστοιχο συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (SRR). Όπως έχει προαναφερθεί, το μέγεθος του συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) είναι $8.75 \times 8.75 \text{ mm}$ ($\lambda / 14 \times \lambda / 14$) και το συνολικό μέγεθος της κεραίας, συμπεριλαμβανομένου και του υποστρώματος, είναι $20,6 \text{ χιλιοστά} \times 24,25 \text{ χιλιοστών}$ ($\lambda / 6 \times \lambda / 5$).

Αποτελέσματα προσομοίωσης

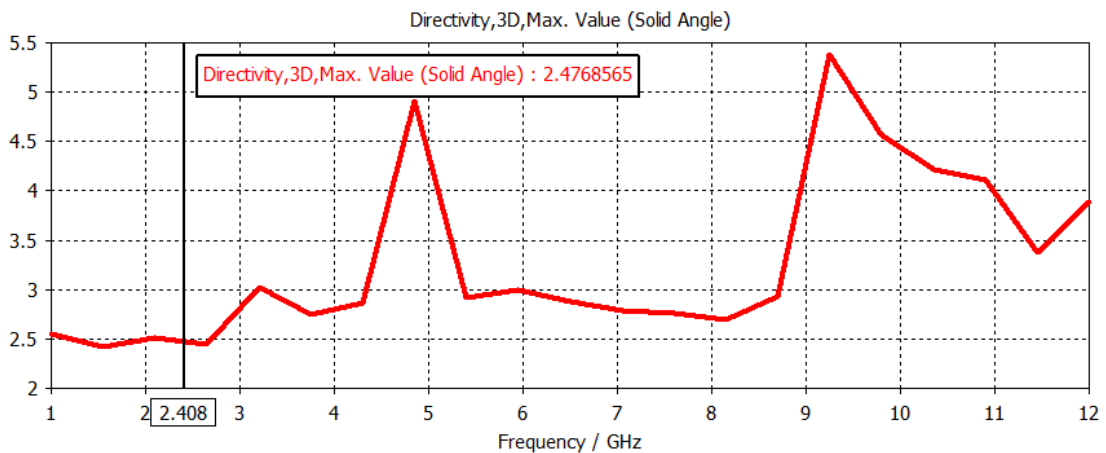
Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα απώλειας επιστροφής σε σχέση με τη συχνότητα για τη συχνοτική περιοχή 1-12 GHz. Η κεραία λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Επιτυγχάνει -12.87 dB απώλεια επιστροφής στη συχνότητα 2.408 GHz, -20.15 dB στα 4.025 GHz και -17.4 dB στη συχνότητα 5.785 GHz. Με την εξαγωγή του ακόλουθου διαγράμματος, διαπιστώνουμε σημαντική βελτίωση στη συμπεριφορά της κεραίας μετά την προσθήκη του συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου.

Στο επιστημονικό άρθρο [6], οι συχνότητες που ο συντελεστής S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του, στη συχνοτική περιοχή από 1 μέχρι 12 GHz, είναι 2.449 GHz, 4.244 GHz και 5.85 GHz. Τα αποτελέσματα που έχουμε εξάγει είναι συναφή με τα αποτελέσματα του άρθρου.



Εικόνα 3.56: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

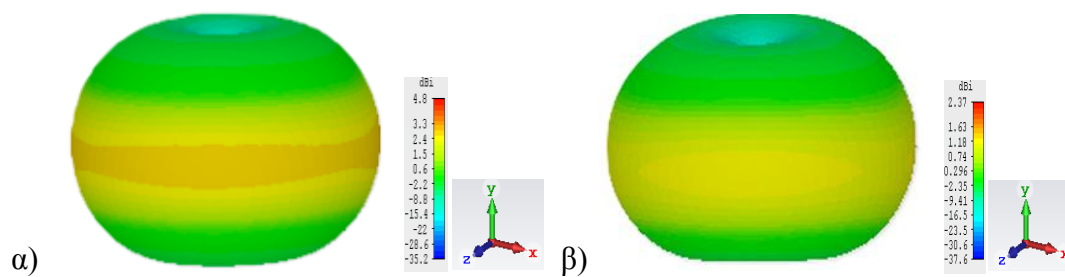
Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας για τη συχνοτική περιοχή 1 - 12 GHz. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η κατευθυντικότητα είναι 5.37 dBi στα 9.25 GHz, ενώ στην πρώτη συχνότητα που συντονίζεται η κεραία έχει τιμή 2.47 dBi.



Εικόνα 3.57: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

Στην εικόνα 3.58 παρατηρούμε τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις συχνότητες 2.408 GHz και 4.025 GHz.

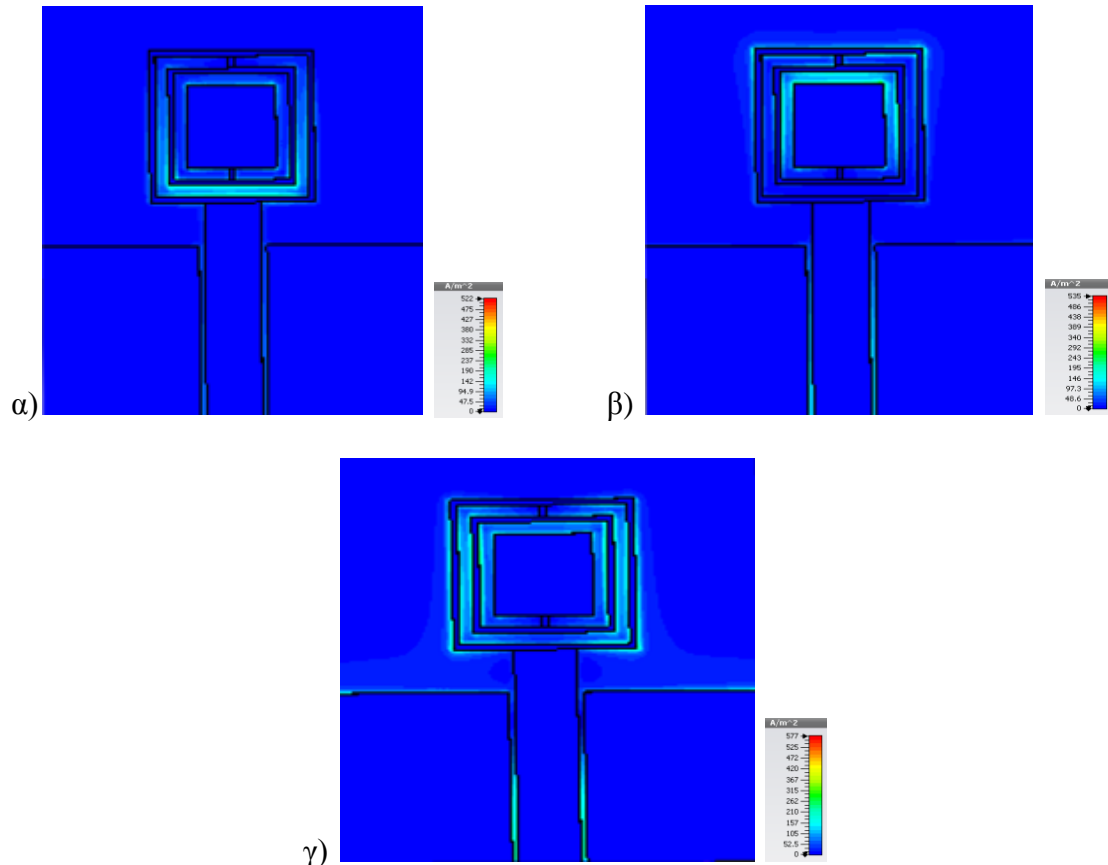


Εικόνα 3.51: Διάγραμμα ακτινοβολίας για τη συχνότητα α) 2.408 GHz β) 4.025 GHz.

Στην πρώτη περίπτωση (εικόνα 3.58 α) η μέγιστη κατευθυντικότητα αντιστοιχεί στα 4.8 dBi, ενώ στην δεύτερη (εικόνα 3.58 β) σε 2.37 dBi.

Διαγράμματα μέσης πυκνότητας ρεύματος

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται τα διαγράμματα μέσης πυκνότητας ρεύματος στις συχνότητες συντονισμού.



Εικόνα 3.59: Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ρεύματος για τη συχνότητα: α) 2.408 β) 4.025 γ) 5.785.

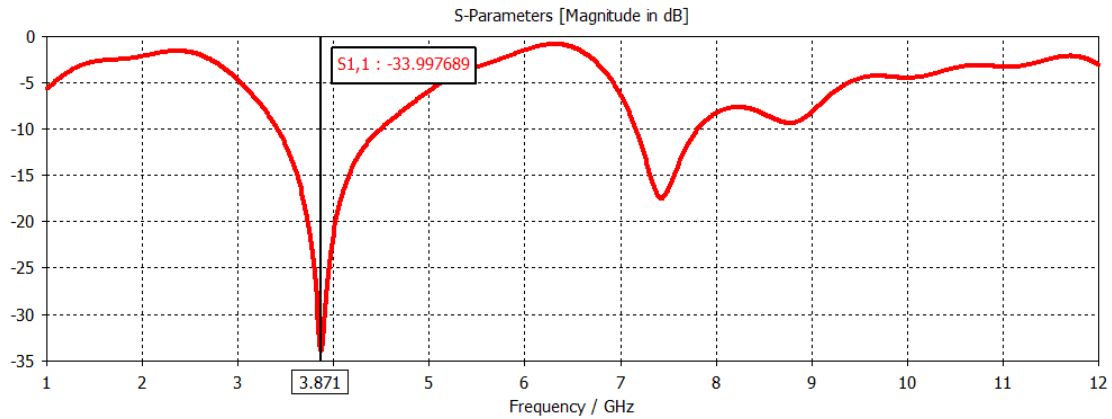
Διαπιστώνουμε ότι στη συχνότητα 2.408 GHz (εικόνα 3.59α) το ρεύμα συσσωρεύεται κυρίως στο κάτω τμήμα του συμπληρωματικού διασπαστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR), στη συχνότητα 4.025 GHz (εικόνα 3.59β) η ροή ρεύματος πυκνώνει στο άνω μέρος του συμπληρωματικού διασπαστή διακεκομμένου δακτυλίου, ενώ στη συχνότητα 5.785 GHz (εικόνα 3.59γ) το ρεύμα διαρρέει κυρίως στα πλευρικά τμήματα του συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου.

3.4.3 Μονοπολική κεραία με ανοιχτό συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου

Για την περαιτέρω διερεύνηση του ρόλου του συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) στη συχνότητα της κεραίας, προσομοιώσαμε τη κεραία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα αφαιρώντας από το CSRR τα βραχυκυκλώματα (closures) [6].

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προτεινόμενη κεραία παρουσιάζει ελάχιστη απώλεια επιστροφής -33.99 dB στη συχνότητα 3.871 GHz και -17.5 dB στα 7.424 GHz. Σύμφωνα με το άρθρο [6], η πρώτη συχνότητα που η παράμετρος S_{11} λαμβάνει ελάχιστη τιμή είναι τα 4.244 GHz.



Εικόνα 3.60: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

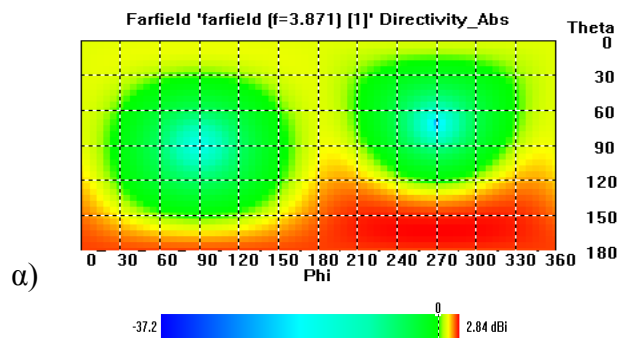
Πίνακας 13: Απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	9 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
3.871	4.125 – 4.494	369	9.53
7.424	7.16 – 7.81	650	8.75

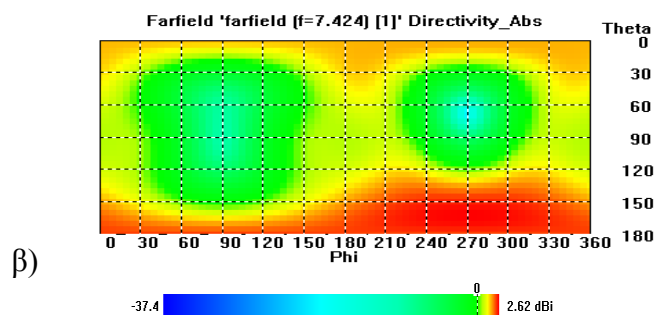
Παρατηρούμε ότι με την αφαίρεση των κλεισμάτων (closures) από το συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) αυξήθηκε η πρώτη συχνότητα που η παράμετρος S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της.

Δυσδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε δισδιάστατη μορφή για τις συχνότητες συντονισμού απεικονίζονται παρακάτω.



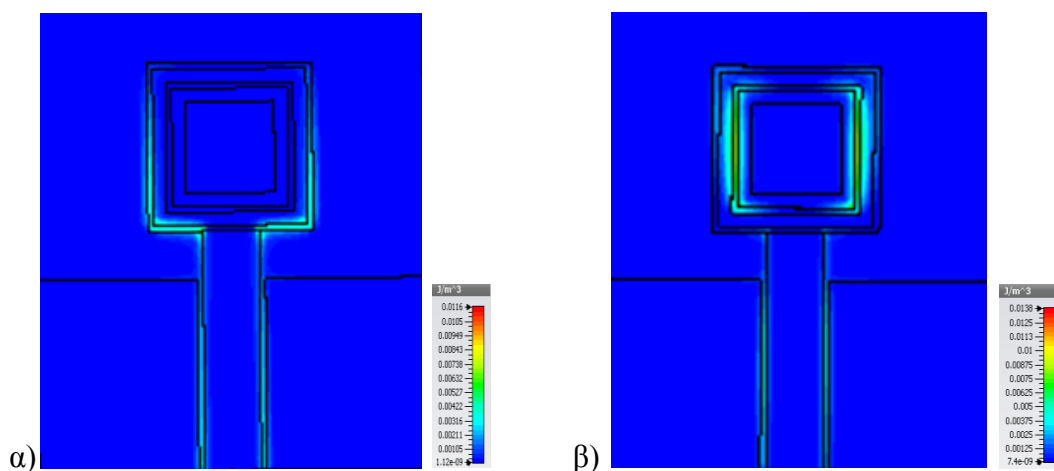
α)



Εικόνα 3.61: Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για α) 3.871 GHz β) 7.424 GHz.

Διαγράμματα πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας

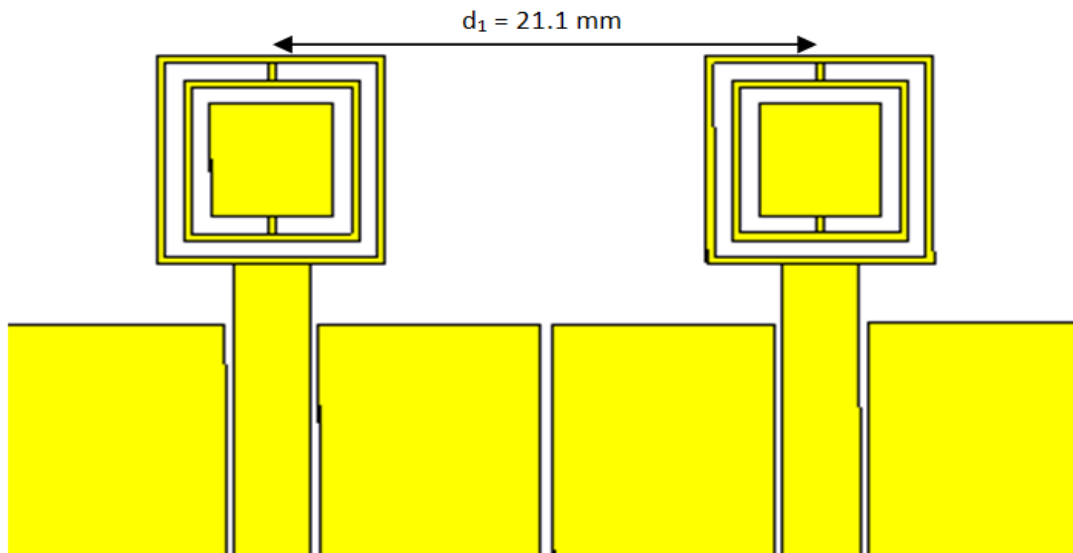
Ακολούθως παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής της μαγνητικής ενέργειας στις συχνότητες συντονισμού.



Διαπιστώνουμε ότι στα 3.871 GHz η μαγνητική ενέργεια συσσωρεύεται στο εξωτερικό κάτω τμήμα του συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR), ενώ στα 7.424 GHz η ροή της μαγνητικής ενέργειας πυκνώνει στο εσωτερικό πλευρικό τμήμα του συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου.

3.4.4 Στοιχειοκεραία MIMO για ελάττωση της αμοιβαίας σύζευξης

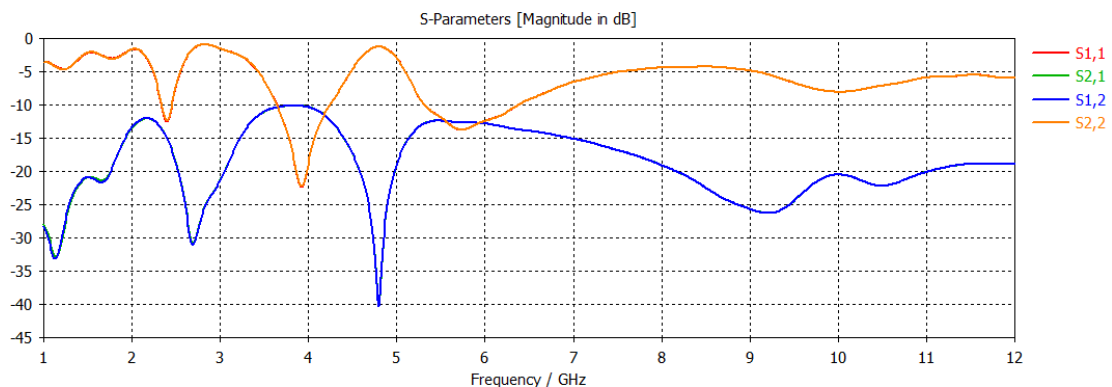
Έπειτα, με τη χρήση του μονοπόλου που περιγράφηκε στην ενότητα 3.4.2 ως βάση, κατασκευάστηκε μια 2 x 2 διαμόρφωση, επιτυγχάνοντας συστηματική ελαχιστοποίηση της αμοιβαίας σύζευξης με τη χρήση ενός μόνο αρνητικού συντονιστή μεταυλικών (SNG). Η αμοιβαία σύζευξη στοιχειοκεραίας προκαλείται όταν δυο κεραίες είναι κοντά η μια με την άλλη, είτε κάποια ή και οι δυο εκπέμπουν ή λαμβάνουν, κάποιο ποσό ενέργειας που προορίζεται για τη μία, καταλήγει στην άλλη. Το ποσό αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κάθε κεραίας, τη σχετική απόσταση μεταξύ τους και το σχετικό μεταξύ τους προσανατολισμό.



Εικόνα 3.63: Στοιχειοκεραία με συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

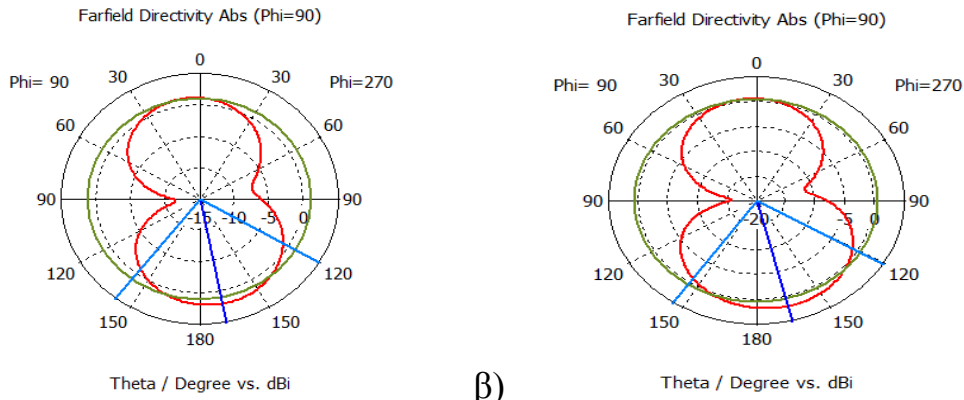
Το διάγραμμα απώλειας επιστροφής δίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Η κεραία έχει τρεις ζώνες λειτουργίας, από 2.335 GHz μέχρι 2.455 GHz (120 MHz εύρος συχνοτήτων), από 3.64 GHz έως 4.245 GHz (605 MHz εύρος συχνοτήτων) και από 5.312 GHz μέχρι 6.382 GHz (1070 MHz εύρος συχνοτήτων) με κεντρικές συχνότητες στα 2.397 GHz, 3.926 GHz και 5.73 GHz. Στο επιστημονικό άρθρο [6], οι συχνότητες συντονισμού της κεραίας είναι 2.45 GHz, 4.256 GHz και 5.68 GHz.



Εικόνα 3.64: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας..

Διαγράμματα ακτινοβολίας

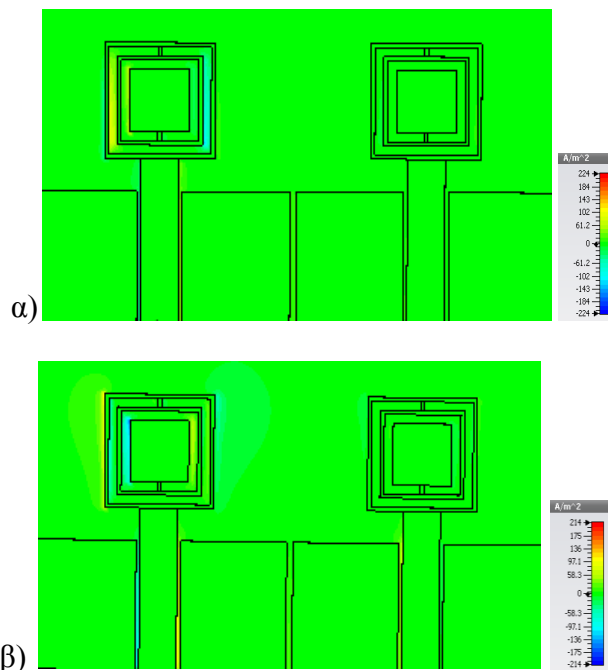
Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή ως προς το επίπεδο y για τις δυο πρώτες συχνότητες συντονισμού.



α) β)
 Εικόνα 3.65: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή στις συχνότητες α) 2.397 GHz β) 3.926 GHz.

Διαγράμματα μέσης πυκνότητας ρεύματος

Τα διαγράμματα μέσης πυκνότητας ρεύματος ως προς x για τις δυο πρώτες συχνότητες συντονισμού απεικονίζονται παρακάτω.



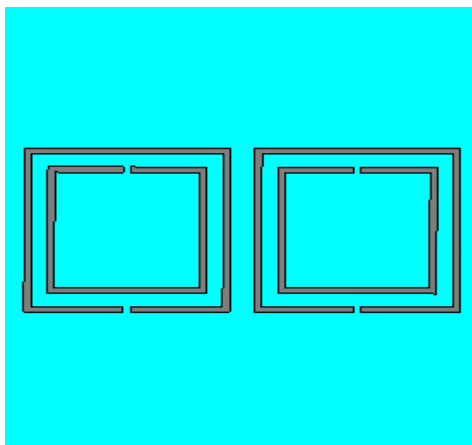
α) β)
 Εικόνα 3.66: Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ρεύματος στοιχειοκεραίας για α) 2.397 GHz β) 3.926 GHz.

Διαπιστώνουμε και για τις δυο συχνότητες ότι το ρεύμα πυκνώνει κυρίως στο συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) και στο ενδιάμεσο της ταινίας τροφοδοσίας και του επιπέδου γείωσης του δεξιού μονοπόλου.

3.5 Μονοπολική κεραία με υπόστρωμα μεταλλικών

Στη συνέχεια, διερευνήσαμε τη συμπεριφορά των ανωτέρω μονοπολικών κεραιών με την ενσωμάτωση δυο διατάξεων συντονιστών διακεκομμένου δακτυλίου (SRR) με μηδενικό πάχος στην πίσω όψη του υποστρώματος και την προσθήκη ενός επιπλέον

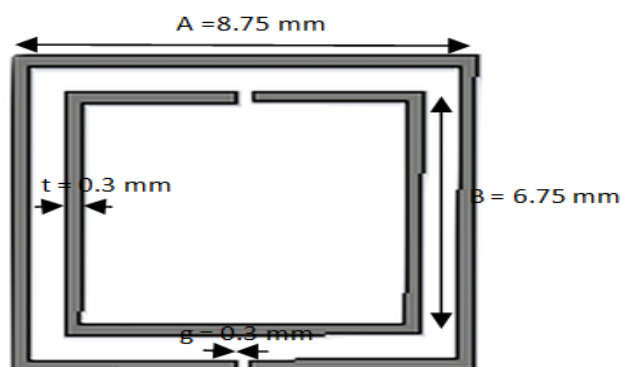
όμοιου υποστρώματος, έτσι ώστε τα μεταλλικά να βρίσκονται στο ενδιάμεσο των δυο υποστρωμάτων.



Εικόνα 3.67: Υπόστρωμα κεραίας με δυο διατάξεις μεταλλικών.

3.5.1 Μονόπολο με υπόστρωμα μεταλλικών

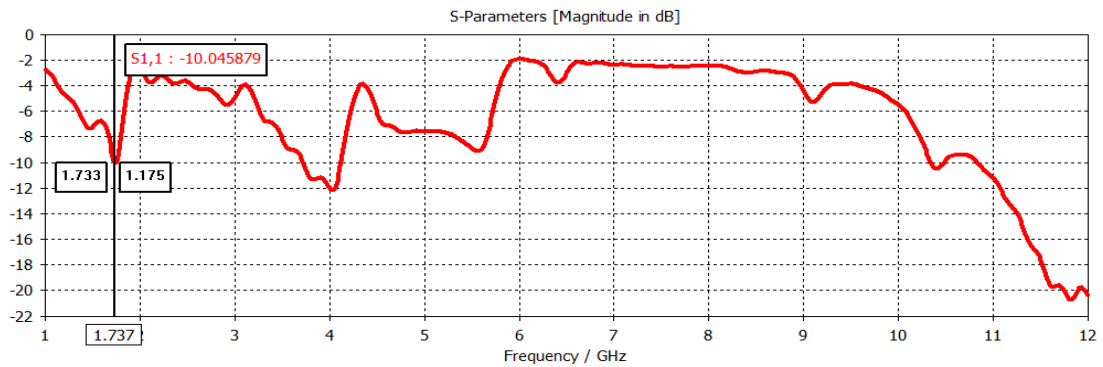
Διατηρήσαμε τη διάταξη της κεραίας που αναλύσαμε στην υποενότητα 3.1 και ελαττώσαμε το μήκος της ορθογώνιας μεταλλικής ταινίας σε $L = 4.7$ mm. Στη συνέχεια, προσθέσαμε στην πίσω όψη του υποστρώματος δυο διατάξεις μεταλλικών (εικόνα 3.61) και ένα όμοιο υπόστρωμα.



Εικόνα 3.68: Γεωμετρία του συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου που βρίσκεται ενδιάμεσα των δυο υποστρωμάτων.

Αποτελέσματα πορσομοίωσης

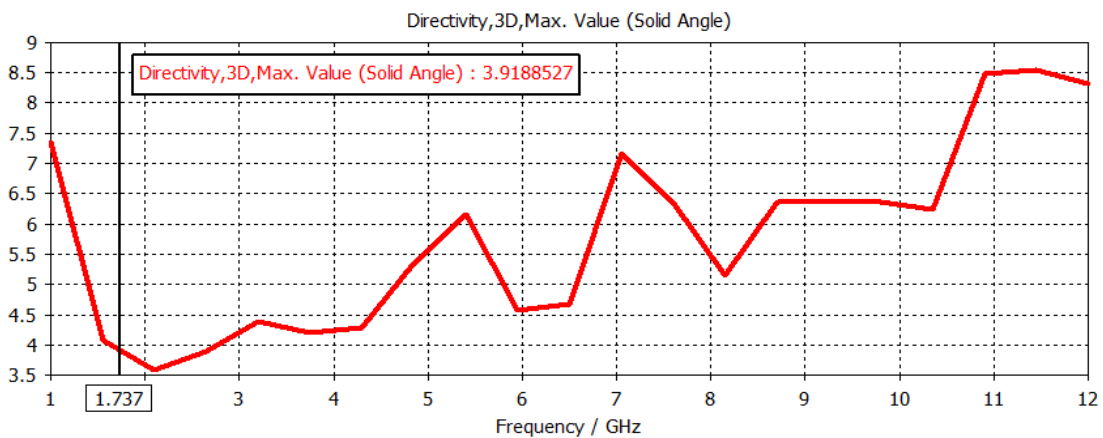
Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα απώλειας επιστροφής σε σχέση με τη συχνότητα της προτεινόμενης κεραίας.



Εικόνα 3.69: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό οι διατάξεις των συντονιστών διακεκομμένων δακτυλίων (SRR) στο υπόστρωμα της κεραίας έχουν πολύ θετική επίδραση στη συχνότητα λειτουργίας της κεραίας. Η κεραία λειτουργεί σε τρεις ζώνες συχνοτήτων, από 1.733 GHz μέχρι 1.75 GHz (17 MHz εύρος συχνοτήτων) , από 3.721GHz έως 4.121 GHz (400 MHz εύρος συχνοτήτων) και από 10.345 GHz μέχρι 10.749 GHz (404 MHz εύρος συχνοτήτων) με κεντρικές συχνοτητες τα 1.737 GHz, 4.025 GHz και 10.405 GHz.

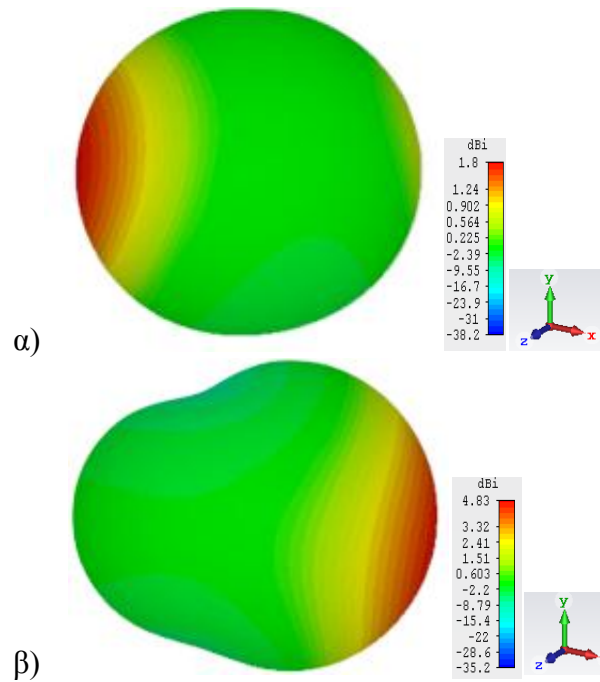
Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας για το εύρος συχνοτήτων από 1-12 GHz. Παρατηρούμε ότι στα 1.737 GHz, η κατευθυντικότητα έχει τιμή 3.918 dBi.



Εικόνα 3.70: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

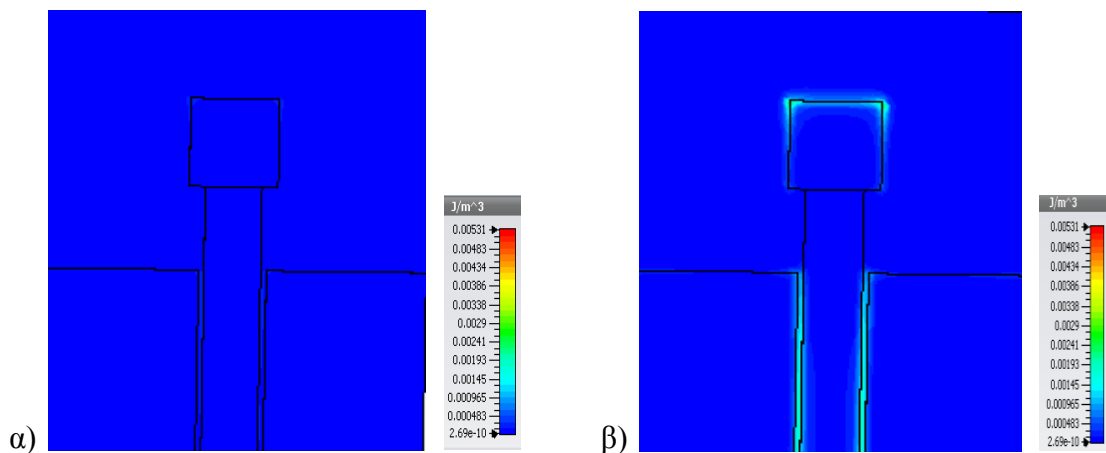
Στην εικόνα 3.71 οπτικοποιούνται τα τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας των μονοπόλων στις δυο πρώτες κεντρικές συχνοτητες.



Εικόνα 3.71: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στη συχνότητα α) 1.737 GHz και β) 4.025 GHz.

Διαγράμματα μέσης πυκνότητας ηλεκτρικής ενέργειας

Στην εικόνα 3.72 αποτυπώνονται τα διαγράμματα της μέσης πυκνότητας ηλεκτρικής ενέργειας για τις συχνότητες 1.737 GHz και 4.025 GHz.



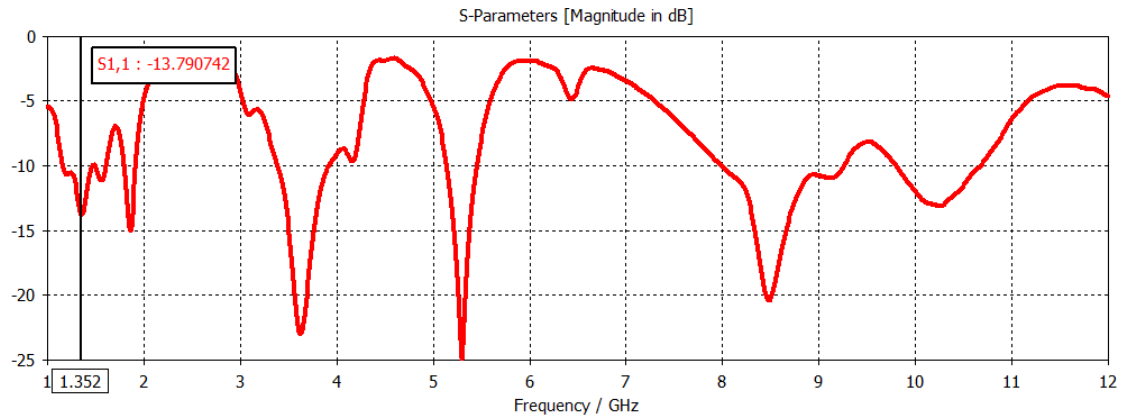
Εικόνα 3.72: Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ηλεκτρικής ενέργειας για α) 1.737 GHz β) 4.025 GHz.

Διαπιστώνουμε ότι στη συχνότητα 4.025 GHz, η ηλεκτρική ενέργεια συγκεντρώνεται στα δυο άνω άκρα της μεταλλικής ταινίας και στο ενδιάμεσο τμήμα του επιπέδου γείωσης και της γραμμής τροφοδοσίας.

3.5.2 Μονοπολική κεραία με συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου και υπόστρωμα μεταλλικών

Εξετάσαμε την επίδραση των διατάξεων των μεταλλικών στη μονοπολική κεραία με ενσωματωμένο συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου που μελετήσαμε στην υποενότητα 3.4.2, με την προσθήκη δυο διατάξεων συντονιστών

διακεκομμένων δακτυλίων στην πίσω όψη του υποστρώματος (εικόνα 3.68) και ενός επιπλέον υποστρώματος, προκειμένου τα μεταλλικά να βρίσκονται ενδιάμεσα τους. Στη συνέχεια, προσομοιώσαμε τη κεραία. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν προβάλλονται παρακάτω.



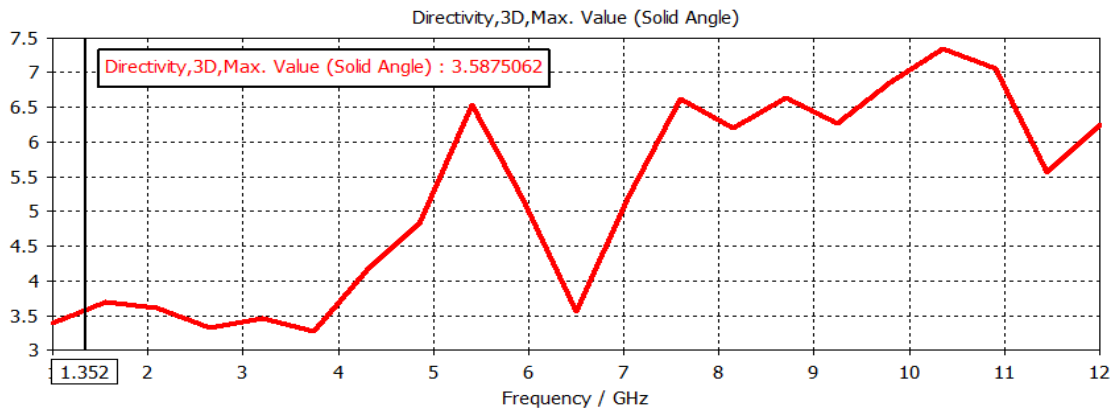
Εικόνα 3.73: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Όπως είναι φανερό και από την εικόνα 3.73, η κεραία λειτουργεί σε 7 διαφορετικές ζώνες λειτουργίας. Παρατηρείστε ότι η προσθήκη του υποστρώματος μεταλλικών βελτιστοποιεί σημαντικά τη λειτουργία της κεραίας, καθώς η πρώτη συχνότητα που η παράμετρος S_{11} λαμβάνει ελάχιστη τιμή ελαττώνεται στα 1.352 GHz. Η απόδοση της προτεινόμενης κεραίας συνοψίζεται στον πίνακα 15.

Πίνακας 14: Απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	9 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
1.352	1.159 – 1.473	314	23.22
1.561	1.49 – 1.606	116	7.431
1.858	1.793 – 1.915	122	6.56
3.618	3.384- 3.92	536	14.81
5.301	5.139 – 5.45	311	5.87
8.491	7.99 – 9.257	1267	14.92
10.251	9.8 – 10.68	880	8.58

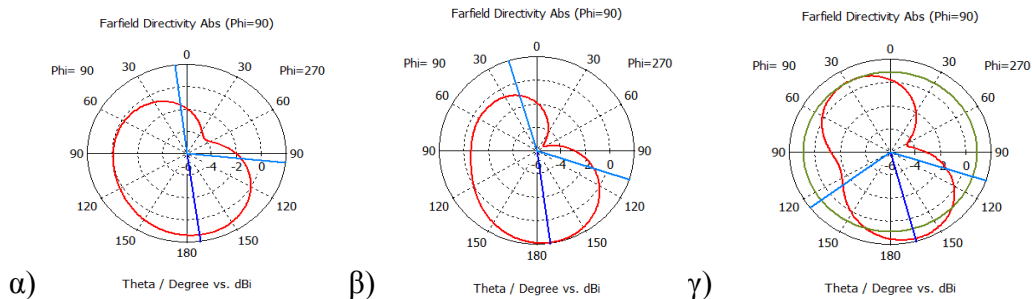
Στην εικόνα 3.74 αποτυπώνεται το διάγραμμα κατευθυντικότητας σε σχέση με τη συχνότητα για τη συχνοτική περιοχή 1-12 GHz. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η κατευθυντικότητα είναι 7.348 dBi στα 10.35 GHz, ενώ στην πρώτη συχνότητα συντονισμού έχει τιμή 3.58 dBi.



Εικόνα 3.74: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας προτεινόμενης κεραίας.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

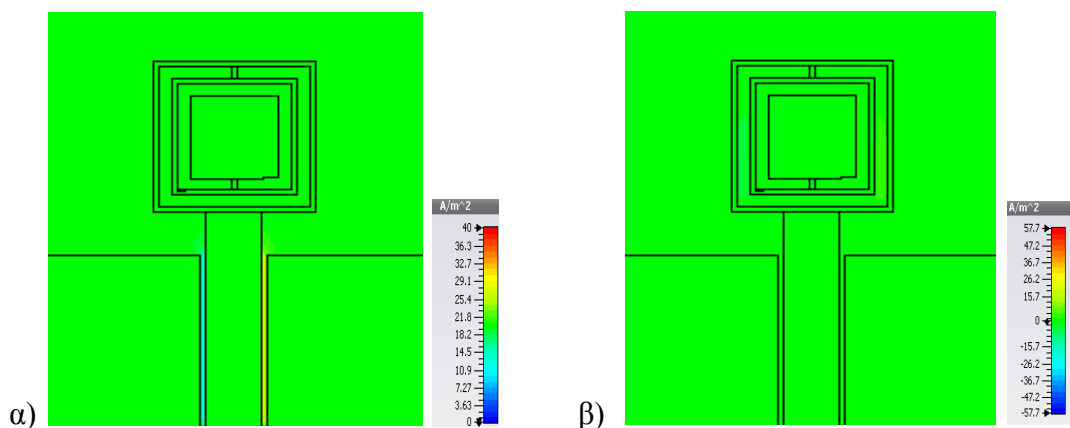
Στην συνέχεια, απεικονίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή ως προς το επίπεδο y για τις τρεις πρώτες συχνότητες συντονισμού.

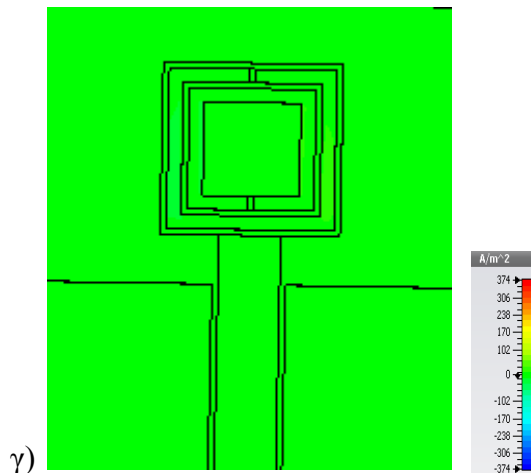


Εικόνα 3.75: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για τις συχνότητες α) 1.352 GHz β) 1.561GHz γ) 1.858 GHz.

Διαγράμματα μέσης πυκνότητας ρεύματος

Ακολουθως, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μέσης πυκνότητας ρεύματος ως προς x για τις πρώτες τρεις κεντρικές συχνότητες.



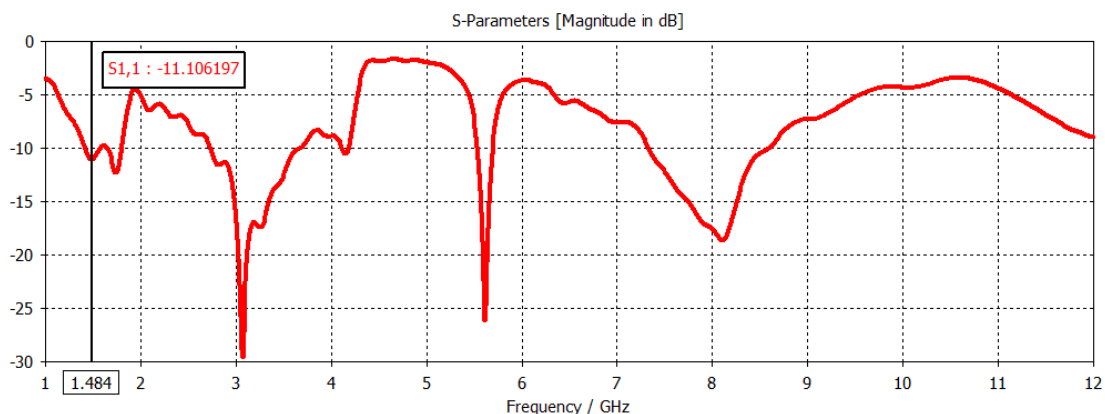


Εικόνα 3.76: Διάγραμμα μέσης πυκνότητας ρεύματος για τις συχνότητες α) 1.352 GHz β) 1.561GHz γ) 1.858 GHz.

Παρατηρούμε ότι στη συχνότητα 1.352 GHz η ροή ρεύματος πυκνώνει ενδιάμεσα της ταινίας τροφοδοσίας και του επιπέδου γείωσης με μέγιστη τιμή τα 40 A/m².

3.5.3 Μονοπολική κεραία με ανοιχτό συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου και υπόστρωμα μεταλλικών

Ελέγξαμε τη λειτουργία της κεραίας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.4.3 με την προσθήκη δυο διατάξεων μεταλλικών μηδενικού πάχους στην πίσω όψη του υποστρώματος (εικόνα 3.68) και την ενσωμάτωση ενός επιπλέον υποστρώματος όμοιο με το υπόστρωμα τη κεραίας. Διαπιστώσαμε ότι η συμπεριφορά της κεραίας είναι σημαντικά πιο βελτιωμένη σε σχέση με τη κεραία που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.4.3. Από το διάγραμμα απώλειας επιστροφής (εικόνα 3.77) παρατηρούμε ότι η πρώτη συχνότητα που η παράμετρος S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή είναι πολύ ελαττωμένη εν συγκρίσει με αυτή της κεραίας χωρίς το υπόστρωμα μεταλλικών. Η προτεινόμενη κεραία λειτουργεί σε 5 διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και το εύρος ζώνης λειτουργίας είναι πολύ ικανοποιητικό.

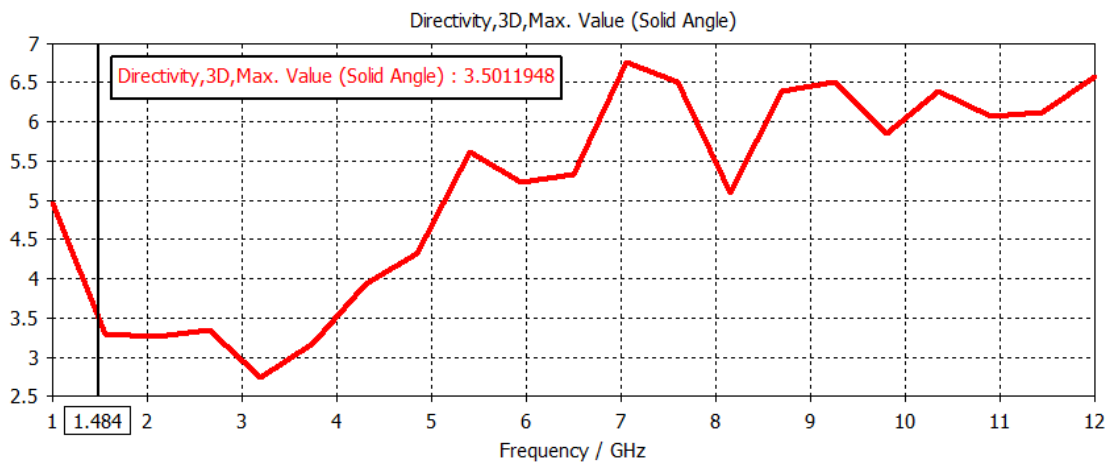


Εικόνα 3.77: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής της προτεινόμενης κεραίας.

Πίνακας 15: Απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	10 dB Impedence Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
1.484	1.142 – 1.579	437	29.45
1.748	1.647 – 1.798	151	8.64
3.068	2.731 – 5.692	2961	96.51
4.157	4.114 – 4.183	69	1.66
8.106	7.329 – 8.601	1272	15.7

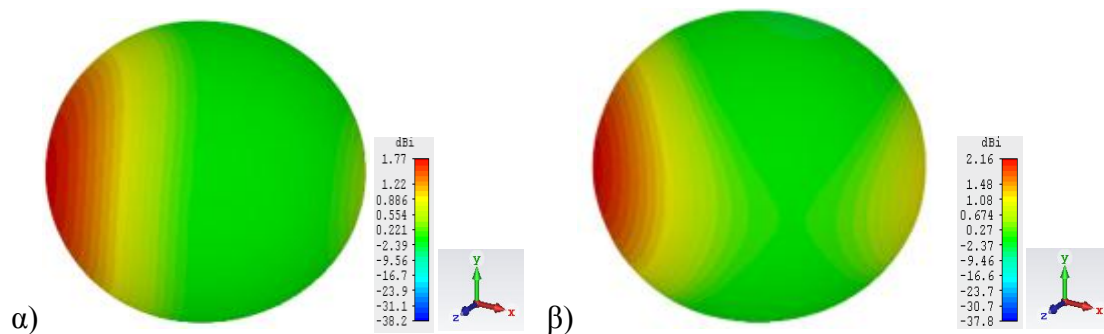
Στην εικόνα 3.78 αποτυπώνεται το διάγραμμα κέρδους – συχνότητας της κεραίας. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η κατευθυντικότητα είναι 6.7568 dBi στη συχνότητα 7.05 GHz, ενώ στην πρώτη συχνότητα συντονισμού λαμβάνει την τιμή 3.5 dBi.

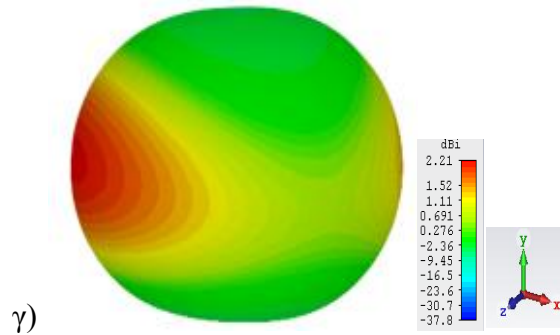


Εικόνα 3.78: Διάγραμμα κέρδους - συχνότητας της προτεινόμενης κεραίας.

Διάγραμματα ακτινοβολίας

Παρακάτω απεικονίζονται τα τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας στις τρεις πρώτες συχνότητες συντονισμού.

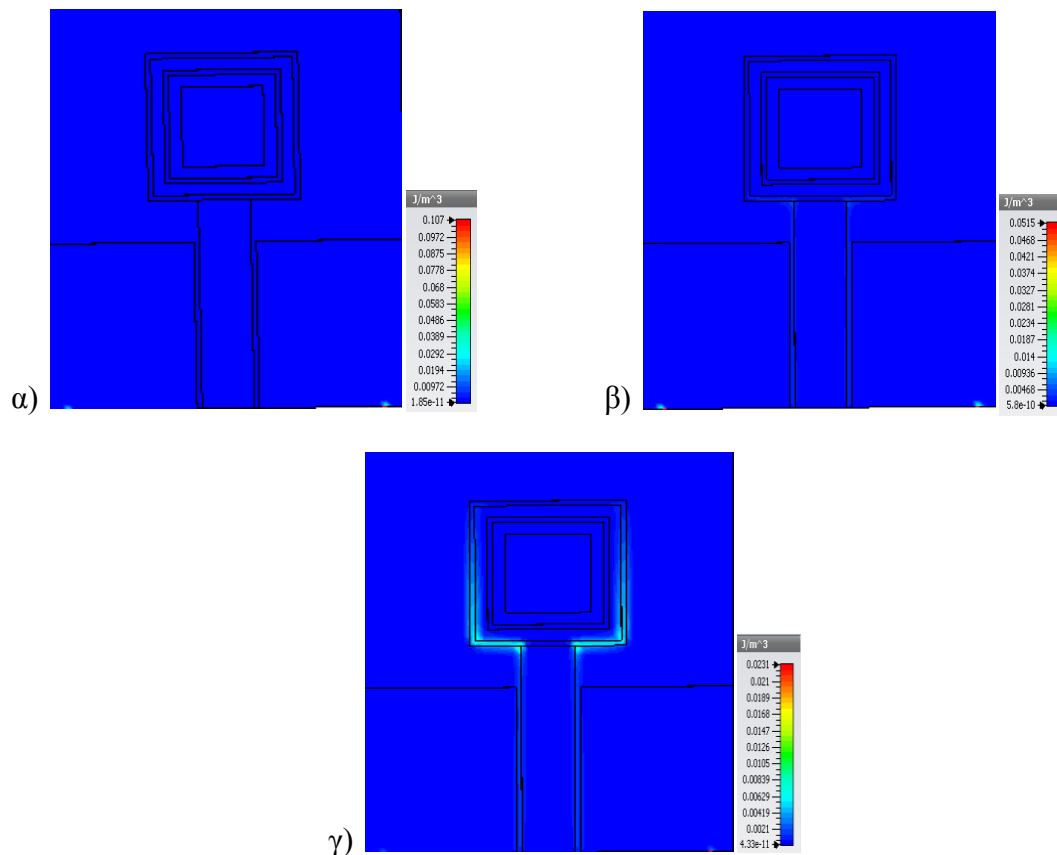




Εικόνα 3.79: 3D διαγράμματα ακτινοβολίας για τις συχνότητες α) 1.484 GHz β) 1.748 GHz και γ) 3.068 GHz.

Διαγράμματα πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας

Στη συνέχεια, παρατηρούνται τα διαγράμματα πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας στις τρεις πρώτες συχνότητες που ο συντελεστής S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή.



Εικόνα 3.80: Διάγραμμα μέσης πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας για τις συχνότητες α) 1.484 β) 1.748 γ) 3.068.

Παρατηρούμε ότι στις δυο πρώτες εικόνες υπάρχει μικρή ποσότητα μαγνητικής ενέργειας στο κάτω τμήμα του επιπέδου γείωσης, ενώ για τη συχνότητα 3.068 GHz η μαγνητική ενέργεια πυκνώνει στο κάτω τμήμα του εξωτερικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου λαμβάνοντας μέγιστη τιμή 0.0231 J / m^3 .

3.5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

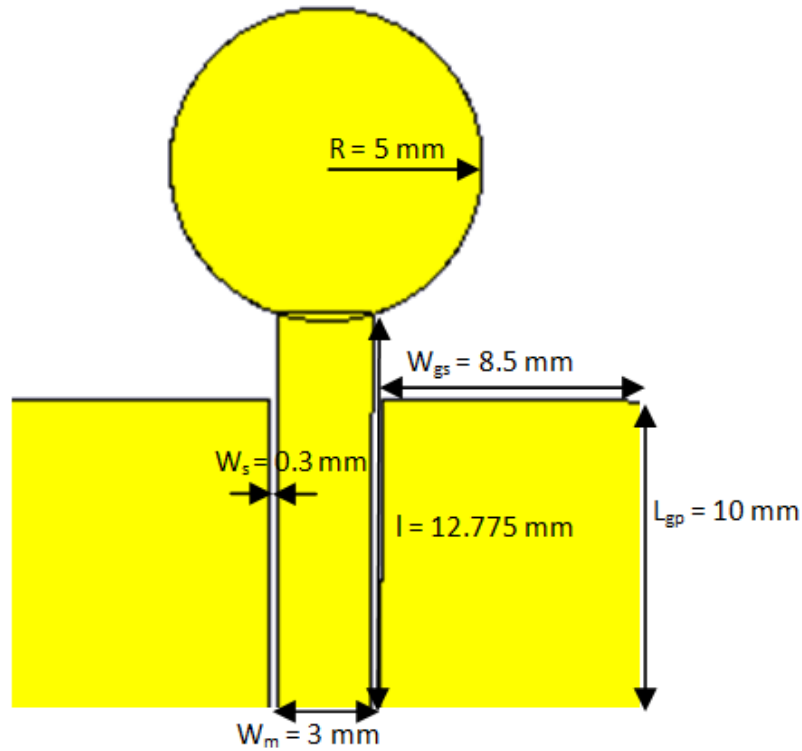
Η προσθήκη των διατάξεων των αριστερόστροφων υλικών ενδιάμεσα των δυο υποστρωμάτων επέφερε πολύ θετικά αποτελέσματα στη λειτουργία των μονοπόλων που μελετήσαμε. Ελαττώθηκε σημαντικά η συχνότητα συντονισμού των κεραιών, διευρύνθηκε το εύρος λειτουργίας τους, καθώς βελτιώθηκε σημαντικά και η απόδοση τους. Επομένως, η επιλογή της γεωμετρίας, της τοποθεσίας και του αριθμού των μεταλλικών ήταν ορθή.

3.6 Επίδραση μεταλλικών σε κυκλική κεραία μικροταινίας

Σχεδιάσαμε και προσομοιώσαμε την κεραία που απεικονίζεται στην εικόνα 3.81. Έπειτα, προσθέσαμε έναν κυκλικό συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) και έναν κυκλικό ανοιχτό συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (OCSRR), προκειμένου να ελέγξουμε πιθανές μεταβολές στη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά της κεραίας.

3.6.1 Μονοπολική κεραία με κυκλική μεταλλική ταινία

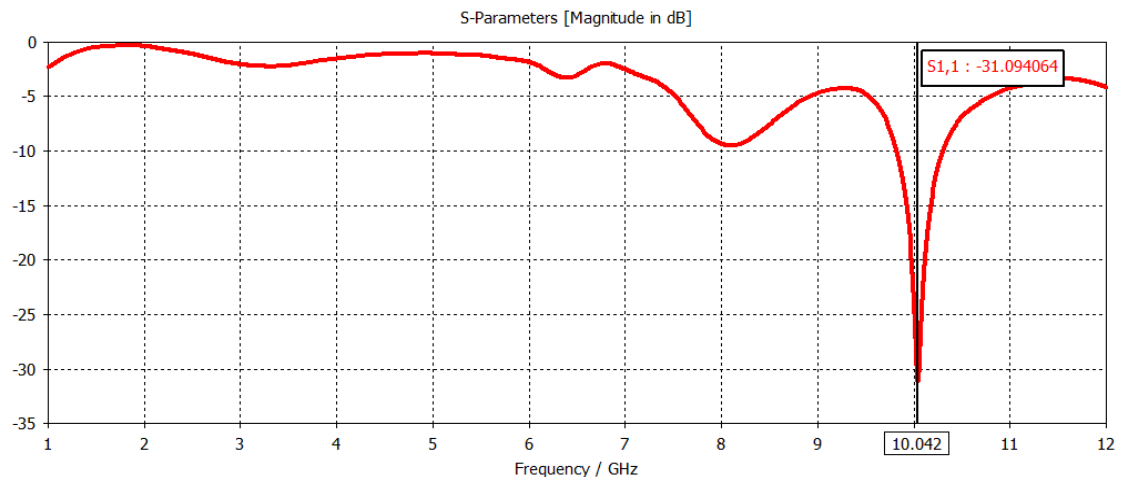
Η κεραία που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.81 αποτελείται από μια λεπτή κυκλική μεταλλική ταινία ακτίνας R και από μια γραμμή τροφοδοσίας μήκους l και πλάτους w_m . Η μονοπολική κεραία έχει πάχος $z = 30 \mu\text{m}$ και είναι τυπωμένη πάνω σε ένα FR-4 υπόστρωμα, το οποίο παρουσιάζει διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.4$ και απώλειες εφαιπτομένης $\tan\delta = 0.02$. Στη δεξιά και αριστερή πλευρά του υποστρώματος, σε απόσταση w_s από τη γραμμή τροφοδοσίας τυπώνεται το επίπεδο γείωσης με πλάτος L_{gp} και μήκος W_{gp} .



Εικόνα 3.81: Διαστάσεις μονοπολικής κεραίας με κυκλική μεταλλική ταινία.

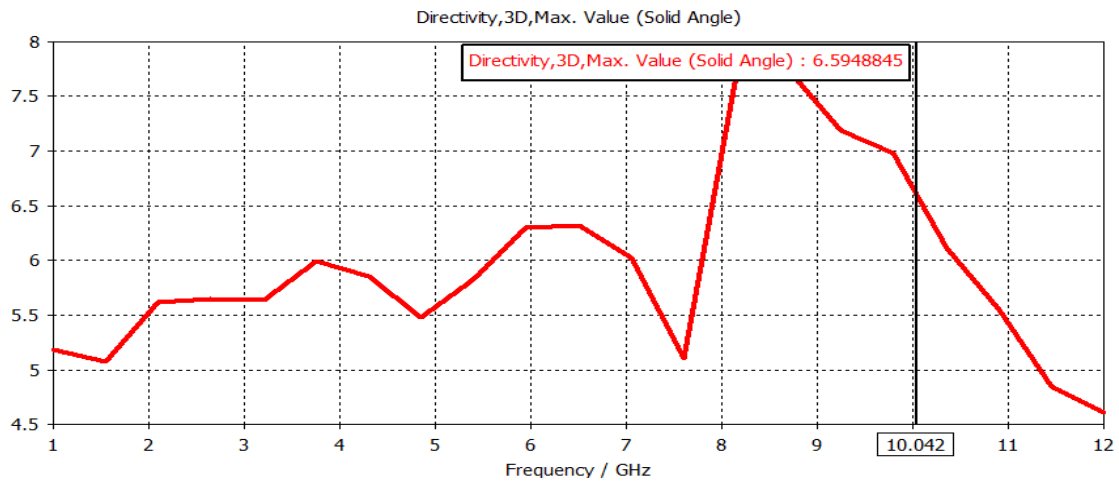
Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην εικόνα 3.82 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης της κεραίας, με όρους της υπολογισμένης απώλειας επιστροφής (return loss – S11) σε dB. Η κεραία επιτυγχάνει απώλεια επιστροφής -31.94 dB στη συχνότητα 10.042 GHz.



Εικόνα 3.82: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής – συχνότητας.

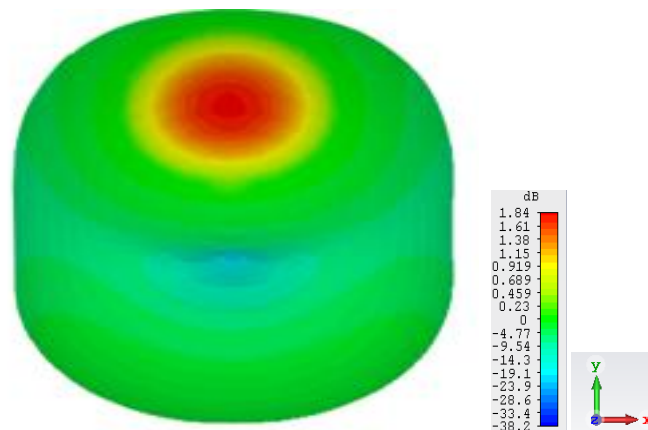
Στη συνέχεια, οπτικοποιείται το διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας της κεραίας για το εύρος συχνοτήτων 1 – 12 GHz. Η τιμή της κατευθυντικότητας στα 10.042 GHz είναι 6.594 dBi, ενώ η μέγιστη τιμή που λαμβάνει είναι 7.34 dBi στη συχνότητα 8.7 GHz.



Εικόνα 3.83: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας.

Διάγραμμα ακτινοβολίας

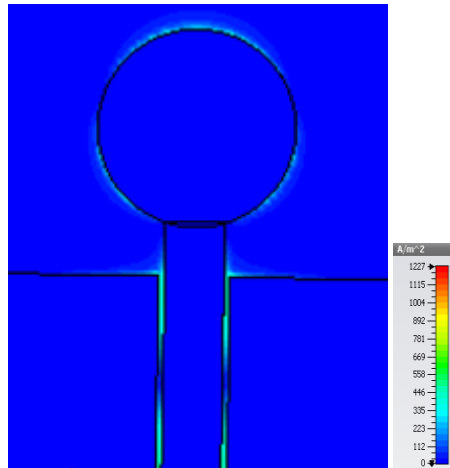
Το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας στα 10.042 GHz αποτυπώνεται στην εικόνα 3.84.



Εικόνα 3.84: 3D διάγραμμα ακτινοβολίας.

Διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος

Στη συνέχεια, απεικονίζεται το διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος στη συχνότητα συντονισμού.

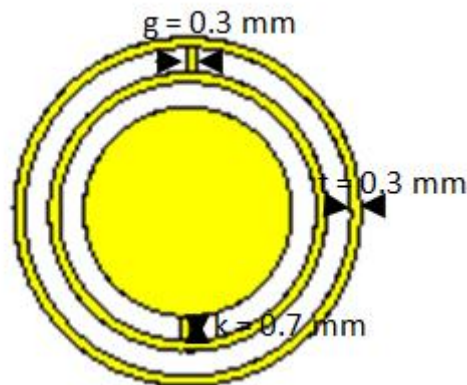


Εικόνα 3.85: Διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος της κεραίας.

Από το ανωτέρω διάγραμμα πληροφορούμαστε ότι το ρεύμα συσσωρεύεται κυρίως ενδιάμεσα της ταινίας τροφοδοσίας και του επιπέδου γείωσης, καθώς και διαμετρικά της κυκλικής μεταλλικής ταινίας.

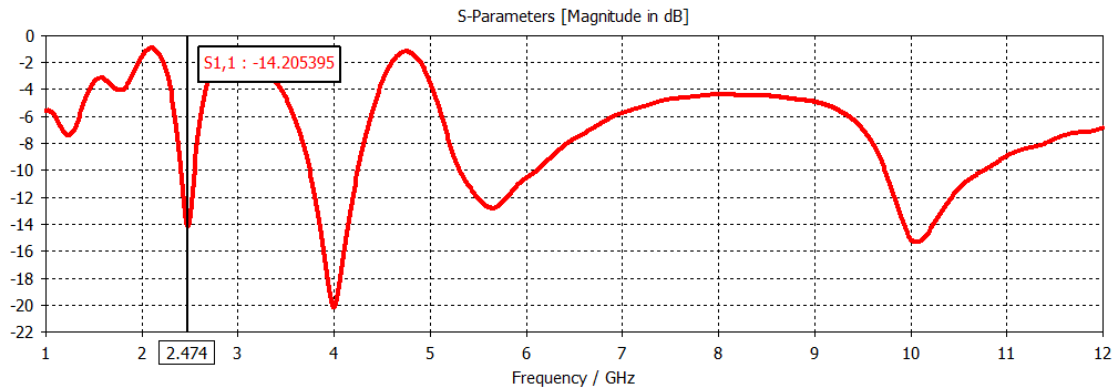
3.6.2 Μονοπολική κεραία με κυκλική μεταλλική ταινία και συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου

Ελαττώνοντας την ακτίνα R της ορθογώνιας μεταλλικής ταινίας σε $R = 3 \text{ mm}$, ενσωματώσαμε στο εξωτερικό της μέρος ένα συμπληρωματικό διασπαστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR). Η γεωμετρία της ορθογώνιας μεταλλικής ταινίας με τον ενσωματωμένο συμπληρωματικό διασπαστή διακεκομμένου δακτυλίου παρουσιάζεται στην εικόνα 3.86.



Εικόνα 3.86: Συμπληρωματικός συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα απώλειας επιστροφής συχνότητας για το εύρος συχνοτήτων από 1 μέχρι 12 GHz.



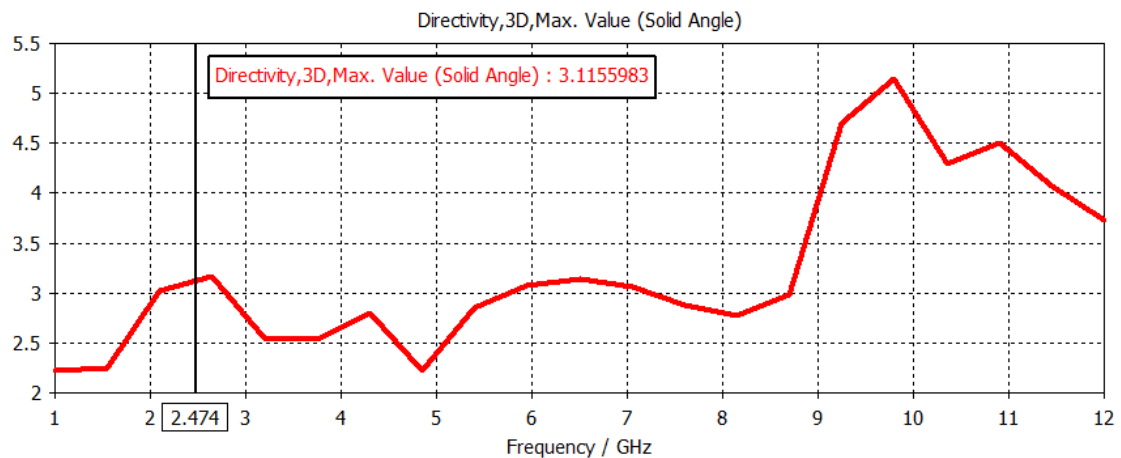
Εικόνα 3.87: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής – συχνότητας.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα 16.

Πίνακας 16: Απόδοση της προτεινόμενης κεραίας.

Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	10 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)	Εύρος Ζώνης (%)
2.474	2.405 – 2.544	139	5.62
3.992	3.744 – 4.246	502	12.57
5.653	5.304 – 6.115	811	14.34
10.064	9.731 – 10.768	1037	10.3

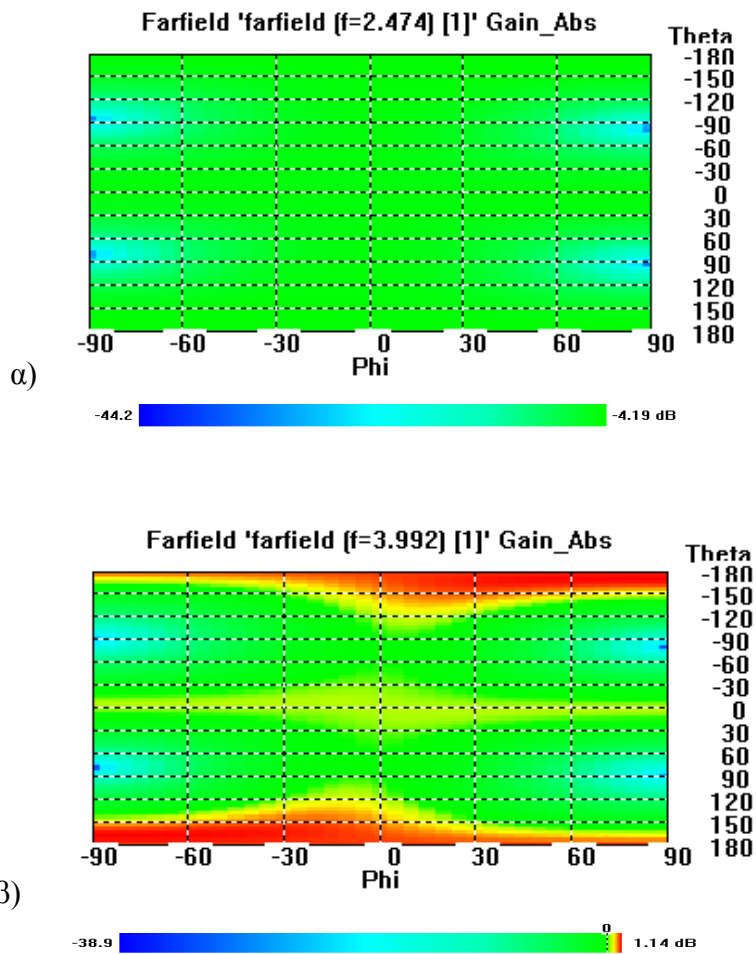
Το διάγραμμα κατευθυντικότητας - συχνότητας της κεραίας οπτικοποιείται στην εικόνα 3.88.



Εικόνα 3.88: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

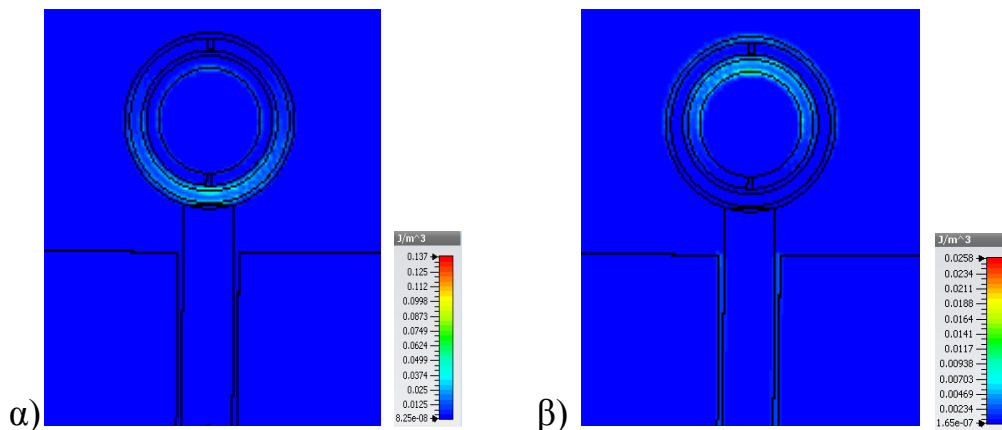
Στην εικόνα 3.89 αποτυπώνονται τα δισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας για τις δυο πρώτες συχνότητες συντονισμού.



Εικόνα 3.89: Δισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας για συχνότητα α) 2.474 GHz β) 3.992 GHz.

Διαγράμματα πυκνότητας ηλεκτρικής ενέργειας

Ακολούθως παρουσιάζονται τα διαγράμματα πυκνότητας ηλεκτρικής ενέργειας για τις συχνότητες 2.474 GHz και 3.992 GHz.



Εικόνα 3.90: Διαγράμματα πυκνότητας ηλεκτρικής ενέργειας για τις συχνότητες α) 2.474 GHz β) 3.992 GHz.

Διαπιστώνουμε από την εικόνα 3.90α ότι στα 2.474 GHz η ηλεκτρική ενέργεια πυκνώνει στο κάτω τμήμα του συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου

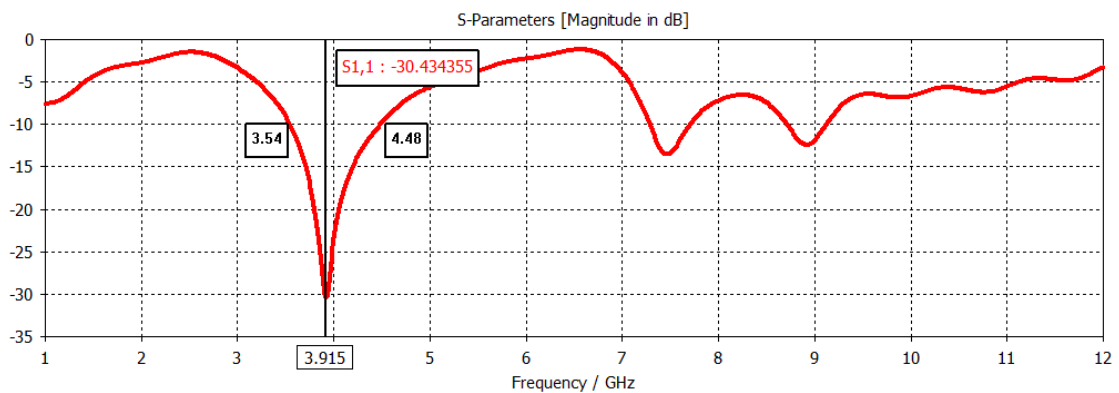
δακτυλίου (CSRR). Στη συχνότητα 3.992 GHz συσσωρεύεται στο άνω τμήμα του CSRR.

3.6.3 Μονοπολική κεραία με κυκλική μεταλλική ταινία και ανοιχτό συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου

Προσομοιώσαμε την κεραία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα αφαιρώντας από το CSRR τα βραχυκυκλώματα (closures).

Αποτελέσματα προσομοίωσης

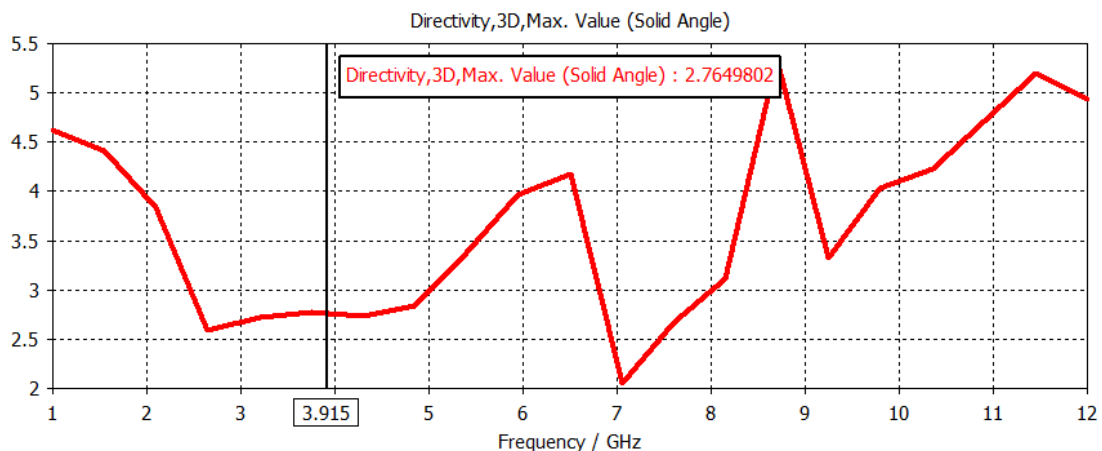
Το διάγραμμα απώλειας επιστροφής που προέκυψε μετά την προσομοίωση της προτεινόμενης κεραίας οπτικοποιείται στην εικόνα 3.91.



Εικόνα 3.91: Διάγραμμα απώλειας επιστροφής – συχνότητας.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η προτεινόμενη κεραία λειτουργεί στις συχνότητες από 3.54 GHz έως 4.48 GHz (940 MHz εύρος ζώνης), από 7.28 GHz μέχρι 7.71 GHz (430 MHz εύρος ζώνης) και από 8.711 GHz έως 9.125 GHz με κεντρικές συχνότητες 3.915 GHz, 7.468 GHz και 8.92 GHz.

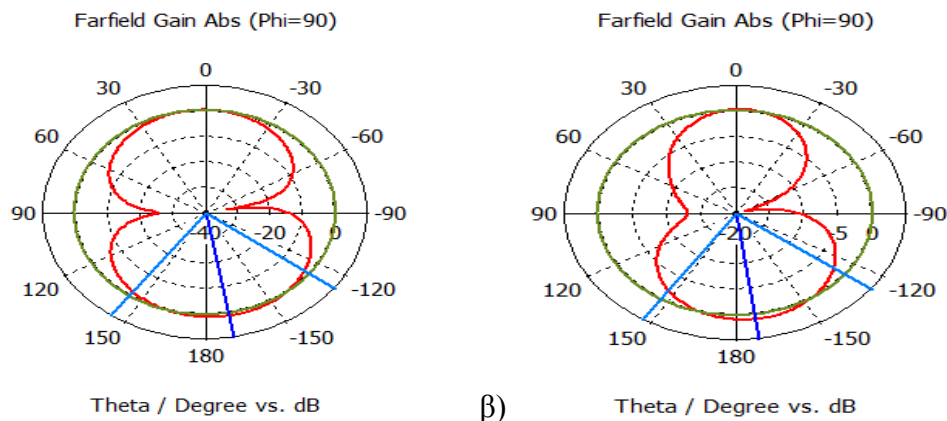
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας για το εύρος συχνοτήτων από 1 μέχρι 12 GHz.



Εικόνα 3.92: Διάγραμμα κατευθυντικότητας – συχνότητας.

Διαγράμματα ακτινοβολίας

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για τις συχνότητες 3.915 GHz και 7.468 GHz, ως προς το επίπεδο xz αποτυπώνονται στην εικόνα 3.93.

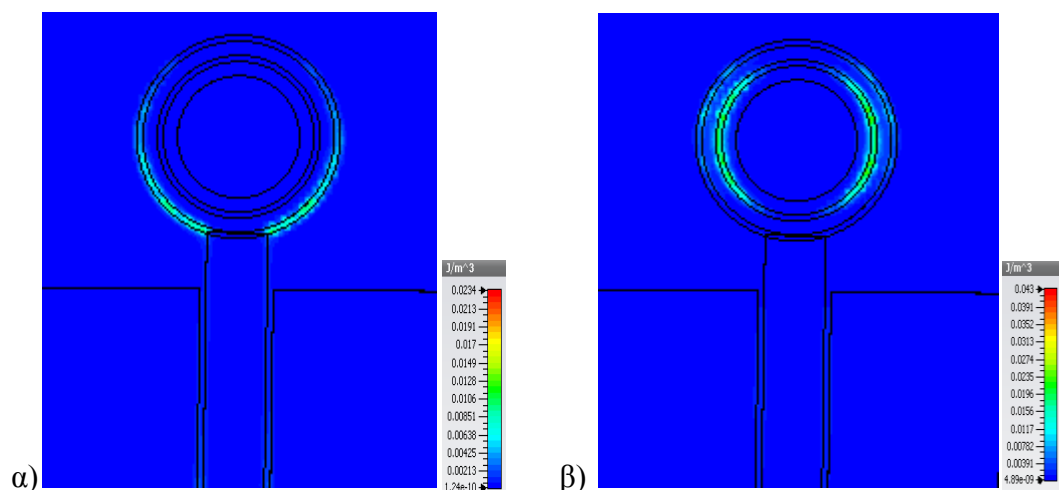


Εικόνα 3.93: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για τις συχνότητες α) 3.915 GHz β) 7.468 GHz.

Στην πρώτη περίπτωση (εικόνα 3.93α) το μέγεθος του κύριου λοβού είναι 1.13 dB και η κατεύθυνση του -170.0 deg, ενώ στη δεύτερη (εικόνα 3.93β) το μέγεθος του κύριου λοβού αντιστοιχεί στην τιμή 0.968 dB και η κατεύθυνση του ισούται με -172.0 deg.

Διαγράμματα πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας

Τα διαγράμματα πυκνότητας της μαγνητικής ενέργειας παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 3.94: Διαγράμματα μέσης μαγνητικής ενέργειας για τις συχνότητες α) 3.915 GHz β) 7.468 GHz.

Από την εικόνα 3.94α διαπιστώνουμε ότι στα 3.915 GHz η μαγνητική ενέργεια πυκνώνει στο κάτω τμήμα του εξωτερικού OCSR. Στα 7.468 GHz παρατηρούμε ότι η μαγνητική ενέργεια συσσωρεύεται στα πλευρικά τμήματα του εσωτερικού OCSR.

3.6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τις ανωτέρω προσομοιώσεις συμπεράναμε ότι οι προτεινόμενες διατάξεις των μεταλλικών δρουν θετικά στη λειτουργία της κεραίας. Με την προσθήκη του συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSR) σημειώθηκε σημαντική ελάττωση της πρώτης συχνότητας συντονισμού της κεραίας κατά 306%. Επιπλέον, διευρύνθηκε το εύρος συχνοτήτων που λειτουργεί η κεραία, καθώς και η απόδοση της. Αντίστοιχα, με την ενσωμάτωση του ανοιχτού συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (OCSR) παρατηρείται μικρή μείωση της συχνότητας που ο συντελεστής S_{11} λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του. Συνεπώς, η προσθήκη μεταλλικών και ιδιαίτερα του CSR βελτιώνει σημαντικά τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της μονοπολικής κεραίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Μονοπολική κεραία με κυκλική μεταλλική ταινία και συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου – Αποτελέσματα μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις της απώλειας επιστροφής της κεραίας που περιγράψαμε αναλυτικά στην υποενότητα 3.6.2, της οποίας η κατασκευή έχει ολοκληρωθεί. Ακολουθεί μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μέτρησης και της προσομοίωσης και τελικά, επισημαίνονται παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου η μέτρηση να είναι ακριβής. Η κεραία κατασκευάστηκε και μετρήθηκε στο εργαστήριο τηλεπικοινωνιών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το πρωτότυπο της κεραίας που κατασκευάστηκε απεικονίζεται στις εικόνες 4.1α και 4.1β. Στο σχήμα 4.1α απεικονίζεται η μπροστινή όψη της κεραίας, όπου φαίνεται η κυκλική μεταλλική ταινία, η οποία περιβάλλεται από συμπληρωματικό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) και η μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας που ένα άκρο της συνδέεται με συνδετήρα SMA, μέσω του οποίου γίνεται η τροφοδοσία της κεραίας. Στο δεξί και αριστερό τμήμα της ταινίας τροφοδοσίας τυπώνονται τα γνωστά αγωγή τμήματα.

4.2 Μέτρηση απώλειας επιστροφής

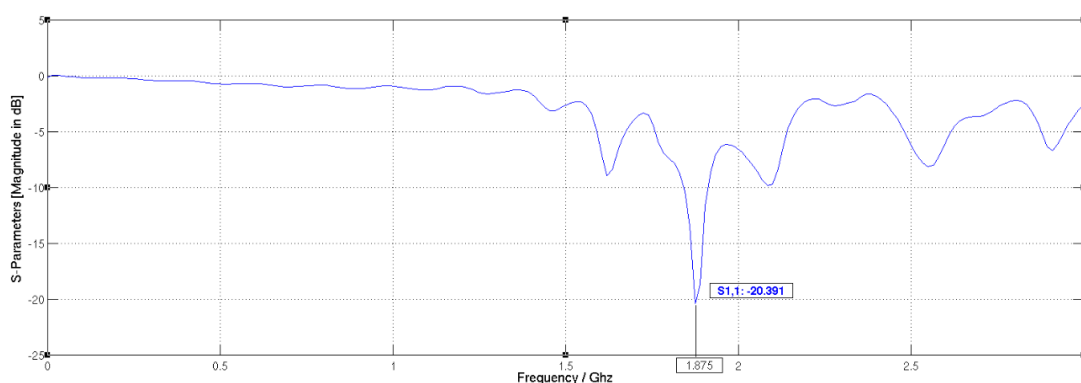
Η μέτρηση της απώλειας επιστροφής της πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του αναλυτή δικτύων 8714ES της Hewlett Packard. Ο αναλυτής δικτύων 8714ES, έχει τη δυνατότητα να εκτελεί πλήρεις και ακριβείς μετρήσεις του συντελεστή S_{11} . Το εύρος λειτουργίας του αναλυτή, εκτείνεται από τα 300 kHz και καλύπτουν μια περιοχή συχνοτήτων που φτάνει μέχρι τα 3 GHz. Το εύρος συχνοτήτων στο οποίο πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της κεραίας του σχήματος 4.1 είναι από 0.0003 GHz μέχρι 3 GHz. Το εύρος αυτό περιλαμβάνει τη μία ζώνη (τη χαμηλότερη) από τις τέσσερις που λειτουργεί η κεραία.



Εικόνα 4.1: α) Μπροστινή όψη. β) Πίσω όψη της κεραίας.

4.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων μέτρησης και προσομοίωσης

Οι απώλειες επιστροφής (παράμετρος S_{11}) που μετρήθηκαν με τη βοήθεια του αναλυτή κυκλωμάτων, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2. Η κεραία που κατασκευάστηκε παρουσιάζει ικανοποιητικό εύρος συχνοτήτων (130 MHz). Παρόλα αυτά, η συχνότητα στην οποία παρουσιάζει τον πρώτο συντονισμό είναι χαμηλότερη εν συγκρίσει με την αντίστοιχη κεραία που προσομοιώθηκε στο λογισμικό. (Σημειώνεται ότι σε μια δοκιμαστική μέτρηση με άλλο αναλυτή στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών μετρήθηκε η πρώτη συχνότητα συντονισμού στα 2.58 GHz).



Εικόνα 4.2: Η μετρούμενη απώλεια επιστροφής (παράμετρος S_{11} σε dB) σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

Πιθανοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τη μέτρηση είναι:

- Η κόλληση του συνδετήρα πάνω στη γραμμή τροφοδοσίας, που αν δεν γίνει προσεκτικά μπορεί να εισάγει σφάλματα και να επηρεάσει τη μέτρηση. Τα σφάλματα αυτά, ενδέχεται να οδηγήσουν σε κακή προσαρμογή της κεραίας στη γραμμή τροφοδοσίας.
- Η αποχάλκωση των τμημάτων που δεν ανήκουν στην κεραία, που πραγματοποιείται κατά το στάδιο της κατασκευής, μπορεί να το χαράξει το διηλεκτρικό υπόστρωμα. Η χάραξη, θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ανομοιομορφιών και ανωμαλιών στο τμήμα του διηλεκτρικού κάτω από την αποχάλκωμένη επιφάνεια και επομένως θα επηρεάσει το αποτέλεσμα.

Τέλος, στον πίνακα 17 συνοψίζονται μερικά αποτελέσματα που αφορούν στους συντονισμούς της κεραίας, τα οποία προέκυψαν κατά τη μέτρηση και την προσομοίωση της.

Πίνακας 17: Συγκριτικός πίνακας.

Αποτελέσματα	Ζώνη Λειτουργίας (GHz)	10 dB Impedance Bandwidth	Εύρος Ζώνης (MHz)
Προσομοίωσης	2.474	139	5.62
Μέτρησης	1.875	130	6.93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η μελέτη και ο έλεγχος του τρόπου λειτουργίας των σύγχρονων κεραιών με την επίδραση διατάξεων μεταυλικών. Στο πρώτο κεφάλαιο, έγινε μια σύντομη εισαγωγή για τις κεραιές και τα είδη τους και ακολούθησε μια συνοπτική περιγραφή των μεταυλικών. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στις σημαντικότερες επιστημονικές μελέτες που έχουν υλοποιηθεί στον τομέα της επιρροής των αριστερόστροφων υλικών στη συμπεριφορά των κεραιών. Τέλος, έγινε μια περιληπτική αναφορά στο στόχο και το περιεχόμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής διατριβής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν οι βασικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των μεταυλικών που τα διαφοροποιούν σε σχέση με τα συμβατικά μέσα διάδοσης, όπως η “αριστερόστροφη” φύση τους, η αντιστροφή του νόμου του Snell και του φαινομένου Doppler. Αναφέρθηκαν λεπτομερώς τα είδη και οι βασικοί τύποι των αριστερόστροφων υλικών και παρουσιάστηκαν οι σημαντικότερες εφαρμογές τους. Παρατέθηκαν ορισμένες αριθμητικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για την υπολογιστική μελέτη της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα μεταυλικά και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο FDTD.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύθηκαν και σχεδιάστηκαν οι κεραιές, στις οποίες διερευνήθηκαν πιθανές μεταβολές στον τρόπο λειτουργίας τους μετά την προσθήκη διατάξεων μεταυλικών. Αρχικά, εξετάστηκε η αλλαγή του τρόπου λειτουργίας μιας κεραιάς αποτελούμενη από ένα ομοαξονικό υπό την επίδραση μιας και δυο διατάξεων συντονιστών διακεκομμένων δακτυλίων (SRR). Κατόπιν, διερευνήθηκε η συμπεριφορά μιας κεραιάς μικροταινίας με την προσθήκη τεσσάρων, εννιά, δεκαέξι, εικοσιπέντε και τριανταέξι διατάξεων μεταυλικών μηδενικού πάχους, τα οποία ενσωματώθηκαν στο ενδιάμεσο επίπεδο δυο όμοιων υποστρωμάτων. Για την ίδια κεραιά, μελετήθηκε ο τρόπος λειτουργία της με την τοποθέτηση τριών, έξι, δεκαπέντε και δεκαοχτώ διατάξεων τυπωμένων στην μπροστινή όψη του υποστρώματος της κεραιάς. Επιπλέον, διερευνήθηκε η συμπεριφορά μονοπολικής κεραιάς με τετράγωνη και κυκλική μεταλλική ταινία με την ενσωμάτωση ενός συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (CSRR) και ενός ανοιχτού συμπληρωματικού συντονιστή διακεκομμένου δακτυλίου (OCSRR). Για τις κεραιές με τετράγωνη μεταλλική ταινία ακολούθησε προσθήκη δυο διατάξεων συντονιστών διακεκομμένων δακτυλίων στην πίσω όψη των υποστρωμάτων τους και χρήση ενός επιπλέον υποστρώματος, προκειμένου τα μεταυλικά να βρίσκονται ενδιάμεσα τους. Τέλος, επιλέγοντας τη μονοπολική κεραιά με τους ενσωματωμένους συντονιστές διακεκομμένων δακτυλίων (CSRR) σαν βάση μελετήθηκε μια MIMO στοιχειοκεραία.

Συμπεράναμε ότι για τη βελτίωση του αποτελέσματος παίζουν σημαντικό ρόλο πολλοί παράμετροι. Οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι ο τύπος των διατάξεων των μεταυλικών που χρησιμοποιείται, η θέση στην οποία αυτά θα τοποθετηθούν, οι διαστάσεις και το πάχος των δακτυλίων, η απόσταση μεταξύ των δυο δακτυλίων, καθώς και το κενό του δακτυλίου (thickness between rings). Η ορθή επιλογή των

παραγόντων που προαναφέρθηκαν δύναται να οδηγήσει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της κεραίας.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που λάβαμε κατά το στάδιο της έρευνας ήταν ενθαρρυντικά. Με τη χρήση των μεταυλικών παρατηρήθηκε σημαντική ελάττωση της συχνότητας που συντονίζεται η κεραία, διεύρυνση του εύρους ζώνης λειτουργίας της και βελτίωση του κέρδους και της απόδοσης της. Συμπερασματικά, τα μεταυλικά έχουν πολλές προοπτικές εξέλιξης και είναι σίγουρο ότι θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των επικοινωνιών.

5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που σημειώθηκαν θα μπορούσαν να αποτελέσουν αφετηρία για την επέκταση της έρευνας της επίδρασης των μεταυλικών στη λειτουργία των σύγχρονων κεραιών. Κάποιες κατευθύνσεις στις οποίες θα μπορούσε να επεκταθεί η παρούσα εργασία είναι οι εξής:

- Περαιτέρω βελτίωση της λειτουργίας των κεραιών που μελετήθηκαν με την προσθήκη διαφορετικών διατάξεων μεταυλικών, με σκοπό την επίτευξη οξύτερων συντονισμών και μεγαλύτερου εύρους ζώνης.
- Βελτίωση της λειτουργίας της στοιχειοκεραίας MIMO με την ενσωμάτωση των κατάλληλων διατάξεων μεταυλικών στην πίσω όψη του υποστρώματος ή την προσθήκη ενός επιπλέον υποστρώματος.
- Έλεγχος της ελάττωσης της ακτινοβολούμενης ισχύος των κεραιών που μελετήθηκαν με τη χρήση των αριστερόστροφων υλικών που εκπέμπονται στον ανθρώπινο εγκέφαλο.
- Ελάττωση των διαστάσεων της κεραίας που κατασκευάστηκε και αύξηση της απόδοσης της με την επιλογή διαφορετικών διατάξεων μεταυλικών.
- Σε πειραματικό στάδιο, υλοποίηση των κεραιών που αναλύσαμε, με σκοπό τον έλεγχο της λειτουργίας τους σε φυσικό περιβάλλον.

Στις μέρες μας, η απαίτηση για βελτίωση της λειτουργίας των σύγχρονων κεραιών και για ελάττωση του μεγέθους τους δύναται να ικανοποιηθεί με την επίδραση των αριστερόστροφων υλικών. Η αναζήτηση διατάξεων που θα μπορούν να παρέχουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, αποτελεί σημαντική πρόκληση για τους σχεδιαστές κεραιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Engheta Nader and Ziolkowski W. Richard, "Metamaterials Physics and Engineering Explorations", A John Wiley and sons inc, 2006
- [2] Yang Hao and Raj Mittra, "FDTD Modeling of Metamaterials", Artech House 2009
- [3] Suong V. Hoa, "Science and Engineering of Composite Materials", 2014
- [4] Kamil Boratay Alici and Ekmel Ozbay "Electrically Small Split Ring Resonator Antennas", Journal of Applied Physics, 2007
- [5] Jose L. da Silva, Humberto D. de Andrade, Humberto C. C. Fernades, Isaac B.T. da Silva, Idalmir de S.Q. Junior, Jonathan P.P. Pereira and Almir S.S. Neto, "Microstrip Patch Antenna Project with Split Ring Resonator Periodically Arrayed on the Substrate", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 57, no. 12, pp. 2720, 2015
- [6] Bourgis B. Nektarios and Yioultsis V. Traianos "Efficient Isolation between Electrically Small Metamaterial Inspired Monopole Antennas", Progress In Electromagnetics Research, vol.60, pp. 227 – 239, 2014
- [7] D.C. Zografopoulos, K.P Prokopidis, R. Dabrowski, R. Beccherelli and E.E. Kriezis, "MetaTHz, Liquid – Crystal THz Metamaterials",
- [8] Yuri S. Kivshar "Tunable and Nonlinear Metamaterials: Toward Functional Metadevices", Vietnam Academy of Science and Technology, pp. 1-8, 2014
- [9] Ilya Shadrivov "Nonlinear Metamaterials: A New Degree of Freedom", SPIE, 2008
- [10] Μπολογεώργιος Απόστολος, "Ανάλυση Σχεδίαση και Εφαρμογές Μεταλλικών", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012
- [11] Καμπιτάκης Μύρων, "Ανάλυση και Σχεδίαση Μικροκυματικών Μεταλλικών Μέσων", Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2011
- [12] Πανταζής Αλέξανδρος, "Μεταλλικά Συντονισμού Mie με Ευρυζωνική ή/και Πολυζωνική Απόκριση", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015
- [13] Κωστάρας Ερατοσθένης, "Μεταλλικά Κατηγορίες, Κατασκευή, Ιδιότητες και Εφαρμογές", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010
- [14] Τερζίδου Αντωνία, "Ιδιότητες και Εφαρμογές Μεταλλικών και Υπολογιστική Μοντελοποίηση Απλών Διατάξεων", Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, 2015
- [15] Mikael Käll, "Materialen som Trotsar Naturlagna", Tech World, 2010
- [16] Sunny Bains, "March of the Metamaterials", SPIE, 2008
- [17] Filiberto Bilotti "Metamaterials", 2015
- [18] Duncan Graham – Rowe "Cloaking Breakthrough", MIT Technology Review 2006
- [19] Στότας Στέργιος "Υπολογιστική Ανάλυση και Χαρακτηρισμός Μεταλλικών", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2008
- [20] Greg Gbur and Skyskull "Invisibility: After Several Years of Research, it's just gotten weirder", Scientific American Medicine
- [21] Pekka Alitalo and Sergei Tretyakov "Electromagnetic cloaking with metamaterials", Materialstoday, vol. 12, no. 3, pp. 22-29, 2009

- [22] Iyami, Mehrnam and Nouman Siddiki "FDTD", 2016
- [23] Κυρίμη Βασιλική, "Διερεύνηση της Οπτικής Συμπεριφοράς του Μανδύα Αορατότητας Επιπέδου με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου", Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011
- [24] Subhash Yadav, "Uncoditionally Stable FDTD Methods", 2012
- [25] John B. Pendry and David R. Smith "Reversing Light with Negative Refraction", Physics Today, pp. 1 - 8, 2004
- [26] D. Laila, R. Sujith, C. M. Nijas, V. A. Shameena, R. Dinesh and P. Mohanan, "A Metamaterial Antenna with Reduced Radiation Hazards towards Human Head", Progress In Electromagnetics Research, pp. 564 – 568, 2012
- [27] C. Vindhya, G. S. Karthikeya, Sanjji N. Manjunath, K. Ullas and Bharath Raj, "Miniaturized Multiband Antenna with Modified Split-ring Resonator for WLAN/WiMAX Applications", Progress In Electromagnetics Research, pp. 1623 - 1626, 2015
- [28] Le-Wei Li, Ya-Nan Li, Tat Soon Yeo, Juan R. Mosig and Olivier J. F. Martin, "A broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna", Applied Physics Letters, 2010
- [29] Dang-Oh Kim and Uooyeol Yoon, "Mutual Coupling between Parasitic Elements of Split Ring Resonator on Antenna", Progress In Electromagnetics Research, pp.1830 – 1833, 2015
- [30] Sarin V. P., Jayakrishnan M. P., Aanandan C. K., Pezholil M. and Kesavath V., "A Metamaterial Backed Dipole Antenna for High Gain Directional Communications", Advanced Electromagnetics, vol.5, no.1, pp. 9 - 14, 2016
- [31] Surabhi Dwivedi, Vivekanand Mishra and Y.P.Kosta, "Design and Comparative analysis of a Metamaterial included Slotted Patch Antenna with a Metamaterial Cover over Patch", International Journal of Recent Technology and Engineering, vol.1, pp. 37 - 41, 2013
- [32] Li B., Wu B., and Liang C.-H., "Study on High Gain Circular Waveguide Array Antenna with Metamaterial Structure", no. 60, pp. 207 – 218, Progress In Electromagnetics Research, 2006
- [33] A. Ghaznavi Jahromi and F. Mohajeri, "Design and Fabrication of a Miniaturized Microstrip Antenna Loaded by DNG Metamaterial", vol.8, no.5, pp. 814 – 818, World Academy of Science, 2014
- [34] M. A. Abdalla, M. A. Fouad, H. A. Elregeily, and A. A. Mitkees, "Wideband Negative Permittivity Metamaterial for Size Reduction of Stopband Filter in Antenna Applications", Progress In Electromagnetics Research C, vol.25, pp. 55 -66, 2012
- [35] G.Divyasri, N. Gunaskaran, "Design of Patch Antenna for Multiband Operation Using Metamaterial", International Journal of Electrical and Computing Engineering, vol. 1, no. 4, pp. 5 – 10, 2015
- [36] Καφαντάρης Τάσος, "Τα απίστευτα Αριστερόστροφα υλικά", Βήμα – Science, 2003
- [37] Constantine A. Balanis, "Ανάλυση & Σχεδίαση", Εκδόσεις ίων, 2005
- [38] Δερμιτζάκη Μαρία, "Microstrip Κεραίες", ΤΕΙ Ηπείρου, 2006
- [39] Electromagnetics & Microwave Engineering, website, 2006 - 2011