



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη και Σχεδίαση Πολυζωνικών,
Ευρυζωνικών και Ηλεκτρικά μικρών Κεραιών
Ανεστραμμένης F Γεωμετρίας στις ζώνες 2-3GHz
και 5-6GHz με χρήση 3D Η/Μ Προσομοιωτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αφροδίτη Π. Κυρλιγκίτση

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008



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

**Μελέτη και Σχεδίαση Πολυζωνικών,
Ευρυζωνικών και Ηλεκτρικά μικρών Κεραιών
Ανεστραμμένης F Γεωμετρίας στις ζώνες 2-3GHz
και 5-6GHz με χρήση 3D Η/Μ Προσομοιωτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αφροδίτη Π. Κυρλιγκίτση

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Ιουλίου 2008

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2008

.....
Αφροδίτη Π. Κυρλιγκίτση

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αφροδίτη Κυρλιγκίτση, 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights 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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον Καθηγητή ΕΜΠ Φίλιππο Κωνσταντίνου για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να εκπονήσω την διπλωματική μου εργασία σε ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο της επιστήμης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ Κωνσταντίνο Κακόγιαννη για την καθοδήγηση, τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε, καθώς και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις του όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Αφροδίτη Κυρλιγκίτση

Ιούλιος 2008

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και η σχεδίαση πολυζωνικών, ευρυζωνικών και ηλεκτρικά μικρών τυπωμένων κεραιών, οι οποίες λειτουργούν στις ISM ζώνες συχνοτήτων 2-3GHz και 5-6GHz. Πρόκειται για κεραιές που χρησιμοποιούνται σε κινητά τερματικά, όπως κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές και παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, με κυριότερα το χαμηλό κόστος, την ευκολία κατασκευής, το μικρό τους μέγεθος και τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής. Η ευρυζωνικότητα είναι επίσης μια σύγχρονη τεχνολογική απαίτηση, καθώς υπάρχει ανάγκη για διασύνδεση διαφορετικών υπηρεσιών που λειτουργούν σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων, ειδικά όσο αφορά τα ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία έγινε σχεδίαση και προσομοίωση τριών διαφορετικών τύπων κεραιών, όπως τυπωμένων κεραιών ανεστραμμένης-F γεωμετρίας με χρήση σχισμών, με τη βοήθεια τρισδιάστατου ηλεκτρομαγνητικού προσομοιωτή. Στόχος μας κατά την υπολογιστική σχεδίαση ήταν η επίτευξη της λειτουργίας τους στις συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων (2-3GHz και 5-6GHz), επιτυγχάνοντας όσο το δυνατό μικρότερο μέγεθος και όσο το δυνατό μεγαλύτερο εύρος ζώνης, έχοντας όμως υπόψη και τις άλλες σημαντικές παραμέτρους, όπως η αντίσταση εισόδου, το κέρδος και η αποδοτικότητα.

Λέξεις-κλειδιά

Μικροταινιακή γραμμή, ομοαξονικός συνδετήρας, ευρυζωνικότητα, μορφοκλασματικές, τυπωμένο μονόπολο, μονοζωνική, διζωνική, σχισμή, μαιανδρική, κυκλική, τυπωμένη, ομοιοκατευθυντική, επίπεδο γείωσης.

Abstract

The aim of this thesis is the study of multiband, wideband and electrically small printed antennas in the 2-3GHz and 5-6GHz ISM bands. This type of antennas exhibits wideband characteristics and is intended for mobile terminal applications, such as mobile phone handsets and laptops with wireless connectivity. Their main advantages are low cost, easy fabrication, low volume and mass production ability. Wide impedance matching is also a technological demand, since there is the need for connection between different services that use different frequency bands, especially concerning wireless local networks (WLANs).

More specifically, in the present thesis we have modeled and simulated a number of three different types of antennas (e.g. Printed Inverted-F Antennas with different types of slots, etc.) using a 3D electromagnetic simulator. During the design stage we have opted for operation in the 2-3GHz and 5-6GHz bands while at the same time we tried to achieve small size and wide impedance bandwidth, bearing also in mind other significant parameters such as impedance, gain and radiation efficiency.

Keywords

Microstrip line, coaxial SMA connector, wideband, fractal, printed monopole, single-band, dual-band, slot, meander, circular, printed, omnidirectional, ground plane.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	13
1.1 Γενικά	13
1.2 Βιβλιογραφία	17
2. Θεωρητική μελέτη ηλεκτρικά μικρών κεραιών	19
2.1 Ηλεκτρικά μικρές κεραιές	19
2.1.1 Καθορισμός της ακτίνας a της περιγεγραμμένης σφαίρας ..	20
2.1.2 Βασικοί περιορισμοί κατά τη σχεδίαση ηλεκτρικά μικρών κεραιών 20	
2.2 Αναφορά θεωρητικών όρων	24
2.2.1 Κέρδος κεραιάς (Gain)	24
2.2.2 Αντίσταση εισόδου	24
2.2.3 Απόδοση ακτινοβολίας	25
2.2.4 Συνολική απόδοση ακτινοβολίας	25
2.2.5 Εύρος ζώνης κεραιάς	26
2.2.6 Παράγοντας Ποιότητας (Figure of Merit-FoM)	27
2.3 Τεχνικές τροφοδοσίας	28
2.3.1 Μικροταινιακή γραμμή	28
2.3.2 Ομοαξονική τροφοδοσία	30
2.4 Ομοαξονικός συνδετήρας SMA	30
2.4.1 Κυλινδρικός ομοαξονικός συνδετήρας SMA	31
2.4.2 Ομοαξονικός συνδετήρας SMA τετραγωνικής διατομής	31
2.4.3 Εφαρμογή του τετραγωνικού SMA συνδετήρα σε μικροταινίες	34
2.5 Βιβλιογραφία	41
3. Υπολογιστικές Μέθοδοι & Λογισμικό Προσομοιώσεων	43
3.1 Υπολογιστικές Μέθοδοι Προσομοιώσεων	43
3.1.1 Μέθοδος των ροπών (MoM)	44
3.1.2 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)	45
3.1.3 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD) 45	
3.1.3.1 Τεχνική Πεπερασμένης Ολοκλήρωσης (FIT)	48
3.2 Λογισμικό Προσομοιώσεων	49
3.2.1 Μοντελοποίηση	49
3.2.2 Διακριτοποίηση (meshing)	51
3.2.3 Παραμετροποίηση	52
3.2.4 Προσομοιώσεις	53
3.2.5 Απεικόνιση	53
3.3 Βιβλιογραφία	55
4. Dual-band τυπωμένες κεραιές ανεστραμμένου F-μονόπολου (PIFA) με σχισμές pre-fractal	57
4.1 Εισαγωγή	57
4.1.1 Περιγραφή λειτουργίας τυπωμένης ανεστραμμένης F γεωμετρίας μονοπολικής κεραιάς	57
4.1.2 Δημιουργία dual-band PIFA	58
4.2 Dual-band PIFA με σχισμές pre-fractal και Euclidean	59
4.2.1 Dual-band PIFA με σχισμή τύπου Koch	60
4.2.1.1 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου	60

4.2.1.2	Διαδικασία μελέτης της κεραίας και εύρεσης των καταλληλότερων παραμέτρων	64
4.2.1.3	Διακριτοποίηση (meshing).....	66
4.2.1.4	Άλλες ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση	67
4.2.1.5	Καθορισμός ακτίνας a για τον υπολογισμό του μεγέθους ka	67
4.2.1.6	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	68
4.2.1.7	Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης.....	74
4.2.2	Dual-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch	78
4.2.2.1	Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου	79
4.2.2.2	Διακριτοποίηση (meshing).....	80
4.2.2.3	Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση	81
4.2.2.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	81
4.2.2.5	Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης.....	87
4.2.3	Dual-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch	90
4.2.3.1	Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου	90
4.2.3.2	Διακριτοποίηση (meshing).....	92
4.2.3.3	Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση	93
4.2.3.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	93
4.2.3.5Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης	98
4.2.4	Dual-band PIFA Minkowski.....	102
4.2.4.1	Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου	103
4.2.4.2	Διακριτοποίηση (meshing).....	104
4.2.4.3	Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση	105
4.2.4.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	105
4.2.4.5	Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης.....	112
5.	Single-band τυπωμένες κεραίες ανεστραμμένου F-μονόπολου (PIFA) με σχισμές pre-fractal	117
5.1	Εισαγωγή	117
5.2	Single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch	118
5.2.1	Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου	118
5.2.2	Διακριτοποίηση (meshing).....	120
5.2.3	Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση	120
5.2.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	120
5.2.5	Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης.....	127
5.3	Single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch.....	130
5.3.1	Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου	130
5.3.2	Διακριτοποίηση (meshing).....	131
5.3.3	Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση	132
5.3.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	132
5.4	Single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch	136
5.4.1	Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου	136
5.4.2	Διακριτοποίηση (meshing).....	138
5.4.3	Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση	138
5.4.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	138

5.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.....	143
6.	Κυκλική κεραία ανεστραμμένης F γεωμετρίας με κυκλικό επίπεδο γείωσης.....	145
6.1	Εισαγωγή.....	145
6.2	Περιγραφή του μοντέλου.....	145
6.3	Καθορισμός της ακτίνας a της νοητής σφαίρας για τον υπολογισμό του μεγέθους ka	147
6.4	Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου.....	147
6.5	Διακριτοποίηση (Meshing).....	149
6.6	Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση.....	150
6.7	Διεξαγωγή της μελέτης της κεραίας C-PIFA.....	150
6.8	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	151
6.9	Μελέτη του επιπέδου γείωσης.....	157
7.	Συμπεράσματα από τη μελέτη τυπωμένων κεραιών και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	161
7.1	Εισαγωγή.....	161
7.2	Σύγκριση μεταξύ των Dual-band κεραιών PIFA.....	161
7.3	Επιλογή καλύτερων τιμών διαστάσεων επιπέδου γείωσης για τις dual-band PIFA.....	163
7.4	Σύγκριση μεταξύ των single-band κεραιών PIFA.....	164
7.5	Επιλογή καλύτερων τιμών διαστάσεων επιπέδου γείωσης για τις dual-band PIFA.....	166
7.6	Συμπεράσματα για την κυκλική PIFA.....	166
7.7	Προτάσεις για μελλοντική μελέτη.....	167

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Στη σύγχρονη εποχή η ραγδαία εξέλιξη στο χώρο της τεχνολογίας έχει επηρεάσει και το χώρο των ασύρματων επικοινωνιών κάτι που έχει οδηγήσει στην ολοένα αυξανόμενη χρήση των φορητών συσκευών. Τέτοιες συσκευές αποτελούν τα κινητά τηλέφωνα, οι συσκευές ταυτοποίησης (RFID tags), οι φορητοί υπολογιστές με ενσωματωμένη ασύρματη κάρτα δικτύου, οι ιατρικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για θεραπείες με τη χρήση μικροκυμάτων και αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο ανθρώπινο σώμα. Οι φορητές συσκευές επικοινωνίας χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση πολλών και ταυτόχρονα διαφορετικών υπηρεσιών, όπως μετάδοση φωνής και ταχύρρυθμη μεταφορά δεδομένων, λειτουργώντας σε πολλές ζώνες συχνοτήτων και παράλληλα διατηρώντας μικρό το μέγεθός τους ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο εύχρηστες.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε επίσης και στην κατασκευή ολοένα και μικρότερων ηλεκτρονικών συσκευών, κάτι που επηρέασε και το μέγεθος των φορητών συσκευών. Η κατασκευή φορητών συσκευών επικοινωνίας μικρού μεγέθους έχει οδηγήσει στην ανάγκη για κατασκευή μικρού μεγέθους κεραιών. Συγκεκριμένα, τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι μηχανικοί έχουν πετύχει σημαντική μείωση του μεγέθους των κεραιών των φορητών συσκευών, παρά τους φυσικούς περιορισμούς. Σήμερα σχεδόν όλες οι κεραιές μπορούν να ενσωματωθούν στις φορητές συσκευές, γεγονός που συμβάλλει στην καλαισθησία των συσκευών αλλά και στην προστασία των κεραιών από ατυχήματα (π.χ. σπάσιμο λόγω προεξοχής τους).

Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται ένα κινητό τηλέφωνο με ενσωματωμένη κεραία και ένα με κεραία που προεξέχει της συσκευής.



Εικόνα 1-1 Συσκευές κινητού τηλεφώνου με ενσωματωμένη ή μη κεραία

Στο σχήμα 1.2 φαίνεται μία τυπωμένη μαιανδρική κεραία σε μία κάρτα USB-WLAN που χρησιμοποιείται για WLAN εφαρμογές.



Εικόνα 1-2 Τυπωμένη μαιανδρική κεραία σε μία κάρτα USB-WLAN [2]

Οι κεραίες των φορητών συσκευών μπορούν να θεωρηθούν μικρές υπό την έννοια:

- Του ηλεκτρικού μεγέθους: Η κεραία περικλείεται από μια σφαίρα ακτίνας $\lambda_0/2\pi$. Η έννοια της ηλεκτρικά μικρής κεραίας αναλύεται στο κεφάλαιο 2.
- Του φυσικού μεγέθους: Μια κεραία που δεν είναι ηλεκτρικά μικρή μπορεί να υποστεί σημαντική μείωση των φυσικών της διαστάσεων.
- Της λειτουργίας: Μια κεραία που δεν είναι ούτε ηλεκτρικά ούτε φυσικά μικρή μπορεί να αποκτήσει επιπρόσθετες λειτουργίες χωρίς να υποστεί καμία αύξηση του μεγέθους της.

Επομένως, η σμίκρυνση μιας κεραίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Η σμίκρυνση μιας κεραίας μπορεί να επιτευχθεί ως εξής.

- Μέσω της σχεδίασης και της βελτιστοποίησης της γεωμετρικής δομής της, συγκεκριμένα μεταβάλλοντας το σχήμα και τον προσανατολισμό των ακτινοβολούντων στοιχείων.
- Μέσω της χρήσης μη αγώγιμων υλικών. Παραδείγματα αυτής της τεχνικής αποτελούν οι κεραίες που κατασκευάζονται από φερρίτη ή υψηλής επιτρεπτότητας διηλεκτρικά υλικά.

Κατά τη διαδικασία κατασκευής της κεραίας, ο σχεδιαστής λαμβάνει υπόψη τις διαστάσεις και τη μορφή της συσκευής καθώς και τα υπόλοιπα εξαρτήματα που βρίσκονται κοντά στην κεραία. Εξετάζοντας όλα τα παραπάνω, ο μηχανικός ξεκινά τη διαδικασία σχεδίασης επιλέγοντας την κατάλληλη κεραία και με προσομοιώσεις και μετρήσεις ελέγχει τις παραμέτρους ενδιαφέροντος και βελτιστοποιεί την απόδοσή της πριν καταλήξει στο τελικό σχέδιο της κεραίας που θα ενσωματώσει στη συσκευή [1].

Στη διπλωματική μας εργασία, στόχος ήταν η σχεδίαση ηλεκτρικά μικρών κεραιών για λειτουργία στις ζώνες συχνοτήτων 2-3GHz και 5-6GHz και χρήση σε κινητά τερματικά. Ο λόγος είναι ότι σε αυτές τις 2 ζώνες (ISM) υπάρχει αυξημένο εμπορικό ενδιαφέρον (βιομηχανικό, επιστημονικό, ιατρικό / Industrial, Scientific, Medical) αφού λειτουργούν εκεί αρκετά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας. Συγκεκριμένα στη ζώνη 2-3GHz λειτουργούν τα WLAN (Wireless Local Area Networks) [3], Bluetooth[4], UMTS 3G (W-CDMA) [5] και WiMAX [6]. Αντίστοιχα στη ζώνη 5-6GHz υπάρχουν οι τρεις ISM ζώνες 5.15-5.35, 5.47-5.725 και 5.75-5.85GHz στις οποίες λειτουργούν WLANs υψηλού ρυθμού μετάδοσης και οι οποίες προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι έχουν λιγότερες παρεμβολές απ' ότι οι χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή του περιεχομένου των κεφαλαίων της εργασίας μας. Το κεφάλαιο 2 ξεκινά με μία εισαγωγή στη θεωρία των ηλεκτρικά μικρών κεραιών και στους περιορισμούς που θέτουν κατά τη σχεδίασή τους. Στη συνέχεια, ακολουθεί ο ορισμός κάποιων θεωρητικών όρων, στον υπολογισμό των οποίων βασιστήκαμε για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των

κεραιών μας. Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου αυτού περιγράφεται ο τρόπος τροφοδοσίας των κεραιών.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των υπολογιστικών μεθόδων καθώς και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τις σχεδιάσεις και προσομοιώσεις.

Στο κεφάλαιο 4 ξεκινά η μελέτη του πρώτου τύπου κεραιών που σχεδιάσαμε, οι τυπωμένες κεραιές ανεστραμμένης F γεωμετρίας με χρήση σχισμών τύπου fractal και Euclidean δομής, για λειτουργία σε δύο ζώνες συχνοτήτων, 2-3 GHz και 5-6 GHz. Παρουσιάζονται τα μοντέλα σχεδίασης, ο τρόπος μελέτης τους ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των κεραιών, καθώς και τα αποτελέσματα προσομοιώσεων, όπως διαγράμματα του συντελεστή ανάκλασης, του χάρτη Smith, της επιφανειακής κατανομής ρεύματος κ.α. Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου παρατίθενται τα αποτελέσματα από τη μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης.

Αντίστοιχα, στο κεφάλαιο 5 γίνεται μελέτη των τυπωμένων κεραιών ανεστραμμένης F γεωμετρίας με χρήση σχισμών τύπου fractal και Euclidean δομής, για λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων 2-3 GHz. Η δομή του κεφαλαίου παραμένει ίδια, συμπεριλαμβάνοντας την παρουσίαση των μοντέλων σχεδίασης και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στο τέλος, γίνεται μελέτη του επιπέδου γείωσης.

Το κεφάλαιο 6 αφορά στον τελευταίο τύπο κεραιάς, την τυπωμένη ανεστραμμένης F γεωμετρίας σε κυκλικό υπόστρωμα. Ομοίως παρουσιάζεται το μοντέλο σχεδίασης και τα αποτελέσματα προσομοιώσεων. Και σε αυτή την περίπτωση έγινε μελέτη του επιπέδου γείωσης.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 γίνεται μία σύγκριση των τυπωμένων κεραιών, ώστε να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε κεραιάς. Επίσης, γίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντικά θέματα ερευνητικής εργασίας πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

1.2 Βιβλιογραφία

- [1] Zhi Ning Chen, “Antennas for Portable Devices”, John Wiley & Sons, Ltd, 2007
- [2] C.-C. Lin, S.-W. Kuo and H-R. Chuang, “A 2.4-GHz Printed Meander-Line Antenna for USB WLAN With Notebook-PC Housing”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 15, pp. 546-548, No. 9, September 2005.
- [3] (2007) The Wikipedia website. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/WLAN>
- [4] (2007) The Wikipedia website. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
- [5] (2007) The Wikipedia website. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/W-CDMA>

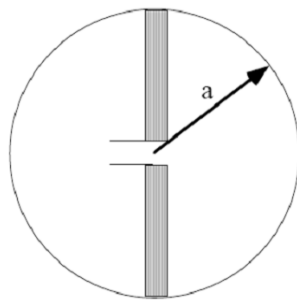
2. Θεωρητική μελέτη ηλεκτρικά μικρών κεραιών

2.1 Ηλεκτρικά μικρές κεραιές

Το «ηλεκτρικό» μέγεθος μιας κεραιάς καθορίζεται από το λόγο της μέγιστης διάστασης προς το μήκος κύματος συντονισμού. Πιο συγκεκριμένα θεωρούμε ότι ολόκληρη η κατασκευή της κεραιάς μας περιβάλλεται από μία σφαίρα, ακτίνας a . Συνεπώς, η μέγιστη διάστασή της θα ισούται με $2a$, ενώ το «ηλεκτρικό» μήκος της κεραιάς μπορεί να εκτιμηθεί βάσει του γινομένου

$$ka = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (2.1)$$

όπου k : ο κυματικός αριθμός στη συχνότητα συντονισμού.



Εικόνα 2-1 Ορισμός της περιγεγραμμένης σφαίρας ηλεκτρικά μικρής κεραιάς

Σύμφωνα με τον Wheeler (1947) μία κεραιά θεωρείται ηλεκτρικά μικρή όταν για το γινόμενο ka ισχύει $ka \leq 1$. Αργότερα, το 2000 ένας εναλλακτικός ορισμός από τον Best θεωρεί ότι μια κεραιά είναι ηλεκτρικά μικρή αν ισχύει

$ka \leq \frac{1}{2}$. Ωστόσο, επειδή οι ορισμοί αυτοί είναι σχετικοί μία κεραιά με

$ka \approx 1$ μπορεί επίσης να θεωρηθεί ηλεκτρικά μικρή, ή τουλάχιστον να μη θεωρείται ηλεκτρικά μεγάλη.

2.1.1 Καθορισμός της ακτίνας a της περιγεγραμμένης σφαίρας

Οι κεραιές που σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία αποτελούν εξέλιξη του τυπωμένου μονόπολου. Έχουν τυπωθεί στη μία πλευρά ενός υποστρώματος, στην άλλη πλευρά του οποίου υπάρχει τυπωμένο αγώγιμο υλικό, που εξυπηρετεί σαν επίπεδο γείωσης. Επίσης, τροφοδοτούνται από μικροταινία η οποία είναι και αυτή τυπωμένη στην ίδια πλευρά του υποστρώματος με την κεραιά.

Σε αυτό τον τύπο κεραιών το επίπεδο γείωσης μετατρέπεται επίσης σε ενεργό τμήμα της συνολικής διάταξης της κεραιάς, δηλαδή ακτινοβολεί και το ίδιο. Αυτό συμβαίνει διότι οι διαστάσεις του είναι πεπερασμένες και επάγονται ισχυρά ρεύματα πάνω στη επιφάνειά του, που το καθιστούν ένα ασύμμετρο είδωλο του μονόπολου. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί μέρος της κεραιάς, η συμβολή του οποίου μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική ως προς τη βελτίωση κάποιων χαρακτηριστικών μεγεθών, όπως η απόδοση της κεραιάς ή το εύρος ζώνης της. Οι διαστάσεις του επιπέδου γείωσης έχουν σημαντικό ρόλο στην επίδρασή του στη συμπεριφορά της κεραιάς, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερες είναι τόσο το καλύτερο.

Γι' αυτό, ο καθορισμός της ακτίνας a έγινε έτσι ώστε η σφαίρα να περικλείει και το επίπεδο γείωσης και όχι μόνο την κεραιά. Αυτό σημαίνει ότι οι διαστάσεις του επιπέδου γείωσης επηρεάζουν το γινόμενο ka και άρα και το «ηλεκτρικό» μέγεθος των κεραιών μας.

2.1.2 Βασικοί περιορισμοί κατά τη σχεδίαση ηλεκτρικά μικρών κεραιών

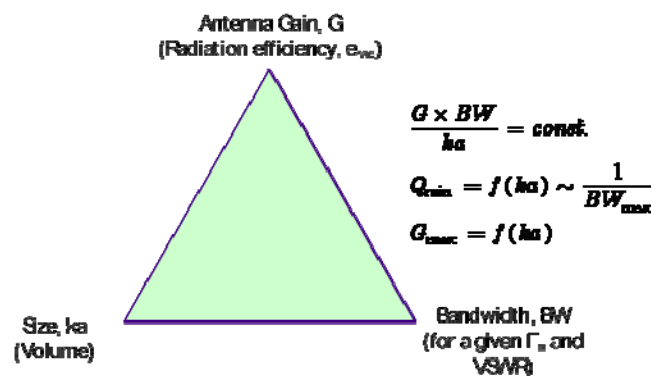
Κατά τη σμίκρυνση των κεραιών επηρεάζονται διάφορα από τα βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως η αποδοτικότητα, το εύρος ζώνης BW , το κέρδος $Gain$ και ο συντελεστής ποιότητας Q . Η διερεύνηση και η καταγραφή των ορίων αυτών των βασικών ιδιοτήτων είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό θέμα.

Στόχος κάθε σχεδιαστή είναι η δημιουργία μίας κεραίας με όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος, μεγάλο εύρος ζώνης και υψηλή απόδοση ακτινοβολίας. Ωστόσο, μία αρχική μελέτη από τον Wheeler έδειξε ότι αν το μέγεθος της κεραίας συνεχώς μικραίνει επηρεάζει αρνητικά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά γι' αυτό κατά τη μελέτη σμίκρυνσή της γίνεται ένας συμβιβασμός ανάμεσα στα μεγέθη. Συγκεκριμένα η σχέση που συνδέει τα τρία παραπάνω μεγέθη είναι

$$\frac{\text{Gain} \times \text{Bandwidth}}{\text{Volume}} = \frac{G \times BW}{ka} = \text{σταθερό} \quad (2.2)$$

[2].

Η σταθερά αυτή διαφέρει για κάθε τύπο κεραίας, ενώ αποτελεί κριτήριο ποιότητας για το πόσο καλή σχεδιαστικά είναι η κεραία. Απώτερος σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του, πάντα όμως μέσα στα πλαίσια του συμβιβασμού μεταξύ των μεγεθών, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή κεραία σύμφωνα με τις προδιαγραφές του σχεδιαστή. Αυτό σημαίνει ότι κάποιες φορές χάριν του μικρού μεγέθους μπορεί να θυσιαστεί το εύρος ζώνης, ενώ άλλες φορές πρώτιστος στόχος είναι η επίτευξη ενός συγκεκριμένου εύρους ζώνης που δεν επιτρέπει την περαιτέρω σμίκρυνση της κεραίας. [3][4].



Εικόνα 2-2 Συσχέτιση βασικών χαρακτηριστικών μίας κεραίας

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος των κεραίων είναι ο συντελεστής ποιότητας Q . Για τον υπολογισμό του απαιτείται η γνώση της ενέργειας που αποθηκεύεται στην περιοχή της κεραίας καθώς και των απωλειών ενέργειας, όπως η ακτινοβολία, οι απώλειες θερμότητας και η διάδοση επιφανειακών κυμάτων στο υπόστρωμα. Συνήθως, οι απώλειες λόγω της θερμότητας και της διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων είναι αμελητέες σε σχέση με την απώλεια ενέργειας λόγω της ακτινοβολίας, γι' αυτό ο συντελεστής ποιότητας ταυτίζεται με το συντελεστή ποιότητας ακτινοβολίας. Ο συντελεστής ποιότητας ακτινοβολίας

(Q_{rad}) εκφράζει το ρυθμό απόσβεσης ενέργειας στην κεραία και δίνεται από τον τύπο

$$Q_{\text{rad}} = \frac{2\omega W_e}{P_{\text{rad}}} \quad (2.3)$$

όπου

W_e : η μέση αποθηκευμένη ενέργεια

P_{rad} : η ακτινοβολούμενη ισχύς

ω : η γωνιακή συχνότητα συντονισμού. [8]

Βάσει αυτού του ορισμού για το συντελεστή ποιότητας ακτινοβολίας συνεπάγεται ότι όσο μικρότερος είναι τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ακτινοβολία της κεραίας και άρα και η απόδοσή της.

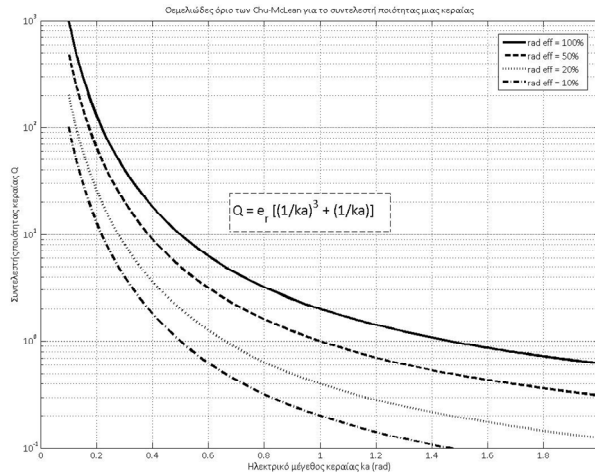
Μία ιδιαίτερα σημαντική μελέτη για τον συντελεστή ποιότητας Q έγινε από τον Chu (1948), ο οποίος και απέδειξε ότι ο συντελεστής ποιότητας είναι αντιστρόφως ανάλογος του όγκου που καταλαμβάνει η κεραία. Συγκεκριμένα, απέδειξε ότι υπάρχει ένα κατώτερο όριο για το συντελεστή ποιότητας

$$Q_{\text{min}} = \frac{1 + 2(\mathbf{ka})^2}{(\mathbf{ka})^3 [1 + (\mathbf{ka})^2]} \quad (2.4)$$

το οποίο μάλιστα συνδέεται με το γινόμενο ka και δεν εξαρτάται από την τεχνική κατασκευής της κεραίας. Ωστόσο, νεότερες μελέτες πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο από τον McLean (1996) οδήγησαν σε ένα πιο ακριβή τύπο για την ελάχιστη τιμή του συντελεστή ποιότητας, ο οποίος είναι ο εξής.

$$Q_{\text{min}} = \frac{1}{\mathbf{ka}} + \frac{1}{(\mathbf{ka})^3} \quad (2.5)$$

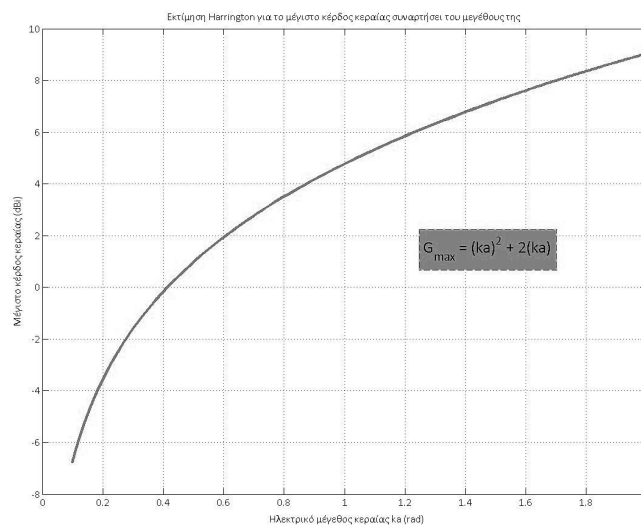
Η σχέση αυτή αποδεικνύει ότι η προσέγγιση από τον Chu ισχύει μόνο για πολύ μικρές κεραίες ($ka \ll 1$), ενώ αποτελεί και την τελική έκφραση των Chu-McLean για το κατώτερο όριο του συντελεστή ποιότητας. [5] [6]



Σχήμα 2-1 Ελάχιστη τιμή του Q συναρτήσει του ka

Με αφορμή τη μελέτη των Wheeler και Chu, ο Harrington συνέχισε την έρευνα πάνω στους περιορισμούς κατά τη σχεδίαση των ηλεκτρικά μικρών κεραιών, συμπεριλαμβάνοντας και τον παράγοντα επίδρασης των απωλειών. Πράγματι, απέδειξε ότι μία ηλεκτρικά μικρή κεραία έχει ιδιαίτερα αυξημένη συγκέντρωση επιφανειακών ρευμάτων σε σχέση με τις κανονικές κεραιές, κάτι που συνεπάγεται και την αύξηση των ωμικών απωλειών. Το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης ήταν ο προσδιορισμός ενός ανώτερου ορίου για το κέρδος μίας ηλεκτρικά μικρής κεραίας, η οποία θα μπορεί ακόμη να επιτύχει ένα αξιόλογο εύρος ζώνης. [2]

$$G = (ka)^2 + 2ka \quad (2.6)$$



Σχήμα 2-2 Άνω φράγμα του G συναρτήσει του ka

2.2 Αναφορά θεωρητικών όρων

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναφορά σε κάποια κύρια χαρακτηριστικά των κεραιών, τα οποία ήταν ιδιαίτερα χρήσιμα κατά τη μελέτη και των δικών μας κεραιών, όπως θα φανεί στα επόμενα κεφάλαια. Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών ήταν εφικτή η διεξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά της κάθε κεραιάς.

2.2.1 Κέρδος κεραιάς (Gain)

Το κέρδος κεραιάς είναι ένα μέγεθος που προσδιορίζει το πόσο αποδοτικά ακτινοβολεί μία κεραιά και είναι άμεσα συσχετισμένο με την κατευθυντικότητα της, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις αναφέρεται στη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Δίνεται από τον τύπο:

$$G = 4\pi \frac{\text{radiationintensity}}{\text{totalinput(accepted)power}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (2.7)$$

όπου P_{in} είναι η ισχύς τροφοδότησης. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι στο κέρδος μίας κεραιάς σημαντικό ρόλο έχει το πόσο αποδοτικά τροφοδοτείται η κεραιά. Η ισχύς τροφοδότησης P_{in} συνδέεται με την ισχύ ακτινοβολίας P_{rad} μέσω της σχέσης

$$P_{rad} = n_r P_{in} \quad (2.8)$$

όπου n_r : είναι ο συντελεστής απόδοσης της κεραιάς, μέσω του οποίου λαμβάνονται υπόψη οι διάφορες απώλειες της κεραιάς, όπως ωμικές απώλειες ή απώλειες λόγω του διηλεκτρικού, όχι όμως και αυτές που οφείλονται στις διάφορες ανακλάσεις. [7]

2.2.2 Αντίσταση εισόδου

Η αντίσταση εισόδου μιας κεραιάς είναι το μέγεθος μέσω του οποίου μπορεί να περιγραφεί μία κεραιά σαν στοιχείο ενός κυκλώματος και να μελετηθεί η συμπεριφορά της. Ορίζεται σαν το πηλίκο της τάσης προς το ρεύμα που εμφανίζεται στο σημείο τροφοδοσίας της ή τη μιγαδική αντίσταση που εμφανίζεται στα άκρα της. Δίνεται από τον τύπο

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.9)$$

Το πραγματικό μέρος της αποτελείται από δύο όρους

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.10)$$

όπου

R_r : είναι η αντίσταση ακτινοβολίας, μία βασική παράμετρος αξιολόγησης της κεραίας, μέσω της οποίας υπολογίζεται η ισχύς ακτινοβολίας της κεραίας

R_L : είναι η αντίσταση απωλειών, μέσω της οποίας υπολογίζονται οι ωμικές απώλειες και οι απώλειες λόγω του διηλεκτρικού της κεραίας.

Το φανταστικό μέρος της σχετίζεται με την άεργο ισχύ στο κοντινό πεδίο της κεραίας. [7]

Η αντίσταση εισόδου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τη γεωμετρία της κεραίας, τους τρόπους διέγερσης, το περιβάλλον πλαισίωσής της, καθώς και από τη συχνότητα. [3] Γι' αυτό η προσαρμογή της, όπου η τιμή του πραγματικού της μέρους προσεγγίζει τα 50Ω και η επίτευξη συντονισμού, όπου η τιμή του φανταστικού προσεγγίζει τα 0Ω , μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.

2.2.3 Απόδοση ακτινοβολίας

Όπως αναφέραμε και στη προηγούμενη παράγραφο, η αντίσταση απωλειών R_L εκφράζει τις ωμικές απώλειες και τις απώλειες λόγω διηλεκτρικού. Οι απώλειες αυτές είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστούν και να μετρηθούν ξεχωριστά. Η απόδοση ακτινοβολίας εξαρτάται από αυτές τις απώλειες και ορίζεται σαν ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολεί η κεραία προς τη συνολική ισχύ που λαμβάνει. Δίνεται από τον τύπο

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.11)$$

[3]

2.2.4 Συνολική απόδοση ακτινοβολίας

Η συνολική απόδοση ακτινοβολίας λαμβάνει υπόψη εκτός από τις ωμικές απώλειες και τις απώλειες λόγω του διηλεκτρικού, και αυτές που οφείλονται

στις ανακλάσεις λόγω της μη προσαρμογής μεταξύ της κεραίας και της γραμμή μεταφοράς που τροφοδοτεί την κεραία. Ορίζεται βάσει του τύπου

$$\mathbf{e}_o = \mathbf{e}_r \mathbf{e}_{cd} \quad (2.12)$$

όπου

e_{cd} : η απόδοση ακτινοβολίας

e_r : η απόδοση που σχετίζεται με τις ανακλάσεις που υφίστανται και ισούται με

$e_r = 1 - |\Gamma|^2$, όπου $|\Gamma|$ είναι το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης.

Ο συντελεστής ανάκλασης στα άκρα εισόδου της κεραίας ορίζεται από το λόγο

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.13)$$

όπου Z_{in} : η αντίσταση εισόδου της κεραίας

Z_0 : η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς, που συνήθως ισούται με 50Ω . [3]

2.2.5 Εύρος ζώνης κεραίας

Ο ορισμός του εύρους ζώνης δεν είναι απόλυτα καθορισμένος, καθώς εξαρτάται κάθε φορά από τη λειτουργία της κεραίας στην οποία αναφέρεται. Έτσι, αν για παράδειγμα αναφερόμαστε στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας τότε το εύρος ζώνης μπορεί να οριστεί σαν το εύρος συχνοτήτων όπου η κεραία ικανοποιεί ορισμένες προδιαγραφές για αυτά τα χαρακτηριστικά, οι οποίες έχουν τεθεί από το σχεδιαστή.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αντίσταση εισόδου είναι ένα μέγεθος που επηρεάζει τη συμπεριφορά της κεραίας. Το γεγονός ότι η μεταβολή της εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα την καθιστά ένα από τους πιο περιοριστικούς παράγοντες για τη λειτουργία της κεραίας. Έτσι, ένας πιο αντιπροσωπευτικός ορισμός του εύρους ζώνης είναι η ζώνη συχνοτήτων όπου η κεραία είναι προσαρμοσμένη ως προς την αντίσταση εισόδου της. Ο θεωρητικός ορισμός του εύρους ζώνης προσαρμογής είναι άμεσα συνδεδεμένος με το λόγο στάσιμων κυμάτων VSWR και το συντελεστή ποιότητας Q και δίνεται από την εξής σχέση.

$$BW = \frac{VSWR - 1}{Q\sqrt{VSWR}} \quad (2.14)$$

Ωστόσο, λόγω του ότι ο υπολογισμός του συντελεστή ποιότητας Q κεραιών με πολύπλοκη γεωμετρία είναι αρκετά δύσκολος το εύρος ζώνης μπορεί να υπολογιστεί βάσει και ενός πιο απλού τρόπου μέσω της σχέσης

$$\mathbf{BW(\%)} = 100 \cdot \frac{f_{\mathbf{H}} - f_{\mathbf{L}}}{f_{\mathbf{C}}} = 200 \cdot \frac{f_{\mathbf{H}} - f_{\mathbf{L}}}{f_{\mathbf{H}} + f_{\mathbf{L}}} \quad (2.15)$$

όπου ουσιαστικά το εύρος ζώνης BW ορίζεται σαν η διαφορά συχνοτήτων, ανάμεσα στις οποίες ικανοποιείται μία συγκεκριμένη προδιαγραφή του λόγου στάσιμων κυμάτων $VSWR$, όπως $VSWR \leq S$.

Στη μελέτη των δικών μας κεραιών, που θα περιγραφεί στα επόμενα κεφάλαια, το όριο που τέθηκε για το λόγο των στάσιμων κυμάτων είναι $VSWR \leq 2$. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης να είναι μικρότερο των -10dB για ένα διάστημα συχνοτήτων, $|S_{11}|_{\text{dB}} \leq -10\text{dB}$, το οποίο και θα αποτελεί το εύρος ζώνης της κεραίας.

2.2.6 Παράγοντας Ποιότητας (Figure of Merit-FoM)

Στην περίπτωση των τυπωμένων κεραιών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κινητά τερματικά, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το μικρό τους μέγεθος. Ωστόσο το πολύ μικρό μέγεθος της κεραίας μπορεί να προκαλέσει τον υποβιβασμό κάποιων άλλων σημαντικών μεγεθών. Γι' αυτό, κατά τη μελέτη σμίκρυνσης μιας κεραίας, πρέπει να υπάρξει συμβιβασμός μεταξύ τριών ιδιαίτερα σημαντικών χαρακτηριστικών μιας κεραίας, του κέρδους, του εύρους ζώνης και του μεγέθους. Θα πρέπει να ισχύει

$$\frac{\text{Gain} \times \text{Bandwidth}}{\text{Volume}} = \text{σταθερό} \quad (2.16)$$

το οποίο διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της κεραίας.

Ωστόσο, στην περίπτωση κεραιών κινητών τερματικών, όπου το περιβάλλον μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο, ένας καλύτερος και πιο αξιόπιστος τρόπος για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους είναι μέσω της συνολικής απόδοσης της κεραίας και όχι μέσω του κέρδους. Αυτό συμβαίνει διότι η συνολική απόδοση της κεραίας, e_{total} , συμπεριλαμβάνει όλων των ειδών

τις απώλειες μιας κεραίας, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ένα ανομοιόμορφο περιβάλλον.

Γι' αυτό κατά τη μελέτη των δικών μας κεραιών ορίσαμε τον παράγοντα ποιότητας (FoM) ως εξής

$$\mathbf{FoM} = \frac{\mathbf{10} \times \overline{\mathbf{e}_{total}} \times \mathbf{FBW}_v}{\mathbf{ka}} \quad (\text{dB}) \quad (2.17)$$

όπου

$\overline{\mathbf{e}_{total}}$: η συνολική απόδοση της κεραίας για συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων

$\mathbf{FBW}_v = \frac{\mathbf{BW}_v}{\mathbf{f}_0}$: ο λόγος του εύρους ζώνης προς την κεντρική συχνότητα

\mathbf{ka} : το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας, όπου $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ ο κυματαριθμός στη

συχνότητα \mathbf{f}_0 και \mathbf{a} η ακτίνα της σφαίρας που περικλείει την κεραία.

Ουσιαστικά το μέγεθος $\overline{\mathbf{e}_{total}} \times \mathbf{FBW}_v$ αντιστοιχεί στο $\mathbf{Gain} \times \mathbf{BW}$.

2.3 Τεχνικές τροφοδοσίας

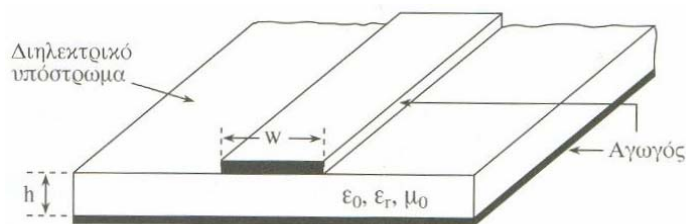
Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά σε τεχνικές τροφοδοσίας των κεραιών, που χρησιμοποιήσαμε κατά τη δική μας μελέτη.

2.3.1 Μικροταινιακή γραμμή

Η μικροταινία αποτελεί έναν από τους πιο δημοφιλείς τύπους επίπεδων γραμμών μεταφοράς, λόγω της ευκολίας στην κατασκευή της και της μοντελοποίησής της, καθώς και του γεγονότος ότι είναι ένας από τους πιο εύχρηστους και αποτελεσματικούς τρόπους τροφοδοσίας παθητικών αλλά και ενεργητικών μικροκυματικών διατάξεων, όπως είναι στην περίπτωση μας οι κεραίες.

Αποτελείται από έναν αγωγό πλάτους W , ο οποίος είναι τυπωμένος πάνω σε ένα λεπτό, διηλεκτρικό υπόστρωμα πάχους h και διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r , η άλλη

πλευρά του οποίου καλύπτεται από αγωγό, που λειτουργεί σαν επίπεδο γείωσης. [8]



Εικόνα 2-3 Γεωμετρία μικροταινίας

Η παρουσία του διηλεκτρικού η οποία δεν υφίσταται στη περιοχή του αέρα στο επάνω μέρος της μικροταινίας, καθιστά τη συμπεριφορά της κάπως πολύπλοκη. Πιο συγκεκριμένα, τα πεδία μιας μικροταινιακής γραμμής αποτελούν ένα υβριδικό κύμα και οδηγούν στη διέγερση υβριδικών ρυθμών, που αποτελούν μία σύνθεση TE και TM ρυθμών. Ωστόσο λόγω του λεπτού υποστρώματος ($h \ll \lambda$) η ανάλυση απλοποιείται καθώς οι ρυθμοί που τελικά διεγείρονται είναι quasi-TEM, δηλαδή τα πεδία μπορούν να θεωρηθούν κατά προσέγγιση στατικά σαν να διεγείρονταν ρυθμοί TEM.[8] Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών της γραμμής μεταφοράς γίνεται μέσω της μεθόδου των μεταβολών ή μεθόδου Galerkin. [9]

Στην ύπαρξη ανομοιογένειας του χώρου ύπαρξης της μικροταινίας οφείλεται και το φαινόμενο των κροσσών. Κατά το φαινόμενο αυτό, λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων της μικροταινίας και της ανομοιογένειας του χώρου, το ηλεκτρικό πεδίο στις άκρες της μικροταινίας αναγκάζεται πρώτα να περάσει από τον αέρα και στη συνέχεια να καταλήξει στο διηλεκτρικό. Η έκταση του φαινομένου εξαρτάται τόσο από τις διαστάσεις της μικροταινίας, όσο και από το πάχος h του υποστρώματος. Από το φαινόμενο των κροσσών επηρεάζεται και η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς, η οποία δεν μπορεί να διατηρεί την ίδια τιμή όταν τα πεδία είναι στον αέρα και όταν είναι στο διηλεκτρικό. Γι' αυτό θεωρούμε μία ισοδύναμη διηλεκτρική σταθερή κατά τους υπολογισμούς, της οποίας η τιμή διαφέρει λίγο από τη διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος, η οποία αντιπροσωπεύει την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς σαν η μικροταινία να βρισκόταν σε ένα ομοιογενές περιβάλλον. Συγκεκριμένα η τιμή της δίνεται από τον ακόλουθο τύπο

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{για } W/h > 1, \quad (2.18)$$

όπου ϵ_r : η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του υποστρώματος

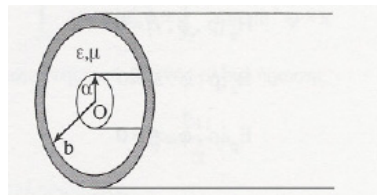
W : το πλάτος της μικροταινίας

h : το πάχος του υποστρώματος

Επίσης, ισχύει ότι $\frac{\epsilon_r + 1}{2} \leq \epsilon_{\text{eff}} \leq \epsilon_r$. [3]

2.3.2 Ομοαξονική τροφοδοσία

Το ομοαξονικό καλώδιο προκύπτει από την προσθήκη ενός ομοαξονικού αγωγού σε ένα κυλινδρικό κυματοδηγό. Ο χώρος ανάμεσα στον εσωτερικό και εξωτερικό αγωγό καλύπτεται από διηλεκτρικό υλικό.



Εικόνα 2-4 Γεωμετρία ομοαξονικού καλωδίου

Ο εσωτερικός αγωγός, ακτίνας a , προσκολλάται στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας, ενώ ο εξωτερικός αγωγός, ακτίνας b , συνδέεται με το επίπεδο γείωσης. Καθώς το ομοαξονικό καλώδιο διαθέτει δύο απομονωμένους αγωγούς μπορεί να διεγείρει ρυθμό TEM, δηλαδή υποστηρίζει τη διάδοση εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού κύματος με μηδενική συχνότητα αποκοπής. [9]

2.4 Ομοαξονικός συνδετήρας SMA

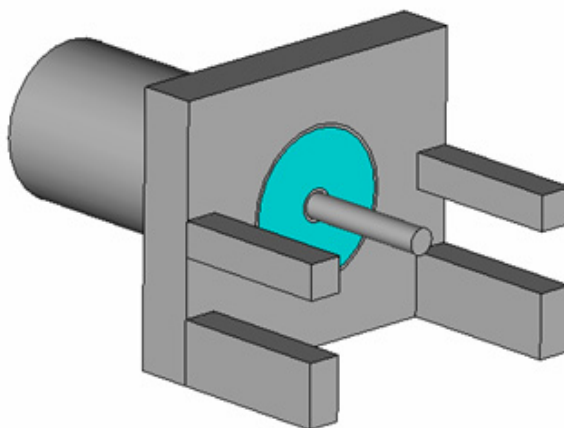
Η τροφοδοσία των κεραιών αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την αποδοτική μετάβαση των οδεύοντων κυμάτων σε ένα ικανοποιητικό εύρος συχνοτήτων.

Γι' αυτό το λόγο, επιλέξαμε η τροφοδοσία των κεραιών κατά την προσομοίωσή τους να γίνει μέσω μικροταινιακής γραμμής, η διέγερση της οποίας γινόταν

μέσω ενός ομοαξονικού συνδετήρα, ο οποίος παραπέμπει στο ομοαξονικό καλώδιο. Η επιλογή της διέγερσης της μικροταινίας μέσω συνδετήρα αντί απλής διακριτής πηγής έγινε διότι αυτός ο τρόπος προσεγγίζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες κυκλωμάτων, λαμβάνοντας υπόψιν και απώλειες που οφείλονται στην παρουσία ανεπιθύμητων παραγόντων., όπως απώλειες λόγω κακής προσαρμογής.

2.4.1 Κυλινδρικός ομοαξονικός συνδετήρας SMA

Στην πραγματικότητα, ο κυλινδρικός συνδετήρας πριν ενωθεί με την μικροταινία, καταλήγει σε μία ορθογωνική διάταξη, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



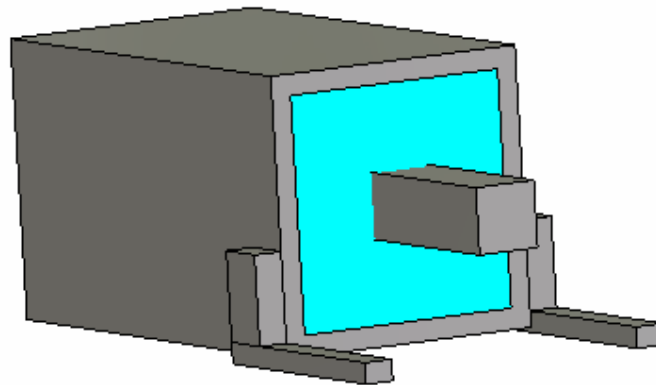
Εικόνα 2-5 Μοντέλο του κυλινδρικού ομοαξονικού συνδετήρα

Η ορθογωνική διάταξη διαθέτει αγώγιμα στελέχη για την επίτευξη σταθερότητας με το PCB και γαλβανικής σύνδεσης με το επίπεδο γείωσης, που καλύπτει το κάτω μέρος του PCB. Ο κεντρικός αγωγός καταλήγει σε μία κυλινδρική ακίδα, η οποία συνδέεται επαπτομενικά με την μικροταινία.

2.4.2 Ομοαξονικός συνδετήρας SMA τετραγωνικής διατομής

Η σχεδίαση του απλοποιημένου μοντέλου ομοαξονικού συνδετήρα τετραγωνικής διατομής, έγινε λόγω του γεγονότος ότι το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε, το CST Microwave Studio 2008,

χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο FIT, ο οποίος διακριτοποιεί το χώρο με κελιά εξαεδρικού τύπου (Yee cells) τα οποία είναι δύσκολο να προσεγγίσουν σωστά κυρτές δομές, όπως αυτές του κυλινδρικού συνδετήρα. Έτσι, το πρόγραμμα αναγκάζεται να μικρύνει το μέγεθος των κελιών και να αυξήσει τον αριθμό τους κατά τη διακριτοποίηση αυτών των δομών, ώστε τα αποτελέσματα να είναι ακριβή. Αυτό όμως συνεπάγεται τη δημιουργία ενός μοντέλου αυξημένης πολυπλοκότητας και άρα απαίτηση για αυξημένο χρόνο προσομοίωσης. Η λύση προκύπτει με χρήση του απλοποιημένου ομοαξονικού συνδετήρα τετραγωνικής διατομής. Η διακριτοποίηση του μοντέλου θα είναι πιο εύκολη, χωρίς να υστερεί σε ακρίβεια. Το μοντέλο του παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2-6 Μοντέλο απλοποιημένου SMA συνδετήρα τετραγωνικής διατομής

Πρωταρχικός στόχος ήταν η σχεδίαση του συνδετήρα, έτσι ώστε να επιτευχθεί αντίσταση εισόδου στη θύρα διέγερσης ίση με 50Ω σε εύρος συχνοτήτων 0-6 GHz, καθώς στο τελικό μοντέλο στόχος ήταν ο συντελεστής ανάκλασης του εισερχόμενου σήματος στη μικροταινία να είναι όσο γίνεται μικρότερος (κάτω των -20dB).

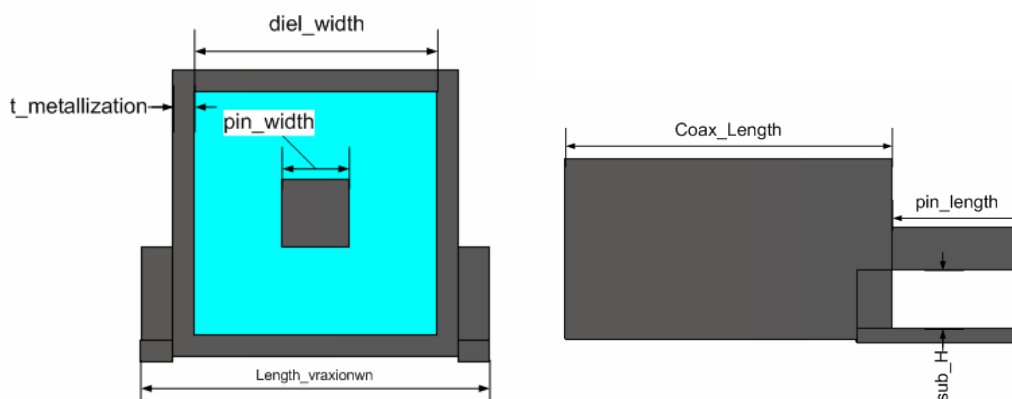
Παρατηρούμε, ότι ο συνδετήρας αποτελούταν από ένα εσωτερικό αγωγό, έναν εξωτερικό, ενώ ανάμεσά τους υπήρχε διηλεκτρικό υλικό Teflon PTFE με τις εξής ιδιότητες: $\epsilon_r=2$, $\tan\delta=0.0003$. Η σχεδίασή του έγινε βάσει ενός ομοαξονικού, κυκλικού συνδετήρα, που ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο για την αρχική επιλογή των διαστάσεων. Έτσι, επιλέχθηκε το μήκος του να είναι 9.5mm, ενώ το πάχος του εξωτερικού αγωγού είναι 0.4mm.

Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η επιλογή του πλάτους του διηλεκτρικού και του εσωτερικού αγωγού, καθώς ο λόγος των δύο αυτών πλατών επηρεάζει την τιμή

της αντίστασης εισόδου. Γι' αυτό επιλέχθηκε αρχικά το πλάτος του εσωτερικού αγωγού ίσο με 0.76mm και στη συνέχεια έγινε παραμετρική σάρωση για το πλάτος του διηλεκτρικού μεταξύ των τιμών 3.5-4.5mm με βήμα 0.1mm, ώστε να βρεθεί το καταλληλότερο, δηλαδή εκείνο που δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα για την επιθυμητή τιμή της αντίστασης εισόδου (κοντά στα 50Ω). Η τιμή αυτή ήταν τα 3.8mm, ενώ η τιμή της αντίστασης εισόδου που επιτεύχθηκε ήταν 50.03Ω.

Εκτός από τον καθορισμό των διαστάσεων, ο συνδετήρας είχε και κάποιες άλλες ιδιαιτερότητες ως προς την σχεδιάσή του. Το μήκος του εσωτερικού αγωγού έπρεπε να είναι μεγαλύτερο στην πλευρά όπου ο συνδετήρας ενώνεται με τη μικροταινία, ώστε να βραχυκυκλώνονται. Επιπλέον, στα πλαϊνά τμήματα του εξωτερικού αγωγού του συνδετήρα ενώθηκαν δύο μεταλλικοί βραχίονες, το κάτω μέρος των οποίων χρησιμεύει στο να επιτυγχάνεται γαλβανική ένωση μεταξύ του εξωτερικού αγωγού και του επιπέδου γείωσης της μικροταινίας. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει και καλύτερη στήριξη της μικροταινίας, η οποία θα σφηνώνει ανάμεσα στους βραχίονες γείωσης και στον κεντρικό αγωγό. Τέλος, έγινε παραμετρική υλοποίηση των βραχιόνων, καθώς το μήκος τους εξαρτάται από το ύψος του διηλεκτρικού υλικού της μικροταινιακής γραμμής, το οποίο θα μεταβάλλεται για διαφορετικά υλικά, όπως θα δούμε και παρακάτω. Έτσι, ανάλογα με το ύψος του διηλεκτρικού θα αυξομειώνεται και το ύψος των βραχιόνων, ώστε κάθε φορά ο συνδετήρας να μπορεί να προσαρμόζεται σε διάφορα είδη μικροταινίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο του συνδετήρα με τις διαστάσεις, καθώς και ο πίνακας με τις τιμές τους.



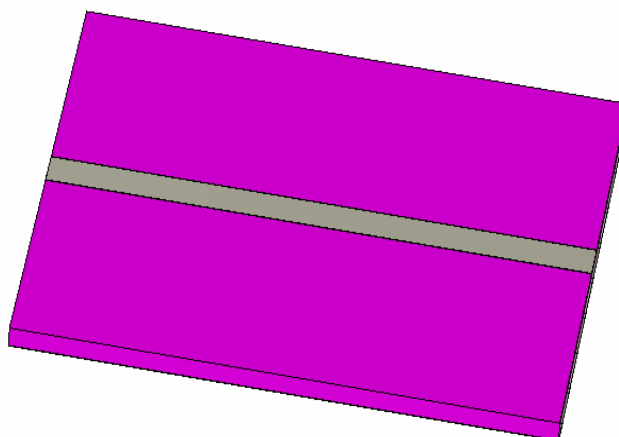
Εικόνα 2-7 Διαστάσεις του τετραγωνικού SMA συνδετήρα

Διάσταση	Μήκος (mm)
diel_width	4.55
pin_width	1.25
t_metallization	0.4
Length_vraxonwn	6.4
Coax_Length	9.5
pin_length	3.8
sub_H	subH + 2t

Πίνακας 2-1 Τιμές των διαστάσεων του τετραγωνικού SMA συνδετήρα

2.4.3 Εφαρμογή του τετραγωνικού SMA συνδετήρα σε μικροταινίες

Το δεύτερο στάδιο ήταν η σχεδίαση της μικροταινιακής γραμμής, όπου θα γινόταν η επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του συνδετήρα. Για να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν πιο γρήγορες προσομοιώσεις, το PCB δεν έπρεπε να είναι πολύ μεγάλο, γι' αυτό και επιλέχθηκε να είναι 30x40mm². Έτσι, το μήκος της μικροταινίας, καθώς και του διηλεκτρικού υλικού ήταν 40mm και το πλάτος του διηλεκτρικού ήταν 30mm. Επίσης, στο κάτω μέρος της μικροταινίας σχεδιάστηκε το επίπεδο γείωσης.



Εικόνα 2-8 Προοπτική απεικόνιση του μοντέλου της μικροταινίας

Αρχικά σε αυτό το μοντέλο, έγινε μελέτη 15 διαφορετικών υλικών για το διηλεκτρικό, με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ύψη, τα οποία παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

ΥΛΙΚΟ	ϵ_r	$\tan\delta$	Ύψος (H)(mil)
Rogers RT/duroid 5880	2.2	0.0009	60
Bungard FR-4	4.5	0.0150	63
Rogers RO3006	6.15	0.0020	50
Rogers RO4003C	3.55	0.0021	60
Rogers RO4350B	3.66	0.0037	60
Rogers RT/duroid6006	6.15	0.0027	100
Rogers TMM6	6.0	0.0023	125
Rogers TMM10i	9.8	0.0020	100/125
Taconic CER-10	10.0	0.0035	125
Taconic RF-60A	6.15	0.0028	60/125
Taconic RF-45	4.5	0.0037	62
Taconic RF-35A	3.5	0.0016	60
Taconic RF-30	3.0	0.0014	60
Taconic TLX-8	2.55	0.0019	62
Taconic TRF-45	4.38	0.00284	64

Πίνακας 2-2 Διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά και οι ιδιότητές τους.

Παρατηρείται ότι τα ύψη δίνονται σε mil, όπου $1\text{mil}=0.0254\text{mm}$.

Για το κάθε ένα μοντέλο έγινε μελέτη, ώστε να βρεθεί το κατάλληλο πλάτος της μικροταινίας (Wstrip), το οποίο θα έδινε αντίσταση εισόδου κοντά στα 50Ω . Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ένα σχετικά μικρό εύρος τιμών για το πλάτος της μικροταινίας, όπου θα γίνει περαιτέρω μελέτη στο τελικό μοντέλο, έτσι ώστε οι απώλειες λόγω προσαρμογής μεταξύ του συνδετήρα και της μικροταινίας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Δηλαδή ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} του σήματος από τον συνδετήρα προς τη μικροταινία θα είναι όσο γίνεται

μικρότερος και έτσι σχεδόν όλη η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος θα μεταφέρεται στο άλλο άκρο της μικροταινίας.

Γι' αυτό το σκοπό, στο μοντέλο προστέθηκαν δύο θύρες και με διέγερση της μίας από αυτές καταγράφονταν τα αποτελέσματα της αντίστασης εισόδου για ένα εύρος τιμών του πλάτους της μικροταινίας, καθώς έγινε παραμετρική σάρωση με βήμα 0.1mm. Στη συνέχεια επιλεγόταν η τιμή που έδινε αντίσταση εισόδου πιο κοντά στα 50Ω.

Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι αρχικά σε ένα μοντέλο έγινε adaptive meshing και επιλέχθηκε το 20-20-50 σαν το ιδανικότερο και λόγω καλών αποτελεσμάτων σύγκλισης και καλύτερου χρόνου προσομοίωσης, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και στα τελικά μοντέλα. Οι τιμές για το πλάτος της μικροταινίας που επιλέχθηκαν σε αυτό το μοντέλο φαίνονται παρακάτω.

ΥΛΙΚΟ	Wstrip (mm)
Rogers RT/duroid 5880	4.7
Bungard FR-4	3.0
Rogers RO3006	1.8
Rogers RO4003C	3.4
Rogers RO4350B	3.3
Rogers RT/duroid6006	3.7
Rogers TMM6	4.8
Rogers TMM10i	3.0
Taconic CER-10	2.9
Taconic RF-60A	4.7
Taconic RF-45	2.9
Taconic RF-35A	3.4
Taconic RF-30	3.8
Taconic TLX-8	4.4
Taconic TRF-45	3.1

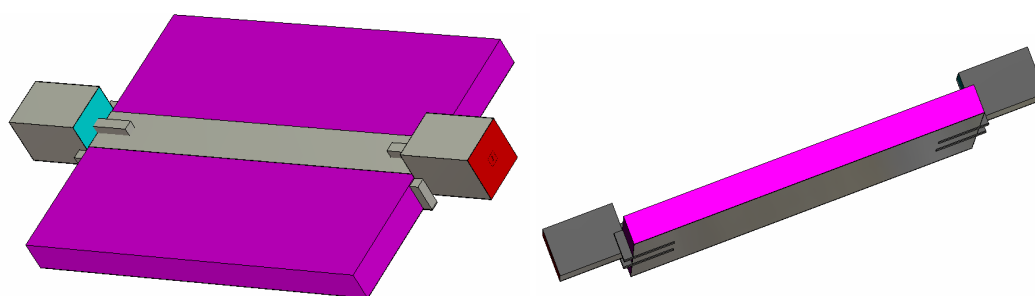
Πίνακας 2-3 Οι τιμές του πλάτους της μικροταινίας για διαφορετικό διηλεκτρικό υλικό.

Από τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι το πλάτος σε κάποια μοντέλα ξεπερνά το πλάτος του διηλεκτρικού του συνδετήρα, το οποίο ισούται με 3.8mm. Αυτό σημαίνει ότι όταν ενωθεί ο συνδετήρας με τη μικροταινία στο τελικό μοντέλο θα βραχυκυκλωθεί ο εξωτερικός αγωγός του συνδετήρα με τον αγωγό της μικροταινίας και τα αποτελέσματα δε θα είναι πια έγκυρα. Γι' αυτό το λόγο σχεδιάστηκε ένας δεύτερος συνδετήρας, ο οποίος έχει πλάτος διηλεκτρικού ίσο με 4.55mm, ενώ παρατηρείται και αλλαγή στο πλάτος του εσωτερικού αγωγού

που γίνεται ίσο με 1.25mm, ώστε να επιτυγχάνεται αντίσταση εισόδου 50Ω. Ο δεύτερος αυτός συνδετήρας θα χρησιμοποιηθεί τελικά στα μοντέλα.

Το τελικό μοντέλο αποτελείται από το είδος της μικροταινίας, σε κάθε άκρο της οποίας συνδέεται ένας συνδετήρας. Γι' αυτό έγινε εισαγωγή στο μοντέλο της μικροταινίας το μοντέλο του συνδετήρα, και στη συνέχεια έγινε η ένωσή τους στα κατάλληλα σημεία. Προφανώς προκύπτουν 15 διαφορετικά μοντέλα, λόγω των διαφορετικών ειδών διηλεκτρικού στο μοντέλο της μικροταινίας.

Το τελικό μοντέλο μετά την εφαρμογή του SMA τετραγωνικού συνδετήρα φαίνεται παρακάτω.



(α) Προοπτική απεικόνιση του τελικού μοντέλου της μικροταινίας και των δύο συνδετήρων
(β) Προοπτική απεικόνιση του τελικού μοντέλου από διαφορετική οπτική γωνία, ώστε να φαίνεται η ένωση των βραχιόνων με το επίπεδο γείωσης

Στα τελικά μοντέλα έπρεπε και πάλι να ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία, ώστε να βρεθεί το κατάλληλο πλάτος της μικροταινίας, με το οποίο θα επιτυγχάνεται ο μικρότερος συντελεστής ανάκλασης S_{11} , σε ένα εύρος συχνοτήτων από 0-6 GHz. Γι' αυτό έγινε optimization στο πλάτος σε ένα μικρό εύρος τιμών γύρω από τα αποτελέσματα που δόθηκαν στον προηγούμενο πίνακα. Αφού επιλέχθηκε το κατάλληλο πλάτος με ακρίβεια 0.1mm, στη συνέχεια έγινε προσομοίωση του μοντέλου γι' αυτή την τιμή, στο εύρος συχνοτήτων 0-6GHz, με οριακές συνθήκες open (add space). Στη συνέχεια έγινε adaptive meshing και η σύγκλιση επιτεύχθηκε στο 20-20-50.

Ένα από τα επιθυμητά αποτελέσματα που θα θέλαμε να υπολογιστούν στα τελικά μοντέλα ήταν η τιμή του $\epsilon_{\text{effective}}$. Το ϵ_{reff} είναι η ενεργή (effective) τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r , η οποία οφείλεται στο φαινόμενο κροσσών (fringing), κατά το οποίο γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου περνούν από αέρα

και στη συνέχεια καταλήγουν στο διηλεκτρικό, αφού πάνω από την μικροταινία υπάρχει αέρας, ενώ στο κάτω μέρος διηλεκτρικό. Ισχύει ότι $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$. Η τιμή του ϵ_{reff} εξαρτάται από το πλάτος της μικροταινίας W_{strip} , καθώς και από το λόγο W_{strip}/H , όπου H : το ύψος του διηλεκτρικού.

Ο υπολογισμός του ϵ_{reff} έγινε σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο.

$$\epsilon_{\text{reff}} = \left(\frac{S_{21_{f_0}}}{360 * \frac{L_{\text{strip}}}{\lambda_0}} \right)^2$$

όπου L_{strip} : το μήκος της μικροταινίας

$\lambda_0 = c_0/f_0$: το μήκος κύματος στον αέρα

$S_{21_{f_0}}$: η φάση που χρειάζεται το κύμα να φτάσει από τη μία άκρη της μικροταινίας στην άλλη με δεδομένη την ύπαρξη διηλεκτρικού, υπολογιζόμενη σε μία συχνότητα εντός του φάσματος όπου γίνεται η μελέτη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η $f_0 = 2$ GHz. Η επιλογή της κεντρικής συχνότητας έγινε τυχαία από το εύρος τιμών όπου έγινε η μελέτη, καθώς δεν επηρεάζει ουσιαστικά την τιμή του ϵ_{reff} , παρά μόνο ελάχιστα, της τάξης του 0.01.

Ο παραπάνω τύπος προκύπτει βάσει του παρακάτω σκεπτικού. Στην περίπτωση που το $L_{\text{strip}} = \lambda_0$ και το $\epsilon_r = 1$, τότε η φάση θα ήταν ίση με $\varphi = \arg(S_{21_{f_0}}) = 360^\circ$. Στην περίπτωση όμως της μικροταινίας θα ισχύει ότι

$$\arg(S_{21_{f_0}}) = \frac{2\pi}{\lambda_0} * L_{\text{strip}} \Rightarrow \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} = \frac{\arg(S_{21_{f_0}})}{360 * \frac{L_{\text{strip}}}{\lambda_0}}$$

$$\text{όπου } \lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}$$

$$\text{Άρα } \arg(S_{21_{f_0}}) = \frac{2\pi}{\lambda_0} * L_{\text{strip}} \Rightarrow \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} = \frac{\arg(S_{21_{f_0}})}{360 * \frac{L_{\text{strip}}}{\lambda_0}}$$

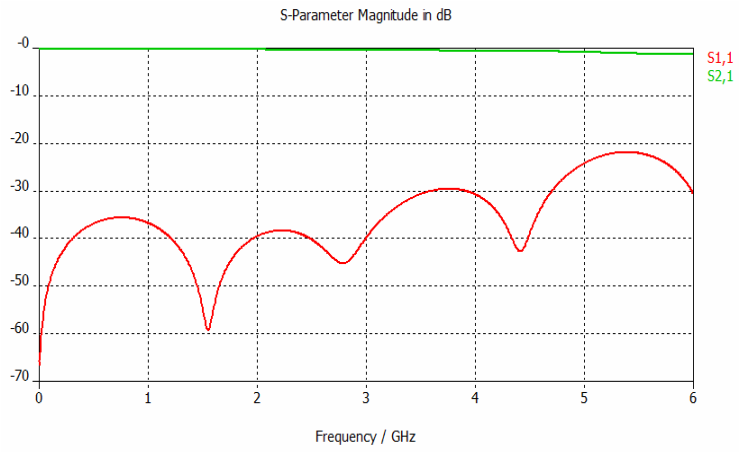
και έτσι προκύπτει ο επιθυμητός τύπος.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα 14 διαφορετικά μοντέλα, όπου περιέχονται οι τελικές τιμές για το ύψος του διηλεκτρικού, το πλάτος της μικροταινίας, το ϵ_{reff} και την αντίσταση εισόδου.

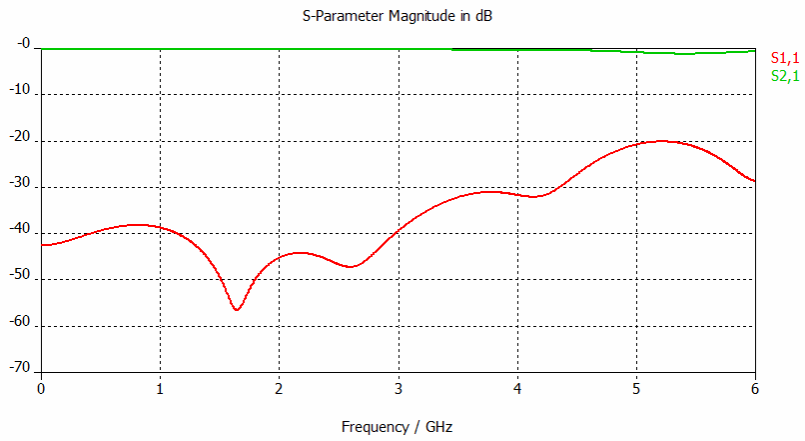
ΥΛΙΚΟ	H (mil)	Wstrip (mm)	ϵ_{reff}	Z_0 (Ω)
Rogers RT/duroid 5880	60	4.6	2.1	49.9
			5	4
Bungard FR-4	63	3.0	3.7	49.9
			1	6
Rogers RO3006	50	1.7	4.6	49.9
			3	9
Rogers RO4003C	60	3.3	3.0	50.0
			6	1
Rogers RO4350B	60	3.3	3.1	50.0
			4	3
Rogers RT/duroid6006	100	3.8	5.0	49.9
			0	3
Rogers TMM6	125	4.4	5.1	49.9
			4	4
Rogers TMM10i	125	3.2	7.8	49.9
			3	3
Taconic CER-10	125	3.1	7.9	49.9
			4	9
Taconic RF-60A	60	2.1	4.6	49.9
			7	0
Taconic RF-45	62	2.9	3.6	49.9
			8	7
Taconic RF-35A	60	3.4	3.0	50.0
			4	1
Taconic RF-30	60	3.7	2.6	49.9
			9	5
Taconic TLX-8	62	4.5	2.4	49.9
			3	6
Taconic TRF-45	64	3.1	3.5	49.9
			7	3

Πίνακας 2-4 Τελικά αποτελέσματα

Στη διπλωματική εργασία τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Bungard FR-4 και το Taconic TRF-45. Γι' αυτό κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν τα διαγράμματα του συντελεστή ανάκλασης μετά την προσομοίωση των τελικών μοντέλων για αυτά τα δύο υλικά.



Σχήμα 2-3 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για το υλικό Bungard FR-4



Σχήμα 2-4 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για το υλικό Taconic TRF-45

2.5 Βιβλιογραφία

- [1] Alfred R. Lopez, “Fundamental Limitations of Small Antennas: Validation of Wheeler’s Formulas”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 48, pp. 28-36, No. 4, August 2006.
- [2] A.K. Skrivervik, J.F. Zurcher, O. Staub and J.R. Mosig, “PCS Antenna Design : The Challenge of Miniaturization”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 44, pp. 12-26 , No. 4, August 2001.
- [3] Constantine A. Balanis, “Antenna theory”, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc, 1992.
- [4] Cyril Luxey, “Small Antennas for Handsets”, *Industrial Antennas Course*, IMST-Germany, April 23-27 2007.
- [5] James S. McLean, “A Re-Examination of the Fundamental Limits on the Radiation Q of Electrically Small Antennas”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 44, pp. 12-26 , No. 4, August 2001.
- [6] Anja Skrivervik, “Advances in PCS Antenna Design and Measurement”, *Automatica* 43, 2002.
- [7] Χ. Καψάλης, Π. Κωπτής, “Κεραίες και Ασύρματες Ζεύξεις”, Α' Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2005.
- [8] David M, Pozar, “Μικροκυματική Τεχνολογία”, Α' Έκδοση, Εκδόσεις Ίων, 2004.
- [9] Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου, “Εισαγωγή στα Μικροκύματα”, Β' Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1994.

3. Υπολογιστικές Μέθοδοι & Λογισμικό Προσομοιώσεων

3.1 Υπολογιστικές Μέθοδοι Προσομοιώσεων

Τα τελευταία χρόνια οι μηχανικοί καλούνται να σχεδιάσουν ηλεκτρονικά συστήματα αυξημένης πολυπλοκότητας, τα οποία αποτελούνται από διαφορετικά μέρη, το καθένα από τα οποία απαιτεί ξεχωριστή μελέτη. Κάποια από αυτά αξίζουν ιδιαίτερη προσοχή, καθώς η σωστή λειτουργία τους είναι καθοριστική για το υπόλοιπο σύστημα. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι το τμήμα της κεραίας.

Η μελέτη της κεραίας είναι υψίστης σημασίας, καθώς η αξιοπιστία ενός συστήματος στηρίζεται κατά πολύ στη σωστή λειτουργία της. Η συνεχής απαίτηση για λειτουργία σε ολοένα και μεγαλύτερες συχνότητες, της τάξης των GHz, καθιστά την κεραία ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα. Αυτό συνεπάγεται ότι η μελέτη της δεν μπορεί πλέον να γίνεται μέσω απλής ανάλυσης, αλλά μέσω τρισδιάστατων υπολογιστικών προσομοιώσεων, ώστε τα αποτελέσματα της μελέτης να είναι έγκυρα. Με αυτό τον τρόπο ο υπολογισμός των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών γίνεται μέσω H/Y, πολύ πιο εύκολα και γρήγορα, ενώ η κατασκευή και η πειραματική μελέτη φυσικών μοντέλων γίνεται μόνο στο τελευταίο στάδιο της μελέτης.

Συνεπώς, τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί ανάπτυξη τόσο στην εύρεση αποδοτικών αλγορίθμων, όσο και στο σχεδιασμό εμπορικών λογισμικών, φιλικών προς το χρήστη, για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

Οι τρεις κυριότερες υπολογιστικές μέθοδοι, στις οποίες βασίζονται τα περισσότερα εμπορικά προγράμματα προσομοίωσης για υψηλές συχνότητες, είναι οι εξής.

- Η μέθοδος των ροπών (MoM)
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)
- Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD)

Τις τρεις αυτές μεθόδους θα παρουσιάσουμε παρακάτω, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD), καθώς είναι αυτή που χρησιμοποιήσαμε κατά τη μελέτη των δικών μας κεραιών.

3.1.1 Μέθοδος των ροπών (MoM)

Η μέθοδος των ροπών είναι μία από τις πρώτες υπολογιστικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για εφαρμογές κεραιών. Η ανάπτυξή της βασίζεται στις επιφάνειες, το οποίο σημαίνει ότι δε γίνεται διακριτοποίηση ολόκληρου του υπολογιστικού χώρου, παρά μόνο των επιφανειών της κατασκευής με βάση το υλικό τους, ενώ και ο υπολογισμός των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων γίνεται μόνο στις επιφάνειες αυτές. Επιπλέον, η μέθοδος των ροπών αποτελεί μία μέθοδο επίλυσης στο πεδίο της συχνότητας, καθώς η διαδικασία επίλυσης που ακολουθείται εφαρμόζεται χωριστά για κάθε συχνότητα.

Η επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών βασίζεται στις εξισώσεις Helmholtz:

$$\Delta \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (3.1)$$

$$\Delta \varphi + k^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

και στοχεύει στην επίλυση των ρευμάτων στις επιφάνειες. Η κατανομή του ρεύματος στις επιφάνειες μπορεί να υπολογιστεί ως εξής. Αρχικά η επιφάνεια διαχωρίζεται σε μικρότερα τμήματα, το μέγεθος των οποίων είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος, τα οποία μπορεί να είναι είτε τριγωνικά είτε τετραγωνικά, για την καλύτερη προσέγγιση πιο πολύπλοκων γεωμετριών. Στη συνέχεια, μέσω των οριακών συνθηκών για το εφαπτομενικό ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών επιφανειακών τμημάτων. Ο υπολογισμός των ρευμάτων καθιστά τη μέθοδο των ροπών ιδανική σε περιπτώσεις μεταλλικών επιφανειών.

Επίσης, η μέθοδος των ροπών χαρακτηρίζεται από δύο πλεονεκτήματα. Το πρώτο συνίσταται από το γεγονός ότι διαμορφώνει τη διαδικασία επίλυσης των ρευμάτων στην περίπτωση που το αντικείμενο μελέτης δεν είναι ομοιογενές, αλλά αποτελείται από διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά. Τότε κάθε τμήμα με διαφορετικό υλικό θεωρείται σαν μία κλειστή επιφάνεια. Το δεύτερο αφορά

στην ανάλυση επίπεδων, μεταλλικών δομών ανάμεσα από στρώσεις υλικών, κατά την οποία είναι απαραίτητη η διακριτοποίηση μόνο των μεταλλικών τμημάτων και όχι και των στρωμάτων υλικού. 0

3.1.2 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, όπως και η αντίστοιχη των ροπών, είναι μία μέθοδος επίλυσης στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό όμως τις κάνει ακατάλληλες για μελέτη ευρείας ζώνης συχνοτήτων, καθώς αν δε γίνει σωστή δειγματοληψία των συχνοτήτων μπορεί να καθούν «κρίσιμες» συχνότητες, όπως συχνότητες συντονισμού, κάτι το οποίο συνεπάγεται μη έγκυρα αποτελέσματα. Επιπλέον, ο τρόπος επίλυσης που ακολουθεί στηρίζεται στη διακριτοποίηση όλου του υπολογιστικού όγκου, ακόμη και του περιβάλλοντα με αέρα χώρου γύρω από την κατασκευή. Για την επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών, ο υπολογιστικός χώρος πρέπει να διαιρεθεί σε μικρότερες μονάδες, τα πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία για μελέτη τρισδιάστατου χώρου είναι τετράεδρα. 0

3.1.3 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD)

Η μέθοδος αυτή, όπως και η προηγούμενη, στηρίζεται στη διακριτοποίηση ολόκληρου του υπολογιστικού όγκου, κατά τη διαδικασία επίλυσης των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών. Η κύρια διαφορά της σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους, έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί μία μέθοδο επίλυσης στο πεδίο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι η επίλυση γίνεται για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, μέχρι να επιτευχθεί μία σταθερή κατάσταση για το υπό μελέτη σύστημα. Στη συνέχεια μέσω του μετασχηματισμού Fourier επιτυγχάνεται μετατροπή της λύσης στο πεδίο της συχνότητας. Μέσω της επίλυσης στο πεδίο του χρόνου δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης πολύ μεγάλων και πολύπλοκων δομών μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ είναι η καταλληλότερη μέθοδος για ευρυζωνικές δομές, καθώς η διεξαγωγή των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει μέσω μίας προσομοίωσης. Αυτή η ιδιότητα την κάνει την πιο κατάλληλη μέθοδο για τη μελέτη και προσομοίωση κεραίων.

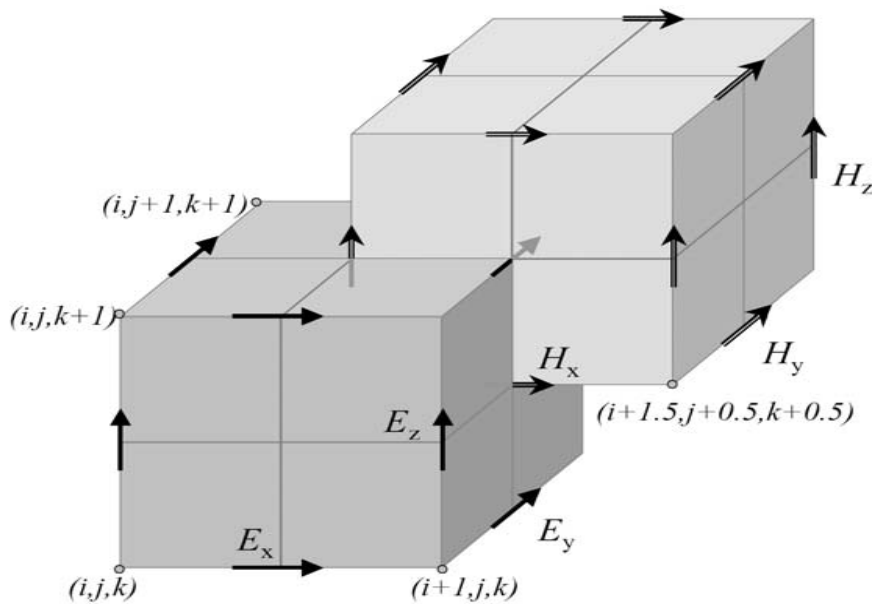
Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου στηρίζεται στις διαφορικές εξισώσεις Maxwell στο πεδίο του χρόνου,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} &= \nabla \times \mathbf{H} - \mathbf{J} \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \mathbf{E} \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου $\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$ και $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix}$. Όλες οι συνιστώσες είναι συνεχείς τόσο στο

πεδίο του χώρου όσο και στο πεδίο του χρόνου.

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη μέθοδο αυτή έχει η διακριτοποίηση του χώρου. Ο υπολογιστικός χώρος διαμερίζεται σε ορθογώνια κελιά βάσει συγκεκριμένων διακριτών βημάτων Δx , Δy και Δz . Έτσι, οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου κατανέμονται πάνω στο ορθογώνιο πλέγμα ως εξής:



Εικόνα 3-1 Συνιστώσες ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου πάνω στο ορθογώνιο πλέγμα

Εκτός από τη διακριτοποίηση στο πεδίο του χώρου, οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου διακριτοποιούνται και στο πεδίο του χρόνου. Θεωρούμε βήμα Δt και στη συνέχεια ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται ανά $n \times \Delta t$, ενώ του μαγνητικού πεδίου ανά $\left(n + \frac{1}{2}\right) \times \Delta t$. Για το

γεγονός ότι το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο υπολογίζονται σε εναλλασσόμενα, διακριτά σημεία στο πεδίο του χρόνου, ο αλγόριθμος είναι γνωστός και ως αλγόριθμος Leap-Frog. Ωστόσο, για το βήμα Δt πρέπει να τεθεί ένα άνω όριο, γνωστό ως Κριτήριο σταθερότητας Courant, το οποίο εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \times \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (3.4)$$

όπου c : η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αυτό συμβαίνει διότι πρέπει να διασφαλιστεί το γεγονός ότι η απόσταση $c \cdot \Delta t$, δηλαδή η απόσταση που διανύει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο διάστημα Δt , να μην είναι μεγαλύτερη από το πλάτος ενός κελιού. Επίσης, παρατηρείται ότι η χωρική διακριτοποίηση επηρεάζει σημαντικά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς όσο μικρότερα είναι τα κελιά τόσο μικρότερο είναι και το βήμα Δt , κάτι που συνεπάγεται ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα θα χρειαστεί περισσότερα βήματα Δt , ώστε να διασχίσει τον υπολογιστικό χώρο. 0

Μία άλλη παρατήρηση που αξίζει να σημειωθεί για την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών είναι το γεγονός ότι ο υπολογισμός των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων επεκτείνεται και έξω από τον όγκο προσομοίωσης του μοντέλου. Γι' αυτό το λόγο, στα όρια αυτού του όγκου καθορίζονται ειδικές οριακές συνθήκες, όπως οι εξής:

- Το ηλεκτρικό τείχος : προσομοιώνει ένα τέλεια αγώγιμο τείχος, όπως για παράδειγμα το επίπεδο γείωσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν επίπεδο συμμετρίας, όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνειά του, ενώ ο μαγνητικό εφάπτεται σε αυτή.
- Το μαγνητικό τείχος : προσομοιώνει ένα επίπεδο συμμετρίας, όπου το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια και το ηλεκτρικό εφάπτεται σε αυτή.

Τα επίπεδα συμμετρίας είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, όταν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, βάσει της γεωμετρίας της υπό μελέτης κατασκευής, καθώς έτσι μειώνεται κατά πολύ ο χρόνος προσομοίωσης, αφού μόνο ένα μέρος της δομής αρκεί να προσομοιωθεί για να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

- Οι οριακές συνθήκες ακτινοβολίας κατά Berenger : προσομοιώνουν τη συμπεριφορά του ελεύθερου χώρου, ελαχιστοποιώντας τις ανακλάσεις

των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας την ύπαρξη στρωμάτων στον περιβάλλοντα χώρο, τα οποία αποτελούνται από υλικά που απορροφούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μία από τις πιο αποτελεσματικές οριακές συνθήκες είναι αυτή των τέλεια matched στρωμάτων (perfectly matched layer – PML). 0

Τέλος, η μέθοδος FDTD επιτρέπει την επίλυση σε ένα σχετικά μικρό χώρο, το οποίο σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπολογίσει το μακρινό πεδίο της κεραίας παρά μόνο το κοντινό. Ο υπολογισμός του μακρινού γίνεται μέσω μετασχηματισμού του κοντινού της πεδίου με βάση την αρχή του Huygens. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, οποιοδήποτε σημείο βρίσκεται πάνω σε κλειστή επιφάνεια γύρω από την πρωταρχική πηγή, δηλαδή την κεραία, εκτός της ίδιας της κεραίας, μπορεί να θεωρηθεί σαν μία νέα πηγή ακτινοβολίας. Έτσι, κάθε νέα κλειστή επιφάνεια που περιβάλλει την κεραία, θεωρείται σαν μία ισοδύναμη πηγή ακτινοβολίας για τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό και την προσομοίωση των κεραίων είναι το CST Microwave Studio 2008. Πριν αναφερθούμε στα κυριότερα χαρακτηριστικά του παρακάτω, πρέπει να σημειωθεί ότι το CST χρησιμοποιεί την υπολογιστική μέθοδο, Τεχνική Πεπερασμένης Ολοκλήρωσης (FIT), η οποία στο πεδίο του χρόνου και για διακριτοποίηση του υπολογιστικού χώρου μέσω καρτεσιανού τύπου πλέγματος είναι κοινή με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Διαφορών, FDTD. Ωστόσο, παρουσιάζει κάποιες διαφορές και πλεονεκτήματα σε σχέση με τη μέθοδο FDTD στα οποία αξίζει να αναφερθούμε.

3.1.3.1 Τεχνική Πεπερασμένης Ολοκλήρωσης (FIT)

Η τεχνική FIT βασίζεται στην ολοκληρωτική μορφή των εξισώσεων Maxwell

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.5)$$

$$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = - \iint_A \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) \cdot d\vec{A} \quad (3.6)$$

και όχι στη διαφορική όπως η μέθοδος FDTD. Επίσης, μέσω των συνιστωσών του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου υπολογίζει το δυναμικό και τη ρευματική κατανομή, μία ιδιότητα που την έχει και η μέθοδος FDTD, και μέσω

αυτών των μεγεθών υπολογίζει τον πίνακα εξισώσεων Maxwell καθώς και άλλα ηλεκτρικά μεγέθη με πολύ πιο γρήγορο τρόπο.

Μία άλλη ιδιαίτερα χρήσιμη ιδιότητα της μεθόδου είναι κατά τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού χώρου. Δε χρησιμοποιεί τον κλασικό τρόπο διακριτοποίησης μέσω εξαεδρικών κελιών, παρά μία πιο εξελιγμένη μέθοδο. Ο κλασικός τρόπος χαρακτηρίζεται από δύο βασικά μειονεκτήματα, α) επεκτείνεται σε ολόκληρο το χώρο και β) δεν μπορεί να παρέχει λεπτομερή διακριτοποίηση σε κάποιες πολύπλοκες δομές οδηγώντας σε μη ακριβή αποτελέσματα. Αντίθετα η πιο εξελιγμένη μέθοδος, γνωστή σαν Τέλεια Οριακή Προσέγγιση (PERFECT BOUNDARY APPROXIMATION- PBA) διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα της κλασικής διακριτοποίησης με εξαεδρικά κελιά, αλλά επιτρέπει πιο λεπτομερή διακριτοποίηση ειδικά στις άκρες κυρτών επιφανειών προσδίδοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. 0

Μία ακόμη καινοτομία είναι το γεγονός ότι επιτρέπει τοπική διακριτοποίηση σε συγκεκριμένα σημεία των δομών, όπου είναι απαραίτητη μεγαλύτερη λεπτομέρεια, χωρίς αυτή να επεκτείνεται και στον υπόλοιπο χώρο. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των κελιών μπορεί να μειωθεί σημαντικά κάτι που ευνοεί τη μείωση του χρόνου προσομοίωσης, χωρίς να επιδρά αρνητικά στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. 00

3.2 Λογισμικό Προσομοιώσεων

Όπως αναφέραμε και παραπάνω το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό και την προσομοίωση των κεραιών είναι το CST Microwave Studio 2008. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του προγράμματος.

3.2.1 Μοντελοποίηση

Το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία του προς μελέτη μοντέλου. Ο χρήστης έχει στη διάθεσή του μία πληθώρα σχημάτων και επιλογών για τη δημιουργία ακόμη και πολύ πολύπλοκων δομών. Στο φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον του CST περιέχονται τα βασικά γεωμετρικά σχήματα, βάσει των οποίων είναι δυνατός ο σχεδιασμός τρισδιάστατων δομών, όπως κύβος, κύλινδρος, σφαίρα

κ.α. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διαφόρων μορφών καμπύλες για τη δημιουργία πολύπλοκων και ακανόνιστων σχημάτων, τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε τρισδιάστατες δομές, μέσω εντολής εξαγωγής σαν επιφάνεια (extrude).

Πέρα από τη βασική σχεδίαση κάποιων δομών, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει διάφορες εντολές, που θα τον διευκολύνουν για την ολοκλήρωση του μοντέλου του. Για παράδειγμα, με την εντολή Boolean, μπορεί να επιλέξει τη συνένωση, την αφαίρεση ή και την τομή δύο ή περισσότερων δομών. Μία άλλη ιδιαίτερα χρήσιμη εντολή είναι αυτή της μετατροπής (transform), με την οποία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μία δομή και να τη διαμορφώσει όπως θέλει, δηλαδή να της αλλάξει τη θέση και τον προσανατολισμό στο χώρο, να την πολλαπλασιάσει.

Στη συνέχεια, ο χρήστης για κάθε ξεχωριστό τμήμα της δομής μπορεί να επιλέξει το υλικό είτε μέσω της βιβλιοθήκης είτε ορίζοντας ο ίδιος τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες και το όνομά του. Μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου, απαραίτητος είναι ο ορισμός κάποιων μεγεθών όπως οι μονάδες μέτρησης που είναι GHz για τη συχνότητα, mm για τις διαστάσεις του μοντέλου και nsec για το πεδίο του χρόνου, το εύρος του γκαουσιανού παλμού, εφόσον κατά την προσομοίωση θα επιλεχθεί ο επιλύτης στο πεδίο του χρόνου (transient solver), καθώς και τα όρια της διάταξης που καθορίζονται από ένα ορθογώνιο κουτί (boundary box), του οποίου η διάσταση δεν μπορεί να είναι μικρότερη από το 1/8 του μήκους κύματος. Αρχικά γίνονται οι υπολογισμοί των πεδιακών κατανομών και των επιφανειακών ρευμάτων στο κοντινό πεδίο και στη συνέχεια για το μακρινό πεδίο. Τέλος, στην επιφάνεια του boundary box ορίζονται οι οριακές συνθήκες καθώς και οι συμμετρίες, αν υπάρχουν.

Το τελευταίο στάδιο για να ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση είναι ο καθορισμός των θυρών, από όπου θα γίνεται η διέγερση της διάταξης. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε διακριτές θύρες και σε θύρες κυματοδηγών. Οι πρώτες δίνουν τόσο ακριβή αποτελέσματα, αλλά απλοποιούν κατά πολύ το μοντέλο, το οποίο συνεπάγεται λιγότερο χρόνο προσομοίωσης. Οι δεύτερες είναι πιο αξιόπιστες και μοντελοποιούν κυματοδηγούς απείρου μήκους προς την αρνητική κατεύθυνση διάδοσης. Τέλος, τα σήματα εισόδου παράγονται

αυτόματα από το πρόγραμμα και είναι γκαουσιανοί παλμοί πεπερασμένης διάρκειας. 0

3.2.2 Διακριτοποίηση (meshing)

Στην παράγραφο που αναλύσαμε την υπολογιστική μέθοδο πεπερασμένης ολοκλήρωσης (FIT) έγινε αντιληπτή η σημασία της διακριτοποίησης του μοντέλου πριν από κάθε προσομοίωση, τόσο για την ακρίβεια και εγκυρότητα των αποτελεσμάτων όσο και για το χρόνο προσομοίωσης.

Το πρόγραμμα CST έχει τη δυνατότητα της αυτόματης προσαρμογής του πλέγματος διακριτοποίησης, κάνοντάς το πιο πυκνό σε περιοχές με έντονες μεταβολές και αφήνοντάς το πιο αραιό σε ομοιόμορφες περιοχές. Ωστόσο σε πιο σύνθετα και πολύπλοκα μοντέλα δεν αρκεί αυτή η διακριτοποίηση. Αυτό αντιμετωπίζεται, καθώς το CST δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα παράστασης του πλέγματος υπό τρεις οπτικές γωνίες, κατά τον άξονα x , y και z , ώστε να είναι ορατά τα σημεία του πλέγματος όπου θα γίνει ο υπολογισμός του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Έτσι, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει την πυκνότητα των σημείων σε τοπικό επίπεδο (local meshing) στις διάφορες περιοχές του μοντέλου, ανάλογα με την ιδιαιτερότητα του μοντέλου. Δηλαδή, σε τμήματα όπου παρουσιάζονται ασυνέχειες ή απότομες μεταβολές η πυκνότητα θα πρέπει να είναι μεγάλη για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Μία ακόμη ιδιαίτερα σημαντική δυνατότητα του προγράμματος είναι η προσαρμοστική διακριτοποίηση του πλέγματος (adaptive mesh refinement). Με τη μέθοδο αυτή, που θα πρέπει να επιλεχθεί από το χρήστη, το σύστημα εκτελεί μία αρχική προσομοίωση με την αυτόματη διακριτοποίηση που έχει επιλέξει αρχικά και με βάση τα αποτελέσματα από αυτό το πρώτο πλέγμα συνεχίζει με επόμενες προσομοιώσεις, δημιουργώντας δεύτερο πλέγμα, τρίτο κ.λ.π. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνει κάθε φορά τα χαρακτηριστικά του πλέγματος, μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Τότε, ο χρήστης ενημερώνεται ότι περαιτέρω βελτίωση του πλέγματος δε θα επηρεάσει τα αποτελέσματα. 0

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη μελέτη και προσομοίωση των δικών μας μοντέλων που θα περιγράψουμε παρακάτω, έγινε χρήση της adaptive mesh refinement στο αρχικό στάδιο. Επειδή τα μοντέλα ήταν ιδιαίτερα σύνθετα,

πρώτα επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τοπική διακριτοποίηση με βάση την ιδιαιτερότητα ορισμένων τμημάτων και στη συνέχεια εφαρμόσαμε adaptive meshing. Τέλος, επιλέξαμε εκείνο το πλέγμα (δεύτερο, τρίτο), στο οποίο παρατηρήσαμε ότι είχε επιτευχθεί σύγκλιση. Αυτό μας έδωσε τη σιγουριά ότι το πλέγμα αυτό είναι το πιο κατάλληλο, με το οποίο μπορεί να συνεχιστεί η μελέτη του μοντέλου χωρίς να υπάρχει κίνδυνος μη εγκυρότητας και αναξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

3.2.3 Παραμετροποίηση

Κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης ο χρήστης έχει τη δυνατότητα της πλήρους παραμετροποίησης των διαστάσεων του μοντέλου του. Είναι σαφές ότι αυτός είναι ο ευκολότερος και αποδοτικότερος τρόπος μελέτης του μοντέλου μιας κεραίας, όπου λόγω της πολυπλοκότητας είναι αναγκαίο να ελεγχθεί η συμπεριφορά όλων των βαθμών ελευθερίας που μας δίνεται. Μέσω της παραμετροποίησης, κάθε μεταβολή πραγματοποιείται έμμεσα με την αλλαγή της τιμής της παραμέτρου και όχι άμεσα στη σχεδίαση του μοντέλου, κάτι που είναι χρονοβόρο, μη πρακτικό και επίφοβο.

Επέκταση των πλεονεκτημάτων της παραμετροποίησης αποτελούν δύο ιδιαίτερα χρήσιμα εργαλεία που προσφέρει το CST, η παραμετρική σάρωση (parametric sweep) και ο optimizer. Κατά την παραμετρική σάρωση γίνεται επιλογή μίας παραμέτρου και στη συνέχεια ορίζεται το επιθυμητό προς μελέτη διάστημα τιμών από τις δύο ακραίες τιμές καθώς και το πλήθος των δειγμάτων. Έτσι, έμμεσα καθορίζεται το βήμα μεταβολής της παραμέτρου στο διάστημα. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα για τα διάφορα μεγέθη παρουσιάζονται ομαδοποιημένα σε κοινή εικόνα, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο για τη σύγκριση και την επιλογή της καταλληλότερης τιμής, καθώς και για την κατανόηση και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων από τη συμπεριφορά του μοντέλου στη μεταβολή της συγκεκριμένης παραμέτρου. 0

Στον optimizer η διαδικασία που ακολουθείται διαφέρει λιγάκι. Σε αυτή την περίπτωση αρχικά επιλέγονται μία ή και περισσότερες παράμετροι, ορίζεται το διάστημα μεταβολής τους και τέλος ο χρήστης πρέπει να θέσει κάποιους στόχους, όπως για παράδειγμα η συχνότητα συντονισμού να είναι μικρότερη

ή/και μεγαλύτερη από μία τιμή. Στη συνέχεια, ο optimizer εκτελεί μία σειρά προσομοιώσεων μέχρι να συγκλίνει στις βέλτιστες τιμές για την κάθε παράμετρο, ώστε να ικανοποιείται ο στόχος. Ωστόσο, το διάστημα τιμών θα πρέπει να είναι σχετικά μικρό και κοντά στη βέλτιστη λύση, αλλιώς το χρονικό διάστημα προσομοίωσης μπορεί να είναι πολύ μεγάλο. Επίσης, είναι δυνατό ο optimizer να εγκλωβιστεί σε κάποια τοπικά βέλτιστη τιμή και να μη μπορεί να καταλήξει στη σωστή λύση, συνεχίζοντας απλά να εκτελεί προσομοιώσεις. 0

Τα δύο παραπάνω εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη των μοντέλων μας, δίνοντάς μας την ευκαιρία να αντιληφθούμε ποιες παράμετροι ήταν πιο κρίσιμες για τη μελέτη της εκάστοτε κεραίας, να επιλέξουμε την καταλληλότερη τιμή, ώστε να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

3.2.4 Προσομοιώσεις

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η υπολογιστική μέθοδος FDTD στο πεδίο του χρόνου, γι' αυτό και οι προσομοιώσεις διεξάχθηκαν στο πεδίο του χρόνου (transient solver), παρόλο που υπάρχουν και άλλοι τύποι προσομοιώσεων, όπως στο πεδίο συχνοτήτων. Ο χρόνος προσομοίωσης μπορεί να ποικίλει από λίγα λεπτά μέχρι πολλές ώρες, γεγονός το οποίο επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η πολυπλοκότητα του μοντέλου, το εύρος του γκαουσιανού παλμού διέγερσης, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που εξαρτάται από την πυκνότητα του πλέγματος διακριτοποίησης. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, το πρόγραμμα δίνει διάφορες πληροφορίες μέσω μηνυμάτων για την πορεία της καθώς και για τυχόν σφάλματα ή προβλήματα που παρουσιάζονται.

3.2.5 Απεικόνιση

Πριν την έναρξη μιας προσομοίωσης, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να υπολογίζονται και να εμφανίζονται κάποια μεγέθη. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω των field monitors και του Post Processing Template. Με τα field monitors μπορούν να επιλεγεί η απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου, της κατανομής του επιφανειακού ρεύματος ή του μακρινού πεδίου σε κάποιες συγκεκριμένες συχνότητες. Στο Post Processing Template ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να

επιλέξει κάποια μεγέθη, που ανήκουν στα ονομαζόμενα 1D Results, όπως ο συντελεστής ανάκλασης, η αντίσταση εισόδου και κάποια μεγέθη, τα 0D Results, τα οποία υπολογίζονται με τη βοήθεια των 1D Results, όπως η συχνότητα συντονισμού, το εύρος ζώνης, ο λόγος στάσιμων κυμάτων (VSWR), το κέρδος ακτινοβολίας (radiation efficiency).

Επιπλέον, μετά το τέλος της προσομοίωσης δίνονται πολλές επιλογές απεικόνισης των διάφορων μεγεθών, όπως ο χάρτης Smith, η δισδιάστατη ή τρισδιάστατη απεικόνιση των πολικών διαγραμμμάτων ακτινοβολίας, της ρευματικής κατανομής ή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και η απεικόνισή τους στο πεδίο του χρόνου (animation).

3.3 Βιβλιογραφία

- [1] Frank Gustrau and Dirk Manteuffel, “EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication Systems”, Springer, Germany 2006.
- [2] I. Munteanu and T. Weiland, “RF and Microwave Simulation with the Finite Integration Technique-From Component to System Design”, InvitedPaper at SCEE, 2006.
- [3] Irina Munteanu and Franz Hirtenfelder, “Convergence of the Finite Integration Techniqueon Various Mesh Types”, GeMiC, 2005.
- [4] CST Microwave Studio Getting Started, CST Studio Suite, 2006.

4. Dual-band τυπωμένες κεραιές ανεστραμμένου F-μονόπολου (PIFA) με σχισμές pre-fractal

4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των ασύρματων φορητών τερματικών είναι ραγδαία. Η απαίτηση για ελαχιστοποίηση των διαστάσεων και αύξηση της εργονομίας οδηγεί στην υιοθέτηση ακτινοβολητών χαμηλού προφίλ, με ομοιοκατευθυντικότητα ακτινοβολίας και ευκολία στη σχεδίαση. Ανάλογα με την εφαρμογή και τη χρήση ολοκληρωμένων φορητών συσκευών προτιμώνται διάφοροι τύποι κεραιών. Ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους κεραιών είναι οι Τυπωμένες Ανεστραμμένης F γεωμετρίας (Printed IFA-PIFA).

Οι κεραιές αυτές αποτελούν μονοπολικές υλοποιήσεις τυπωμένες σε διηλεκτρικό υπόστρωμα, στην άλλη πλευρά του οποίου υπάρχει το επίπεδο γείωσης, ενώ η τροφοδοσία τους γίνεται μέσω μικροταινίας. Αποτελούν έναν ιδιαίτερα προνομιούχο και ενδιαφέρον τύπο κεραιάς καθώς είναι διδιάστατου προφίλ, η κατασκευή τους είναι εύκολη, αποτελούν μέρος του συνολικού κυκλωματικού σχεδίου με αποτέλεσμα η κατασκευή τους να μην επιβαρύνει το συνολικό κόστος, ενώ η προσαρμογή της αντίστασης εισόδου τους είναι εύκολη σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων. 0

4.1.1 Περιγραφή λειτουργίας τυπωμένης ανεστραμμένης F γεωμετρίας μονοπολικής κεραιάς

Η λειτουργία των τυπωμένων ανεστραμμένης F γεωμετρίας κεραιών (PIFA) στηρίζεται σε αυτή του ανεστραμμένου μονόπολου, μίας παραλλαγής του κλασικού $\lambda_g/4$ μονόπολου. Με αυτό τον τρόπο εξάλλου επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση του χώρου κάτι που θεωρείται σαν σμίκρυνση της κεραιάς. Συνεχίζοντας, η λειτουργία τους βασίζεται στη θεωρία ειδώλων, λόγω της αναδίπλωσης του μονόπολου παράλληλα ως προς το επίπεδο γείωσης, όπου εμφανίζεται επαγωγή ρεύματος και γι' αυτό λειτουργεί σαν ασύμμετρο είδωλο του μονόπολου. Ωστόσο, το μονόπολο μετά την αναδίπλωσή του πλησιάζει στο

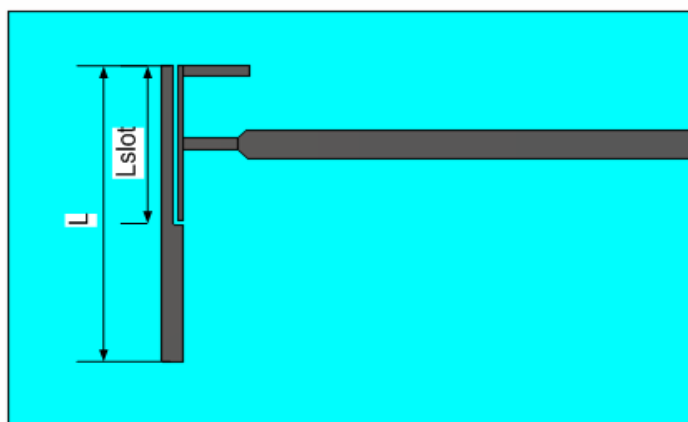
επίπεδο γείωσης εισάγοντας χωρητικότητα στην αντίσταση εισόδου. Η αντιστάθμιση αυτής της χωρητικότητας, ώστε να επιτευχθεί προσαρμογή μεταξύ της κεραίας και της μικροταινίας, γίνεται με την εισαγωγή ενός βραχυκυκλωμένου με το επίπεδο γείωσης στελέχους.

Επιπλέον, οι κεραίες τύπου PIFA όντας μονόπολα τυπωμένα πάνω σε διηλεκτρικό υπόστρωμα με διηλεκτρική σταθερά μεγαλύτερης της μονάδας είναι δυνατό να επιτύχουν συχνότητα συντονισμού, ίση με αυτή που θα επιτύγχαναν στον αέρα με τη διαφορά ότι το μήκος τους θα είναι μικρότερο

κατά $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$. Έτσι, ακόμη ένας βαθμός σμίκρυνσης επιτυγχάνεται.

4.1.2 Δημιουργία dual-band PIFA

Το μήκος του ανεστραμμένου μονόπολου είναι μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος, διότι η μεταβολή του είναι καθοριστική καθώς είναι υπεύθυνη για τη μεταβολή της συχνότητας συντονισμού. Αυτή η ιδιότητα έδωσε το έναυσμα σε διάφορους ερευνητές, όπως στους 0 να τροποποιήσουν το σχήμα του ανεστραμμένου μονόπολου με την εισαγωγή μίας σχισμής τύπου L, έτσι ώστε να δημιουργηθούν δύο $\lambda/4$ μονόπολα διαχωρισμένα από τη σχισμή, που αποτελούν μία κεραία dual-band PIFA. Ο πρώτος συντονισμός οφείλεται στο μήκος του μεγαλύτερου μονόπολου L, ενώ ο δεύτερος συντονισμός στο μήκος του εσωτερικού μονόπολου, L_{slot} . Το μοντέλο αυτής της κεραίας παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4-1 Μοντέλο L-slot PIFA

Στόχος ήταν να επιτευχθεί ο πρώτος συντονισμός στα 2.45 GHz και ο δεύτερος στα 5.25 GHz, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των πρωτοκόλλων IEEE 802.11a και 802.11b.

4.2 Dual-band PIFA με σχισμές pre-fractal και Euclidean

Ο τύπος κεραιών τον οποίο μελετήσαμε και στον οποίο θα αναφερθούμε σε αυτό το κεφάλαιο βασίζεται στο παραπάνω μοντέλο κεραιάς. Ωστόσο πρωταρχικός μας στόχος δεν ήταν μόνο η επίτευξη δύο συντονισμών στα 2.5 GHz και στα 5.25 GHz, αλλά και η σμίκρυνση της ώστε αν είναι εφικτό να προσεγγίσει τα όρια της ηλεκτρικά μικρής κεραιάς. Η σχισμή τύπου L δεν εκμεταλλεύεται πλήρως το χώρο καθώς επιτρέπει το συνολικό μήκος τόσο του μικρού όσο και του μεγάλου μονόπολου, που ισούται με $\lambda/4$ στην εκάστοτε επιθυμητή συχνότητα συντονισμού, να ταυτίζεται με το μήκος που καλύπτει πάνω στο PCB.

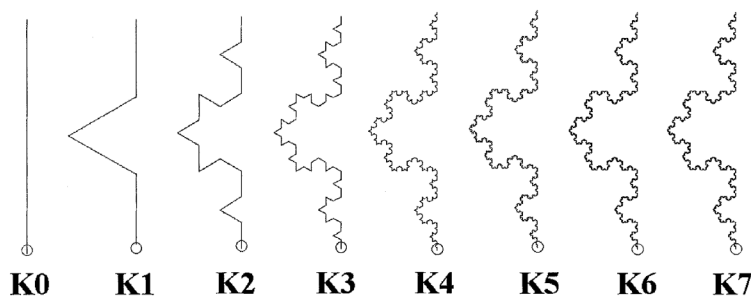
Για να επιτευχθεί σμίκρυνση των διαστάσεων της κεραιάς αντικαταστήσαμε τη σχισμή τύπου L με σχισμές τύπου pre-fractal, όπως η Koch και διάφορες παραλλαγές της, καθώς και τύπου Euclidean, όπως η Minkowski, τις οποίες θα δούμε αναλυτικά παρακάτω. Καθεμία από τις παραπάνω δομές (Koch, Minkowski) χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερο γεωμετρικό σχήμα, το οποίο υποδιαιρείται σε μικρότερα μέρη-αντίγραφα του αρχικού σχήματος. Με αυτόν τον τρόπο η καθεμία δομή διαμορφώνει τη γεωμετρία της L-σχιμής και συγκεκριμένα προκαλεί την αναδίπλωσή της, η οποία γίνεται πιο έντονη ανάλογα με το βαθμό επανάληψης.

Μέσω της αναδίπλωσης της σχισμής επηρεάζεται και η γεωμετρική δομή των δύο μονόπολων. Άμεσα επηρεάζεται και η διαδρομή του επαγόμενου ρεύματος η οποία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που αντιστοιχούσε στη σχισμή L. Αυτό σημαίνει ότι οι διαστάσεις των δύο μονόπολων και συγκεκριμένα τα μήκη τους μπορούν να μειωθούν, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το συνολικό τους μήκος, που σχετίζεται με την επίτευξη των συντονισμών σε συγκεκριμένες συχνότητες, δε θα παραμείνει ίσο με $\lambda/4$ (λ : το μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε αυτές τις συχνότητες).

Για κάθε μορφοκλασματική δομή βάσει της οποίας έγινε η κατασκευή της οχισμής στις κεραιές μας, επιλέξαμε τη δεύτερη επανάληψη, καθώς μεγαλύτερος βαθμός επανάληψης θα οδηγούσε σε ιδιαίτερα μικρά και πυκνά επιμέρους τμήματα με αποτέλεσμα η ρευματική κατανομή να μη μπορεί να ακολουθήσει τη διαδρομή και να υπερπηδά κάποια από αυτά αδυνατώντας να εκμεταλλευτεί την ύπαρξή τους.

4.2.1 Dual-band PIFA με οχισμή τύπου Koch

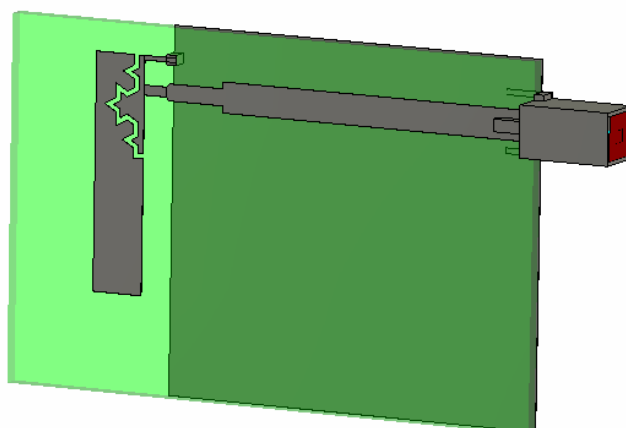
Η πρώτη κεραία που μελετήσαμε ήταν μετά από αντικατάσταση της οχισμής τύπου L με οχισμή βασισμένη στη δομή Koch. Η δομή Koch προκύπτει από ένα ευθύγραμμο τμήμα, που μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο της γεωμετρίας L, ως εξής. Το ευθύγραμμο τμήμα χωρίζεται σε τρία ίσα τμήματα, από τα οποία το μεσαίο αντικαθίσταται από δύο ίσα ως προς τα αρχικά τρία τμήματα, έτσι ώστε να σχηματίζουν το πάνω μέρος ενός ισόπλευρου τριγώνου. Στη συνέχεια μπορεί να επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία σε κάθε επιμέρους ευθύγραμμο τμήμα, οδηγώντας σε μεγαλύτερη αναδίπλωση.



Εικόνα 4-2 Οι 7 πρώτες επαναλήψεις της δομής Koch

4.2.1.1 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου

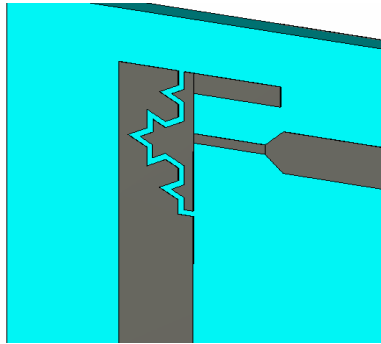
Το τελικό μοντέλο της dual-band τυπωμένης κεραιάς ανεστραμμένης F γεωμετρίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3 Μοντέλο dual-band PIFA με σχισμή Koch

Η ολοκληρωμένη διάταξη της κεραίας έχει τυπωθεί σε ορθογώνιο υπόστρωμα πάχους H , με διηλεκτρικό υλικό TRF-45 της Taconic με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.38$ και απώλειες που εκφράζονται μέσω του μεγέθους εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta = 0.00284$. Παρατηρούμε ότι η κεραία τροφοδοτείται από μικροταινία, η οποία συνδέεται με τον τετραγωνικό SMA συνδετήρα, που μελετήθηκε στο κεφάλαιο 2, το διηλεκτρικό του οποίου είναι το Teflon PTFE με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 2$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0.0003$. Στην άλλη πλευρά του υποστρώματος και αντιδιαμετρικά σε σχέση με τη θέση της κεραίας βρίσκεται το επίπεδο γείωσης. Επίσης, παρατηρούμε ότι το βραχυκυκλωμένο στέλεχος συνδέεται με το επίπεδο γείωσης μέσω ενός μικρού κυβικού αγωγού (via).

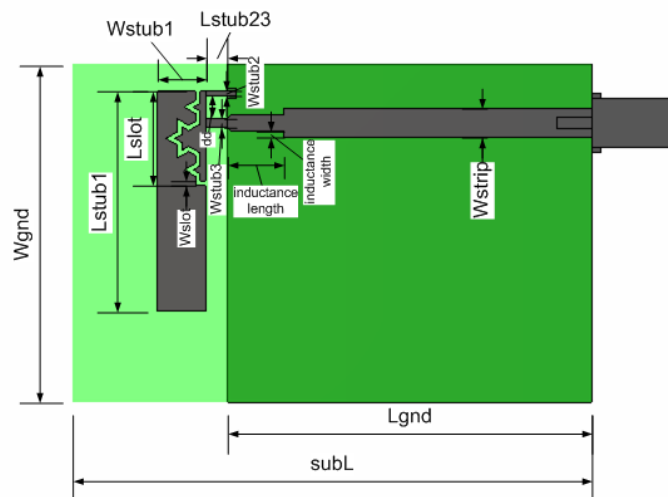
Ένα άλλο χαρακτηριστικό της σχεδίασης είναι το γεγονός ότι στο άκρο της κεραίας όπου ενώνεται η μικροταινία, το πλάτος της μειώνεται βαθμιαία (tapering), ώστε να καταλήξει στο στέλεχος τροφοδοσίας της κεραίας με πιο ομαλό τρόπο. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η απότομη μετάβαση του ρεύματος λόγω της διαφοράς πλάτους μεταξύ της μικροταινίας και της κεραίας που δημιουργούν απότομες γωνίες μετάβασης και έτσι να επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή. Αυτό φαίνεται καλύτερα στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4-4 Βαθμιαία μείωση πλάτους στο άκρο της μικροταινίας

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι κοινά για όλες τις κεραιές που θα παρουσιάσουμε σε αυτό το κεφάλαιο, γι' αυτό δε θα αναφερθούμε ξανά σε αυτά.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε (Εικόνα 4-5) το σχεδιασμό μαζί με τις διαστάσεις του μοντέλου συγκεκριμένα για την κεραιά με σχισμή τύπου Koch.



Εικόνα 4-5 Διαστάσεις της dual-band PIFA με σχισμή Koch

όπου

Lstrib1 : το μήκος του μεγάλου μονόπολου

Wstrib1 : το πλάτος του μεγάλου μονόπολου, το οποίο εξαρτάται από το ύψος της σχισμής. Αυτό σημαίνει ότι αν αυξηθεί το ύψος θα αυξηθεί ανάλογα και το πλάτος του μονόπολου. Το ύψος της σχισμής μεταβάλλεται με τη μεταβολή του μήκους της.

Lslot : το μήκος της σχισμής, που καθορίζει και το μήκος του μικρού μονόπολου. Ωστόσο αυτό το μήκος δεν ταυτίζεται με το συνολικό μήκος της σχισμής αν αυτή ξεδιπλωθεί στο επίπεδο.

Wslot : το πάχος της σχισμής

Lstub2 : το μήκος του βραχυκυκλωμένου στελέχους

Wstub2 : το πλάτος του βραχυκυκλωμένου στελέχους

Lstub3 : το μήκος του στελέχους τροφοδοσίας της κεραίας, που είναι ίσο με το Lstub2

Wstub3 : το πλάτος του στελέχους τροφοδοσίας

dd : η απόσταση μεταξύ του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλωμένου στελέχους της κεραίας

Wstrip : το πλάτος της μικροταινίας, το οποίο παραμένει σταθερό και είχε καθοριστεί, ώστε να υπάρχει προσαρμογή μεταξύ της μικροταινίας και του SMA τετραγωνικού συνδετήρα (Κεφάλαιο 2).

inductance_length : το μήκος του πιο στενού τμήματος της μικροταινίας

inductance_width : το πλάτος κατά το οποίο στενεύει η μικροταινία σε κάθε πλευρά της

Lgnd : το μήκος του επιπέδου γείωσης

Wgnd : το πλάτος του επιπέδου γείωσης, το οποίο ταυτίζεται και με το πλάτος του διηλεκτρικού υποστρώματος

subL : το συνολικό μήκος του διηλεκτρικού υποστρώματος, συμπεριλαμβάνεται και το μήκος του επιπέδου γείωσης.

Επίσης δύο διαστάσεις του μοντέλου που δε φαίνονται στην Εικόνα 4-5 και οι οποίες παραμένουν σταθερές είναι

H : το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος, το οποίο παραμένει σταθερό

t : το πάχος της επιμετάλλωσης της μικροταινίας, του μονόπολου και του φύλλου χαλκού του επιπέδου γείωσης.

Στη συνέχεια θα παραθέσουμε τον πίνακα με τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων του τελικού μοντέλου, που προέκυψαν μετά από τη μελέτη της κεραίας και που οδήγησαν στον επιθυμητό στόχο.

Παράμετρος	Μήκος (mm)
H	1.63
t	0.0356

Lstub1	24
Wstub1	5.29
Lslot	10.3
Wslot	0.5
Lstub2	2.4
Wstub2	0.45
Lstub3	2.4
Wstub3	1
dd	2.5
Wstrip	3.1
inductance	6
length	
inductance width	0.7
Lgnd	40
Wgnd	37
subL	57

Πίνακας 4-1 Τελικές τιμές παραμέτρων

4.2.1.2 Διαδικασία μελέτης της κεραίας και εύρεσης των καταλληλότερων παραμέτρων

Καταρχήν, θα πρέπει να προσδιορίσουμε το στόχο της συγκεκριμένης κεραίας, που είναι κοινός και για τις υπόλοιπες που θα αναφέρουμε σε αυτό το κεφάλαιο. Ο στόχος μας ήταν η λειτουργία της κεραίας στη ζώνη συχνοτήτων 2.5 GHz και 5.25 GHz, ικανοποιώντας ένα εύρος ζώνης μεγαλύτερο των 100 MHz σε κάθε μία μπάντα αντίστοιχα. Παράλληλα όμως θα έπρεπε να προσπαθήσουμε και για τη μείωση των διαστάσεων της, ώστε το ηλεκτρικό της μέγεθος να προσεγγίσει όσο περισσότερο την ηλεκτρικά μικρή κεραία.

Από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 4-1) είναι φανερό ότι η μελέτη της κεραίας εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, έχει δηλαδή αρκετούς βαθμούς ελευθερίας, αν εξαιρέσουμε το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος H και το πλάτος της μικροταινίας W_{strip} , που παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διαδικασία της μελέτης. Από αυτές τις παραμέτρους, άλλων η μεταβολή επηρεάζει περισσότερο και άλλων λιγότερο τη συμπεριφορά της κεραίας. Έτσι,

ακολουθήθηκε μία διαδικασία με την οποία προσπαθήσαμε να διαχωρίσουμε τις πιο κρίσιμες παραμέτρους από τις λιγότερο κρίσιμες.

Αρχικά επιλέξαμε η μελέτη μας να είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης. Γι' αυτό ξεκινήσαμε με διαστάσεις $L_{gnd} \times W_{gnd} = 40\text{mm} \times 37\text{mm}$, που είναι σχεδόν ίσες με $\lambda_0/3 \times \lambda_0/3$, όπου

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/sec}}{2.5 \text{ GHz}} = 120\text{mm}.$$

Στο τέλος, εξετάζεται και η επίπτωση της μεταβολής των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης στη συμπεριφορά της κεραίας, όπως στην απόδοση ή στο εύρος ζώνης της. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το επίπεδο γείωσης δε γίνεται να μειωθεί περισσότερο από ότι είναι το συνολικό πλάτος της κεραίας. Δηλαδή η ελάχιστη τιμή του μήκους του επιπέδου γείωσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το άθροισμα του πλάτους του μονόπολου της κεραίας και του μήκους του βραχυκυκλωμένου στελέχους, $L_{gnd} \geq W_{stub1} + L_{stub23}$.

Από τις πρώτες προσομοιώσεις παρατηρήσαμε ότι οι παράμετροι L_{stub1} και L_{slot} που αντιστοιχούν στα μήκη του μεγάλου και του μικρού μονόπολου επηρεάζουν σχεδόν αποκλειστικά την επίτευξη των δύο συντονισμών και η μεταβολή τους εξυπηρετεί στη μετακίνηση των συντονισμών. Συγκεκριμένα, η αύξησή τους οδηγεί στη μείωση των συντονισμών. Αντίθετα δε βοηθούν στη βελτίωση της προσαρμογής καθώς επηρεάζουν ελάχιστα την αντίσταση εισόδου.

Ομοίως, και η παράμετρος του πλάτους της σχισμής W_{slot} δεν επηρέαζε σημαντικά τη συμπεριφορά της κεραίας, έτσι αρχικά γινόταν επιλογή μίας λογικής τιμής στα 0.4mm, την οποία αφήναμε σταθερή. Μόνο στο τέλος της μελέτης τη μεταβάλαμε κατά +0.1/0.2 mm, και σε κάποιες περιπτώσεις βελτίωνε την προσαρμογή. Στη συνέχεια, μετά από μία παραμετρική σάρωση για την τιμή του πλάτους του μονόπολου W_{stub1} παρατηρήσαμε ότι και αυτή η παράμετρος επιδρά λίγο στη μεταβολή των συχνοτήτων συντονισμού και ελάχιστα στην αντίσταση εισόδου και άρα στη βελτίωση της προσαρμογής. Έτσι, απλά την προσαρμόσαμε σε μία τιμή βάσει του ύψους της σχισμής, ώστε η τελευταία να χωράει μέσα και οι κορυφές της να απέχουν από τα άκρα του μονόπολου κατά 1mm.

Αντίθετα, οι παράμετροι του μήκους και του πλάτους του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλωμένου στελέχους, L_{stub3} , W_{stub3} , L_{stub2} , W_{stub2} αντίστοιχα, καθώς και η μεταξύ τους απόσταση dd ήταν ιδιαίτερα κρίσιμες και σημαντικές για τη συμπεριφορά της κεραίας, τόσο ως προς τη μετακίνηση των συντονισμών, αλλά και ως προς την προσαρμογή της κεραίας. Για αυτές τις πέντε παραμέτρους γινόταν παραμετρική σάρωση σε ένα διάστημα τιμών, ώστε να βρεθεί η καλύτερη τιμή. Ωστόσο, η μελέτη δε γινόταν ταυτόχρονα για όλες τις παραμέτρους, αλλά με διαδοχική σειρά. Αυτό σημαίνει ότι κάθε φορά επιλεγόταν η καλύτερη τιμή για μία παράμετρο, πριν προχωρήσουμε στη μελέτη και παραμετρική σάρωση της επόμενης, έτσι ώστε να έχουμε συνεχή βελτίωση των χαρακτηριστικών της κεραίας μας. Αυτό βέβαια δεν συνεπαγόταν ότι και αργότερα δε μπορούσαμε να μεταβάλουμε περαιτέρω μία παράμετρο επειδή είχε ήδη μελετηθεί. Αντίθετα μάλιστα, για μερικές παραμέτρους γινόταν αρκετές φορές παραμετρική μελέτη, αφού η τιμή τους συνεχώς ανανεωνόταν με θετική επίδραση στα χαρακτηριστικά της κεραίας.

Συγκεκριμένα, επιλέξαμε η μελέτη μας να ξεκινήσει με την παράμετρο dd που ήταν ίσως η πιο κρίσιμη και δύσχρηστη παράμετρος στο μοντέλο μας. Τον όρο «δύσχρηστη» τον αναφέρουμε, διότι παρατηρήθηκε ότι αν κάναμε μία αρχική επιλογή για την τιμή της και στη συνέχεια προχωρούσαμε στη βελτίωση των υπολοίπων παραμέτρων, ουσιαστικά η τιμή της «κλείδωνε» και οποιαδήποτε περαιτέρω μεταβολή της δεν ήταν εφικτή καθώς επιδρούσε έντονα και αρνητικά στα χαρακτηριστικά της κεραίας. Αυτή η ιδιότητα της dd είχε το μειονέκτημα ότι έτσι και η αρχική της τιμή ήταν σχετικά μεγάλη, δε γινόταν να μειωθεί και έτσι οι διαστάσεις της κεραίας παρέμεναν αρκετά μεγάλες. Γι' αυτό συνήθως επιλέγαμε από την αρχή μία σχετικά μικρή τιμή.

Την παραπάνω διαδικασία μελέτης ακολουθήσαμε σε όλα τα μοντέλα.

4.2.1.3 Διακριτοποίηση (meshing)

Στο μοντέλο της dual-band PIFA με σχισμή Koch, όπως και στα υπόλοιπα μοντέλα με διαφορετικού τύπου σχισμή κρίθηκε αναγκαίο να ενισχυθεί τοπικά το πλέγμα διακριτοποίησης. Συγκεκριμένα, ενισχύθηκε το πλέγμα στο στέλεχος του μονόπολου, κατά μήκος και πλάτος της μικροταινίας, κατά μήκος του

σελέχους τροφοδοσίας, κατά μήκος του βραχυκυκλωμένου σελέχους, κατά το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος και κατά τη διατομή του διηλεκτρικού υλικού του τετραγωνικού SMA συνδετήρα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία αυτόματης προσαρμογής πλέγματος (adaptive meshing) και η σύγκλιση επιτεύχθηκε για adaptive meshing 20/20/50. Ο αριθμός των κελιών Yee ήταν 383.135. Το συγκεκριμένο πλέγμα διακριτοποίησης διατηρήθηκε για όλη τη μελέτη της κεραίας.

4.2.1.4 Άλλες ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση

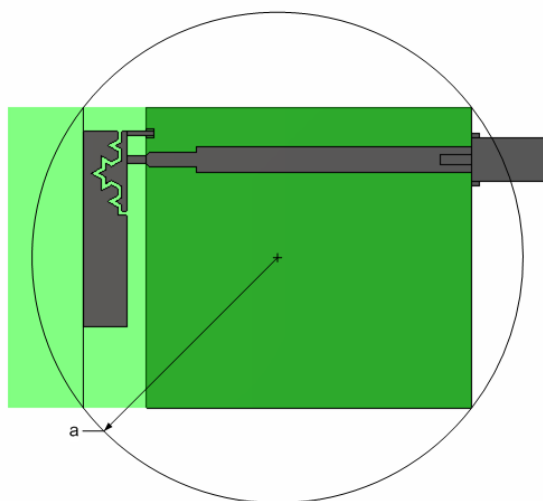
Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 0-7 GHz. Οι οριακές συνθήκες στο boundary box τέθηκαν open-add space, ώστε να προσομοιώνουν ελεύθερο χώρο διάδοσης για απόσταση $\lambda_0/8$ από το μοντέλο της κεραίας, όπου το λ_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος ελεύθερου χώρου για συχνότητα που αντιστοιχεί στο μέσο του διαστήματος προσομοίωσης. Τέλος ο χώρος τερματίστηκε σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες κατά Berenger με αριθμό στρωμάτων PML=4.

4.2.1.5 Καθορισμός ακτίνας a για τον υπολογισμό του μεγέθους ka

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους μας κατά τη μελέτη των κεραιών είναι η προσπάθεια σμίκρυνσης των διαστάσεών τους, ώστε όσο γίνεται να προσεγγίσουν το μέγεθος της ηλεκτρικά μικρής κεραίας. Για να μετρηθεί το ηλεκτρικό μέγεθος των κεραιών θα πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος, ώστε να υπολογιστεί το μέγεθος ka .

Όπως είχαμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 2, στην παράγραφο 2.1.1, στον τύπο των τυπωμένων κεραιών ανεστραμμένης F γεωμετρίας με σχισμή, το επίπεδο γείωσης ακτινοβολεί και αποτελεί μέρος της κεραίας. Έτσι, η σφαίρα θα πρέπει να περιβάλλει τόσο το μονόπολο, όσο και το επίπεδο γείωσης, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι θα πρέπει να περιβάλλει και όλο το διηλεκτρικό υπόστρωμα.

Βάσει αυτής της συνθήκης θα υπολογιστεί η ακτίνα a και άρα και το γινόμενο ka . Στην Εικόνα 4-6 φαίνεται ο ορισμός της ακτίνας a .



Εικόνα 4-6 Καθορισμός ακτίνας a της νοητής περιγεγραμμένης στην κεραία σφαίρας

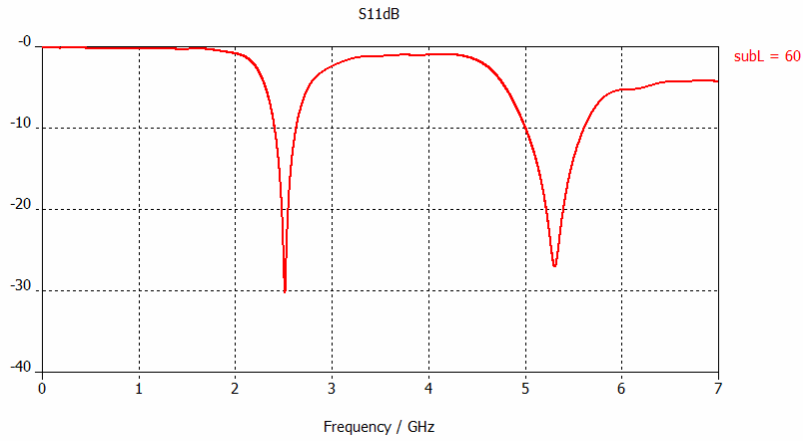
Παρατηρούμε ότι η σφαίρα εκτός από το μονόπολο και το επίπεδο γείωσης περιλαμβάνει και ένα μέρος του διηλεκτρικού υποστρώματος. Δηλαδή, η ακτίνα είναι λίγο μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή που θα μπορούσε να λάβει, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας. Ωστόσο, βάσει του παραπάνω σχήματος ο υπολογισμός της είναι αρκετά πιο εύκολος και συγκεκριμένα δίνεται από τον τύπο

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{W_{\text{gnd}}^2 + (W_{\text{stub1}} + L_{\text{stub23}} + L_{\text{gnd}})^2} \quad (4.1).$$

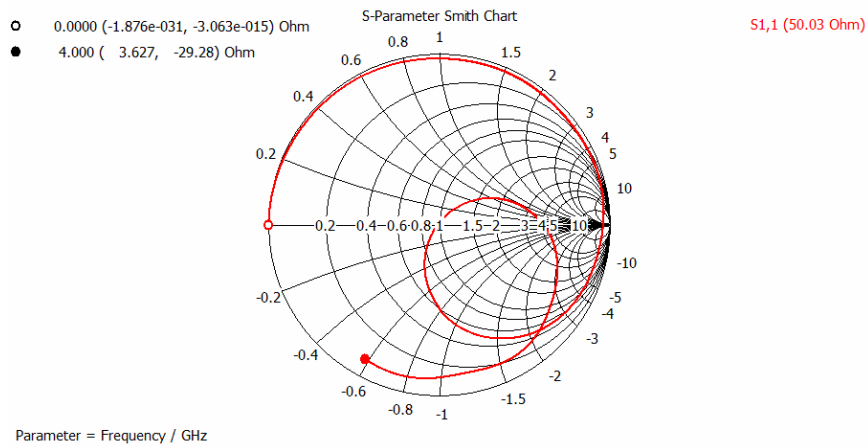
4.2.1.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε κάποια από τα σημαντικότερα γραφικά αποτελέσματα, τα οποία μας βοήθησαν στην κατανόηση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς της κεραίας. Εννοείται ότι τα τελικά αποτελέσματα έχουν εξαχθεί βάσει των τελικών τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, τα οποία είναι συγκεντρωμένα στον Πίνακα 4-1.

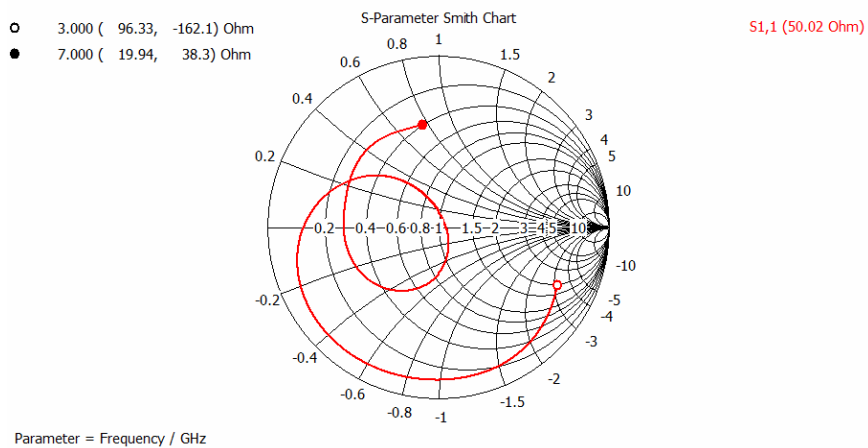
Αρχικά παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης, όπου οι συντονισμοί είναι στις συχνότητες 2.5 GHz και 5.3 GHz.



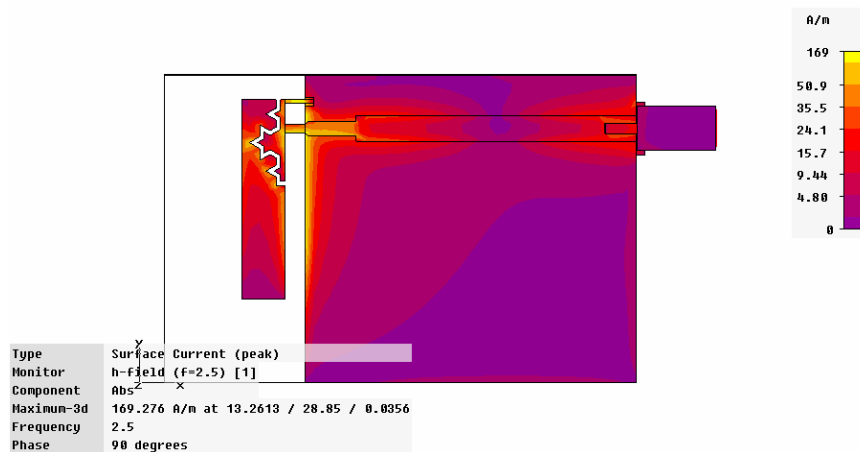
Σχήμα 4-1 Συντελεστής ανάκλασης της dual-band PIFA με σχισμή Koch γεωμετρίας



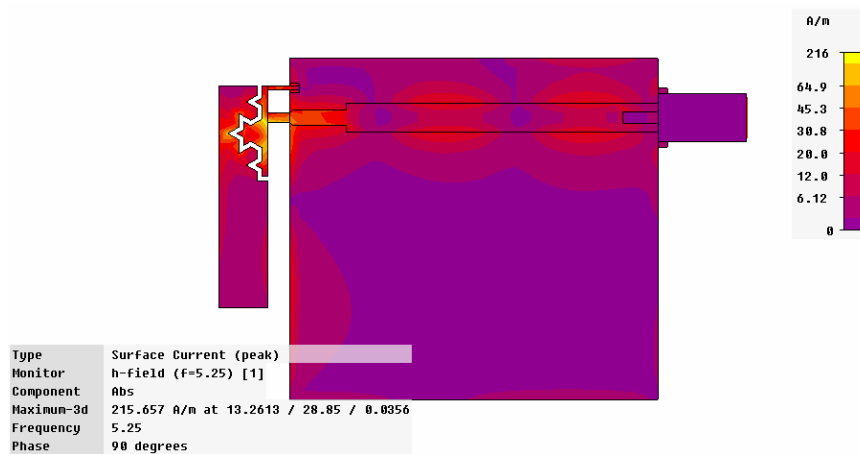
Σχήμα 4-2 Χάρτης Smith της dual-band PIFA με σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.5 GHz



Σχήμα 4-3 Χάρτης Smith της dual-band PIFA με σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 5.3 GHz



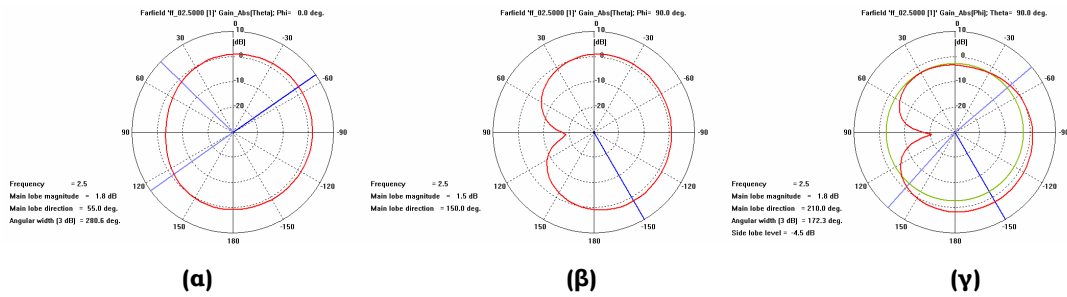
Σχήμα 4-4 Ρευματική κατανομή dual-band PIFA με σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.5 GHz



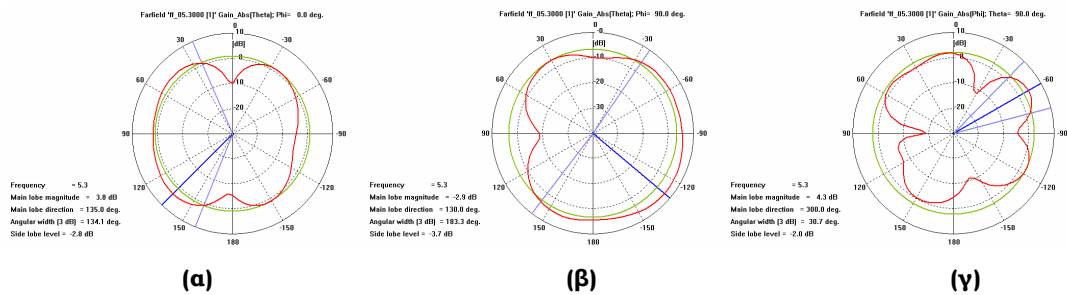
Σχήμα 4-5 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 5.25 GHz

Από το Σχήμα 4-4 είναι φανερό ότι το ρεύμα διατρέχει όλο το μήκος της κεραίας, ενώ αντίθετα στο Σχήμα 4-5 διατρέχει μόνο το μήκος της σχισμής. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι πράγματι ο πρώτος και ο δεύτερος συντονισμός καθορίζεται από το μήκος του μεγάλου μονόπολου L_{stub1} και το μήκος της σχισμής που καθορίζει το μήκος του μικρού μονόπολου L_{slot} αντίστοιχα.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως προς τα επίπεδα α) XZ, β) YZ και γ) XY αντίστοιχα.

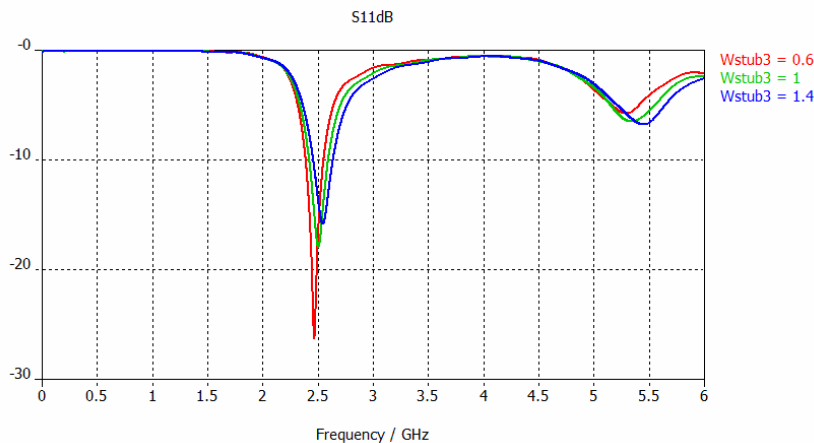


Σχήμα 4-6 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με ορισμή Koch στη συχνότητα 2.5 GHz



Σχήμα 4-7 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με ορισμή Koch στη συχνότητα 5.3 GHz

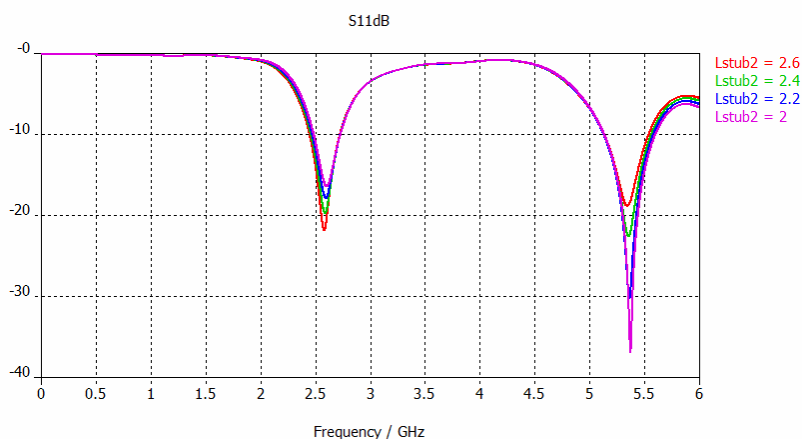
Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε μία σειρά από παραμετρικές μελέτες για διάφορες παραμέτρους που επηρέασαν σημαντικά τη συμπεριφορά της κεραίας.



Σχήμα 4-8 Μεταβολή του πλάτους του στελέχους τροφοδοσίας

Παρατηρούμε ότι η αύξηση του πλάτους του στελέχους τροφοδοσίας της κεραίας οδηγεί σε μετατόπιση των συχνοτήτων συντονισμού προς τα επάνω και πιο εμφανής είναι η επίδρασή του στη μετατόπιση της μεγαλύτερης συχνότητας συντονισμού. Επίσης, η μείωσή του επιδρά θετικά στη βελτίωση της

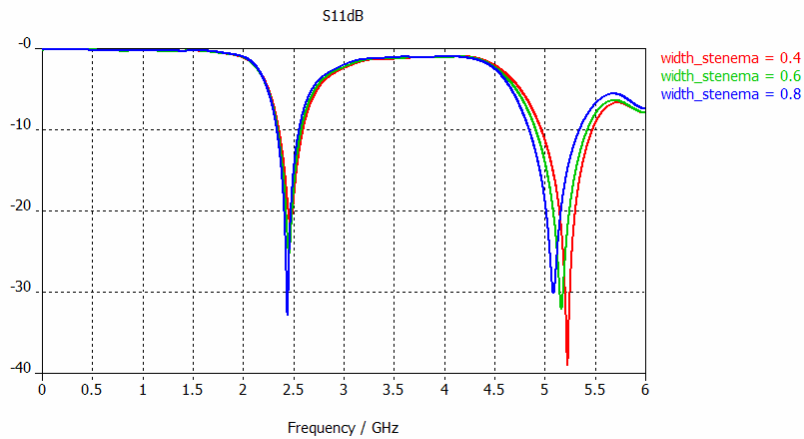
προσαρμογής της κεραίας στη συχνότητα των 2.5 GHz, αλλά αρνητικά στην αντίστοιχη των 5.3 GHz. Γι' αυτό επιλέξαμε μία ενδιάμεση τιμή, την $W_{stub3}=1\text{mm}$.



Σχήμα 4-9 Μεταβολή του μήκους του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλωμένου στελέχους

Μία άλλη παράμετρος που είχε ιδιαίτερη συμβολή στη βελτίωση της συμπεριφοράς της κεραίας ήταν το μήκος του βραχυκυκλωμένου στελέχους και του στελέχους τροφοδοσίας L_{stub2} , L_{stub3} , τα οποία είναι ίσα μεταξύ τους. Γίνεται εμφανές ότι η μεταβολή του είχε μεγάλη επιρροή στην προσαρμογή της κεραίας. Συγκεκριμένα, η μείωσή του επιδρούσε θετικά στην προσαρμογή της μεγαλύτερης συχνότητας, αλλά αρνητικά στην προσαρμογή της συχνότητας συντονισμού στα 2.5 GHz.

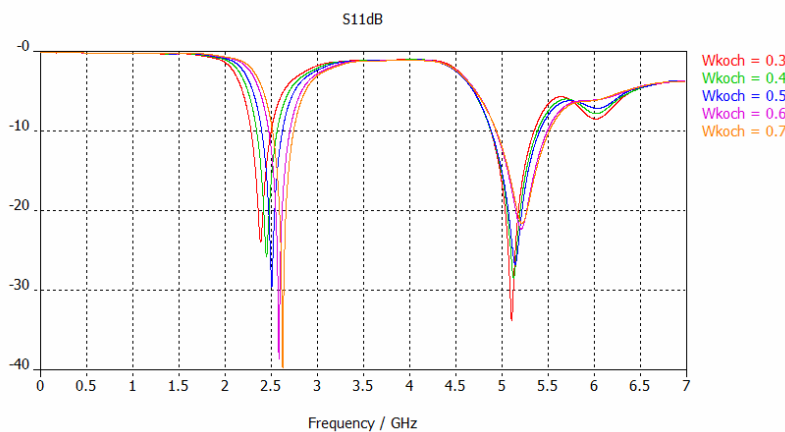
Το γεγονός ότι επηρέαζε αρνητικά τη συχνότητα συντονισμού στα 2.5 GHz οφείλεται στο ότι όσο μειώνεται το μήκος του στελέχους τροφοδοσίας, τόσο η κεραία πλησιάζει προς το επίπεδο γείωσης και έτσι η αντίσταση εισόδου της κεραίας γίνεται πιο χωρητική. Για να αντισταθμιστεί αυτό μπορούμε είτε να απομακρύνοντας το μονόπολο από το επίπεδο γείωσης είτε κάνοντας πιο στενό το πλάτος της μικροταινίας, όχι σε όλο της το μήκος, αλλά μόνο στο τμήμα κοντά στο άκρο της που τροφοδοτεί την κεραία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-5. Συγκεκριμένα, η παράμετρος **inductance_length** είναι το μήκος του πιο στενού τμήματος και η **inductance_width** είναι η τιμή κατά την οποία γίνεται πιο στενό το τμήμα σε κάθε πλευρά. Δηλαδή, η μικροταινία στενεύει κατά $2 \cdot \text{inductance_width}$.



Σχήμα 4-10 Μεταβολή του πλάτους inductance_width

Το πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου στα 2.5GHz μπορεί να προσεγγίσει ακόμη περισσότερο τα 50Ω και άρα η προσαρμογή της να βελτιωθεί, όσο περισσότερο στενεύει η μικροταινία. Αλλά επειδή έχει την αντίθετη επίδραση στην προσαρμογή στα 5.25 GHz επιλέξαμε μία ενδιάμεση τιμή στα 0.7mm.

Αντίστοιχη επιρροή στην κεραία είχε και η μεταβολή του πλάτους της σχισμής.



Σχήμα 4-11 Μεταβολή του πλάτους σχισμής

Τέλος, παρουσιάζουμε τον πίνακα με τις τιμές των κυριότερων χαρακτηριστικών στις δύο ζώνες συχνοτήτων, στα 2.5 GHz και στα 5.25 GHz.

	fres_1=2.53	fres_2=5.3
	GHz	GHz
f_center (GHz)	2.53	5.31
$\overline{e_{rad}}$	94.3%	96.6%
$\overline{e_{total}}$	86.7%	82.2%
e_{totalmax}	94.7%	97.4%
G_{max}	2 (dBi)	4.2 (dBi)
BW	231 MHz	598 MHz
FBW_v	9.13%	11.3%
ka	1.6	3.35
FoM	-3 (dB)	-5.6 (dB)

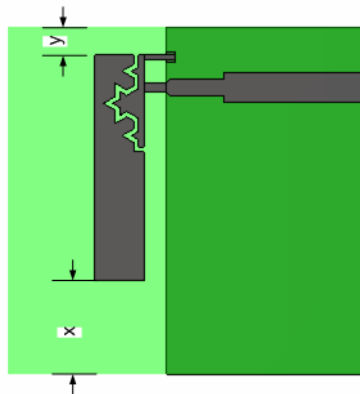
Πίνακας 4-2 Τιμές των κυριότερων χαρακτηριστικών της dual-band PIFA με σχισμή Koch

Παρατηρούμε ότι το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας είναι μεγάλο και σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίζει την ηλεκτρικά μικρή κεραία. Γι' αυτό και ο παράγοντας ποιότητας FoM ($\text{FoM} = \frac{10 \times \overline{e_{total}} \times \text{FBW}_v}{ka}$) λαμβάνει πολύ μικρή τιμή.

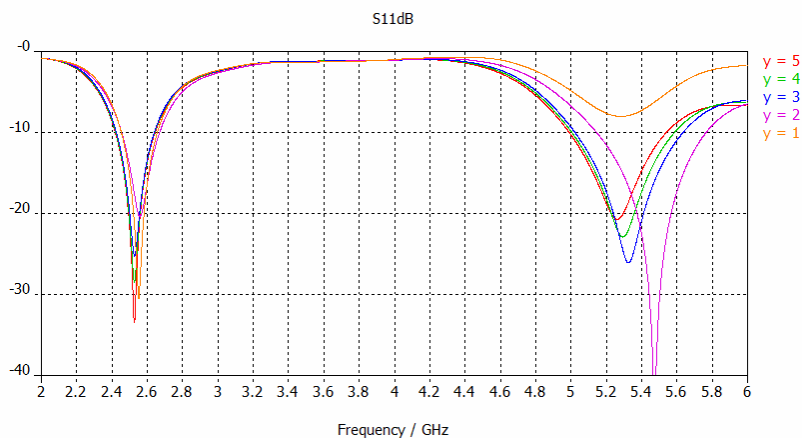
4.2.1.7 Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης

Το επίπεδο γείωσης αποτελεί ενεργό τμήμα της συνολικής διάταξης της κεραίας, καθώς στην επιφάνειά του επάγονται ισχυρά ρεύματα με αποτέλεσμα να ακτινοβολεί. Η επίδραση της μεταβολής των διαστάσεων του ήταν ένας τομέας άξιος προς διερεύνηση, τόσο ως προς την επίδρασή του στη συμπεριφορά της κεραίας, όσο και ως προς τα συμπεράσματα μας για το αν η κεραία μας θα μπορούσε να προσεγγίσει το μέγεθος της ηλεκτρικά μικρής κεραίας. Αυτό συμβαίνει διότι όπως έχουμε δει και παραπάνω στον καθορισμό της ακτίνας a , η σφαίρα περικλείει το επίπεδο γείωσης και άρα εξαρτάται από τις διαστάσεις του. Άρα, αν η κεραία διατηρούσε τη συμπεριφορά της χωρίς να αλλοιώνονταν τα χαρακτηριστικά της από τη σμίκρυνση του επιπέδου γείωσης, αυτό θα μας έδινε την ευκαιρία της δημιουργίας μίας κεραίας με μικρότερο ηλεκτρικό μέγεθος και άρα πιο κοντά σε μία ηλεκτρικά μικρή κεραία.

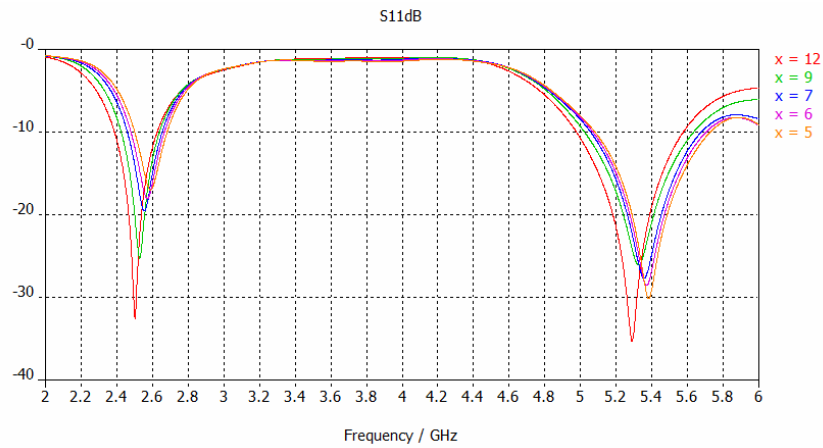
Αρχικά έγινε μεταβολή του ω προς το πλάτος. Θεωρήσαμε το πλάτος του επιπέδου γείωσης σαν άθροισμα του μήκους του μονόπολου, του αριστερού ως προς το μονόπολο, τμήματος του υποστρώματος x καθώς και του αντίστοιχου δεξιού τμήματος y , δηλαδή $W_{gnd} = x + L_{stub1} + y$. Το μήκος του μονόπολου L_{stub1} παρέμενε σταθερό και απλά μεταβάλαμε πρώτα το πλάτος της δεξιάς πλευράς y , και στη συνέχεια της αριστερής πλευράς x , του υποστρώματος και άρα και του επιπέδου γείωσης. Οι παράμετροι x και y φαίνονται καλύτερα στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4-12 Παράμετροι x και y

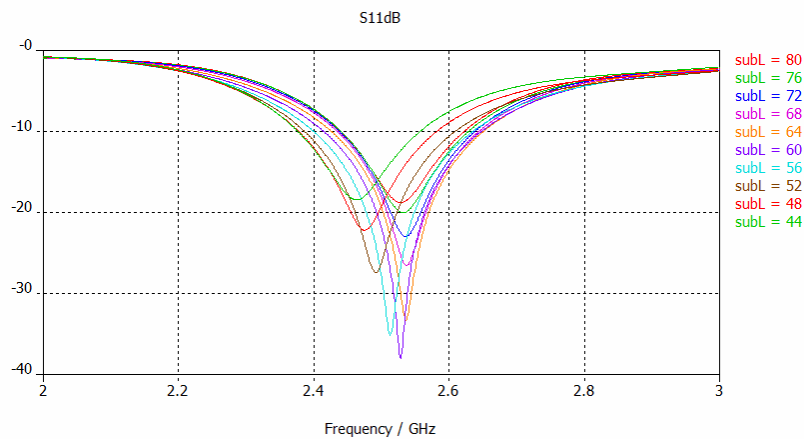


Σχήμα 4-13 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους του επιπέδου γείωσης y

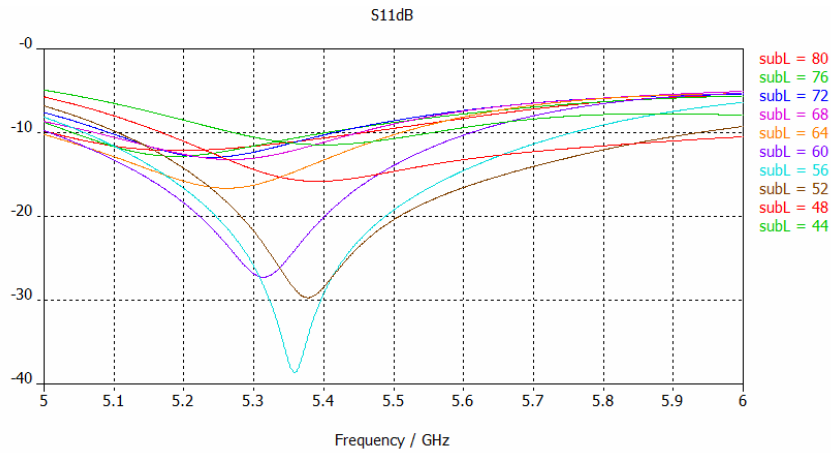


Σχήμα 4-14 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους του επιπέδου γείωσης x

Στη συνέχεια, αφού επιλέξαμε τις βέλτιστες τιμές, στην προκειμένη περίπτωση επιλέξαμε $x=10\text{mm}$ και $y=3\text{mm}$, προχωρήσαμε στη μεταβολή του μήκους του επιπέδου γείωσης, μέχρι ένα οριακό σημείο, διότι δεν μπορεί να γίνει μικρότερο από το συνολικό πλάτος της κεραίας. Πρέπει να ισχύει $L_{\text{gnd}} \geq W\text{stub}_1 + L\text{stub}_{23}$.



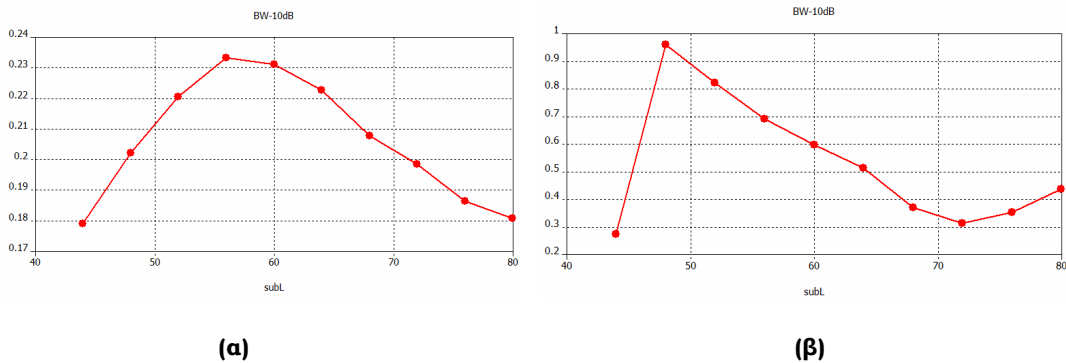
Σχήμα 4-15 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του μήκους του επιπέδου γείωσης στη ζώνη 2-3 GHz



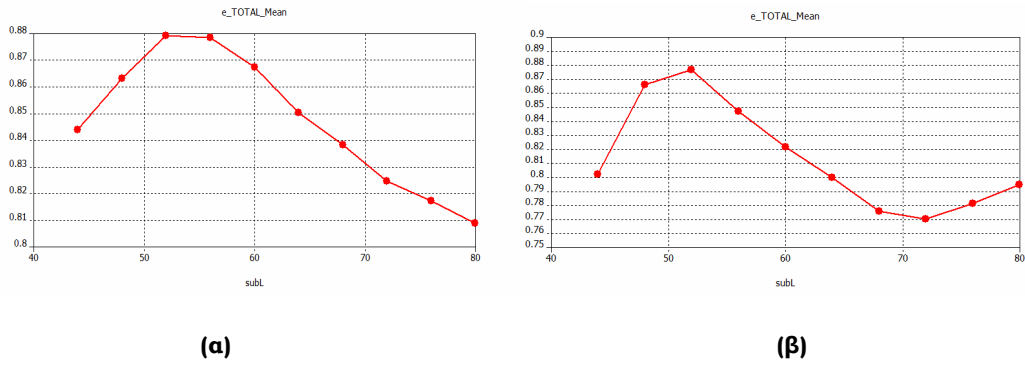
Σχήμα 4-16 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του μήκους του επιπέδου γείωσης στη ζώνη 5-6 GHz

Παρατηρούμε ότι για πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές τιμές του επιπέδου γείωσης υπάρχει χειροτέρευση της προσαρμογής της κεραίας. Να σημειωθεί ότι ισχύει $L_{gnd} = subL - 20$.

Τέλος, θα παρουσιαστούν και κάποια διαγράμματα με τη μεταβολή κάποιων μεγεθών της κεραίας συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους και του μήκους του επιπέδου γείωσης.



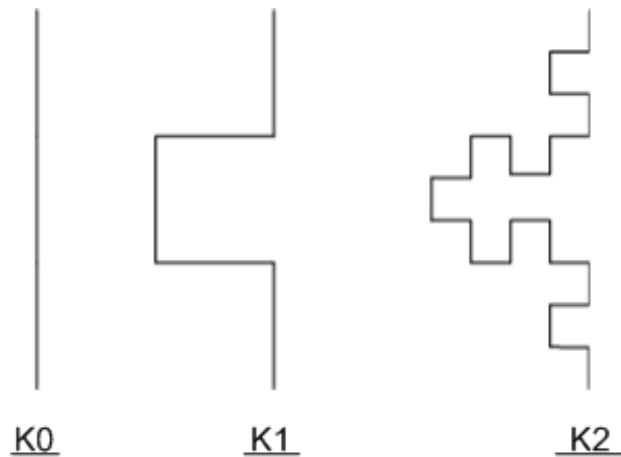
Σχήμα 4-17 Διάγραμμα του εύρους ζώνης συναρτήσει της μεταβολής του επιπέδου γείωσης ($L_{gnd} = subL - 20$) για α) 2-3 GHz και β) 5-6GHz



Σχήμα 4-18 Διάγραμμα του συνολικής απόδοσης της κεραίας συναρτήσει της μεταβολής του επιπέδου γείωσης ($L_{gnd}=subL-20$) για α) 2-3 GHz και β) 5-6 GHz

4.2.2 Dual-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Η επόμενη προς μελέτη κεραία ήταν και πάλι διζωνική ανεστραμμένης F γεωμετρίας, με διαφορά στην τοπολογία της σχισμής. Η σχισμή τύπου Koch αντικαταστάθηκε με μία νέα σχισμή, τη σχισμή γενικευμένου τύπου Koch. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι το μεσαίο από τα τρία μέρη του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος αντικαθίσταται από τρία τμήματα ίσα ως προς τα αρχικά, έτσι ώστε να σχηματίζουν ένα Π, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

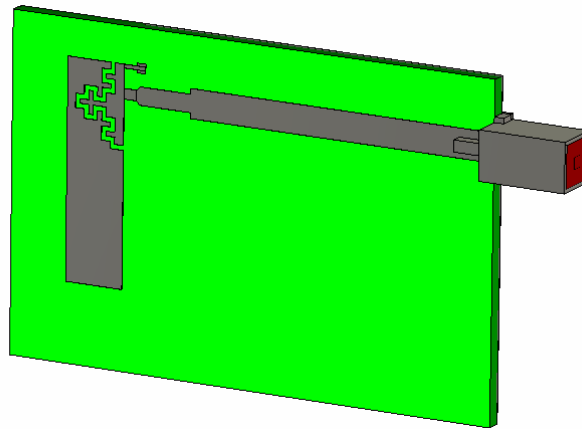


Εικόνα 4-7 Οι δύο πρώτες επαναλήψεις της γενικευμένης Koch δομής

Η παραπάνω δομή είχε περισσότερες απότομες μεταβολές, ενώ και οι αποστάσεις μεταξύ των επιμέρους τμημάτων ήταν μικρότερες. Ωστόσο με τη μελέτη της επιδιώξαμε τη μείωση των διαστάσεων της κεραίας, έτσι ώστε να επιτευχθεί και μείωση του ηλεκτρικού της μεγέθους.

4.2.2.1 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου

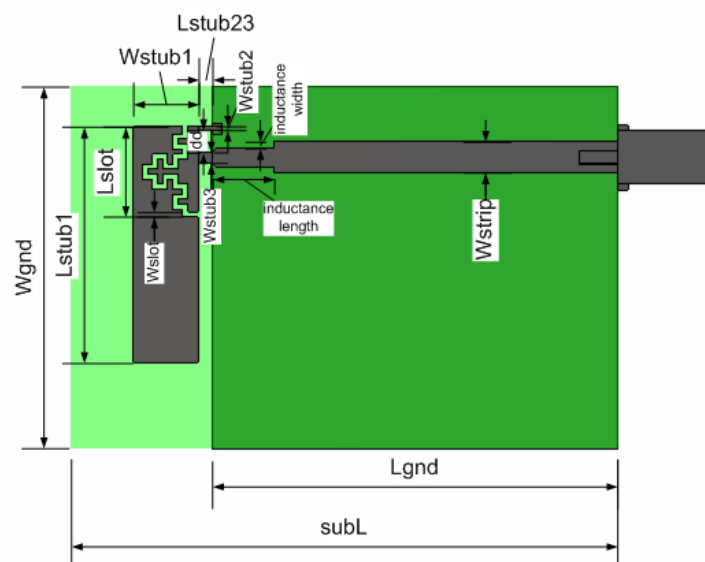
Το μοντέλο της κεραίας παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4-8 Μοντέλο dual-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Και σε αυτή την κεραία το διηλεκτρικό υλικό του υποστρώματος ήταν το TRF-45 της Taconic με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.38$ και απώλειες που εκφράζονται μέσω του μεγέθους εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta = 0.00284$. Και πάλι η τροφοδοσία της κεραίας γινόταν μέσω μικροταινίας, η οποία τροφοδοτούνταν από SMA τετραγωνικό συνδετήρα.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο με τις διαστάσεις.



Εικόνα 4-9 Διαστάσεις της dual-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής.

Παράμετρος	Μήκος (mm)
H	1.63
t	0.0356
Lstub1	23.3
Wstub1	6.35
Lslot	8.9
Wslot	0.5
Lstub2	1.4
Wstub2	0.4
Lstub3	1.4
Wstub3	1.1
dd	2.1
Wstrip	3.1
inductance length	6
inductance width	0.6
Lgnd	40
Wgnd	35.8
subL	54

Πίνακας 4-3 Τελικές τιμές των παραμέτρων της dual-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Παρατηρείται ότι και σε αυτή την κεραία, είχαμε τους ίδιους βαθμούς ελευθερίας κατά τη μελέτη της κεραίας. Και σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία που ακολουθήσαμε για τη διεξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων ήταν όμοια με την προηγούμενη κεραία, καθώς οι κρίσιμες παράμετροι ήταν και πάλι οι ίδιες.

4.2.2.2 Διακριτοποίηση (meshing)

Στο μοντέλο της dual-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch ενισχύθηκε τοπικά το πλέγμα διακριτοποίησης στα τμήματα κατά μήκος και πλάτος της μικροταινίας, κατά μήκος του στελέχους τροφοδοσίας, κατά μήκος του βραχυκυκλωμένου στελέχους, κατά το ύψος του διηλεκτρικού

υποστρώματος και κατά τη διατομή του διηλεκτρικού υλικού του τετραγωνικού SMA συνδετήρα. Δηλαδή, στα σημεία όπου η ρευματική κατανομή ήταν πιο έντονη και βέβαια στα σημεία κατά μήκος της ομοιομορφίας, όπου οι μεταβολές είναι απότομες.

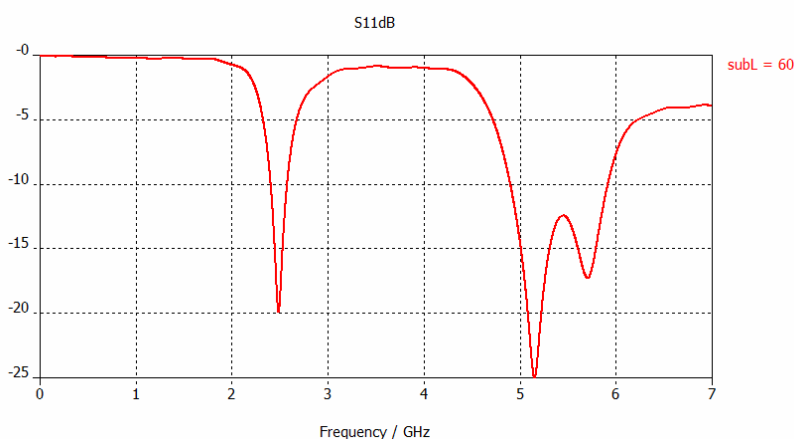
Μετά από την πραγματοποίηση αυτόματης προσαρμογής πλέγματος (adaptive meshing), η σύγκλιση επιτεύχθηκε για adaptive meshing 20/20/50. Ο αριθμός των κελιών Yee ήταν 369.075. Το συγκεκριμένο πλέγμα διακριτοποίησης διατηρήθηκε για όλη τη μελέτη της κεραίας.

4.2.2.3 Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 0-7 GHz. Οι οριακές συνθήκες στο boundary box τέθηκαν open-add space, και η προσομοίωση για τον ελεύθερο χώρο διάδοσης να γίνεται για απόσταση $\lambda_0/8$ από το μοντέλο της κεραίας, όπου το λ_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος ελεύθερου χώρου για συχνότητα που αντιστοιχεί στο μέσο του διαστήματος προσομοίωσης. Τέλος ο χώρος τερματίστηκε σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες κατά Berenger με αριθμό στρωμάτων PML=4.

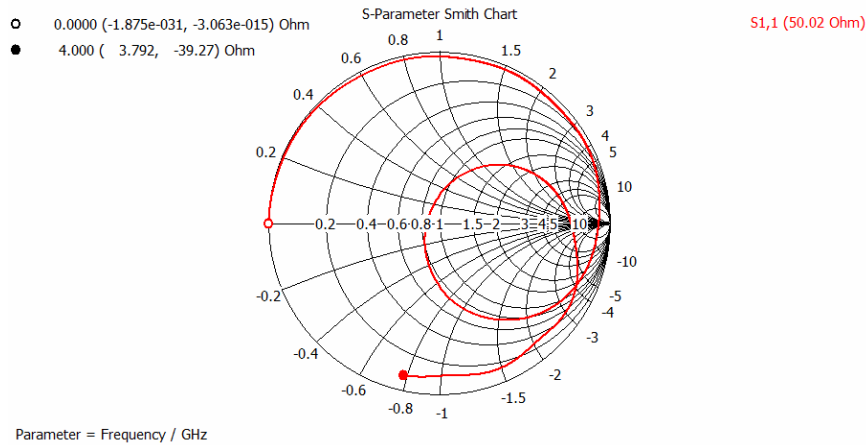
4.2.2.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης.

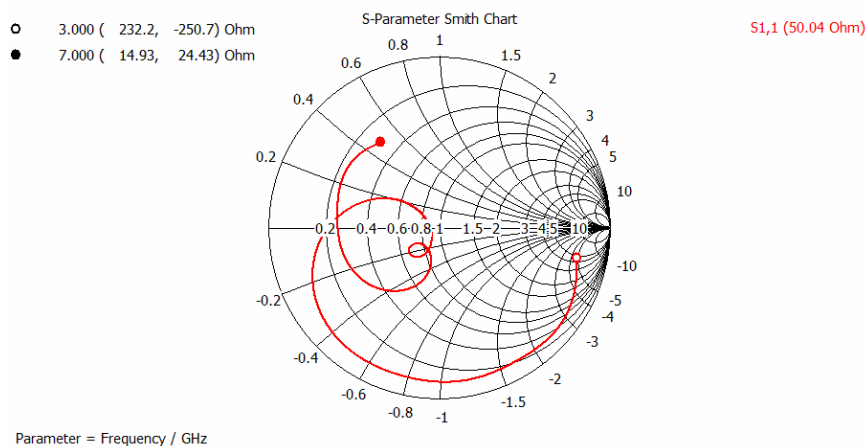


Σχήμα 4-19 Συντελεστής ανάκλασης της dual-band PIFA με γενικευμένου τύπου ομοιομορφίας Koch.

Παρατηρούμε ότι η κεραία συντονίζει στα 2.5 GHz, στα 5.14 GHz και 5.71 GHz, αλλά αυτό που είναι πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι καλύπτει όλη τη ζώνη συχνοτήτων 5-6 GHz. Δηλαδή, μεταβάλλοντας απλά και μόνο τη γεωμετρία της σχισμής καταφέραμε από την ύπαρξη ενός συντονισμού στη ζώνη 5-6 GHz να καλυφθεί όλη η ζώνη.

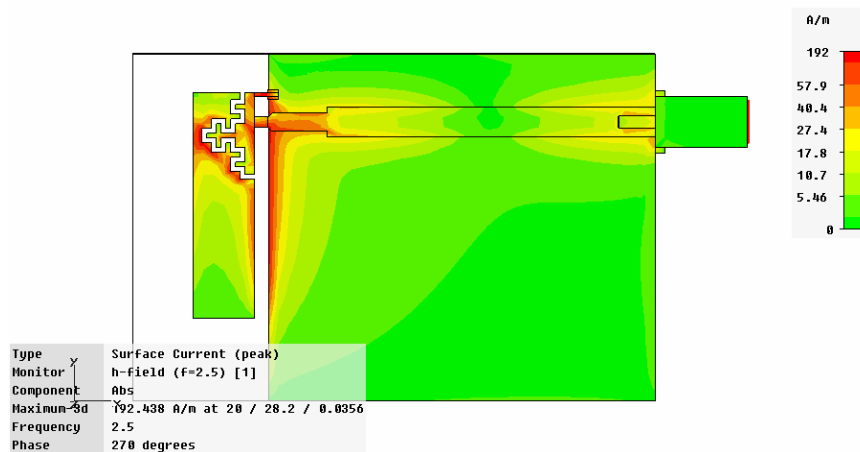


Σχήμα 4-20 Χάρτης Smith της dual-band PIFA με γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.5 GHz

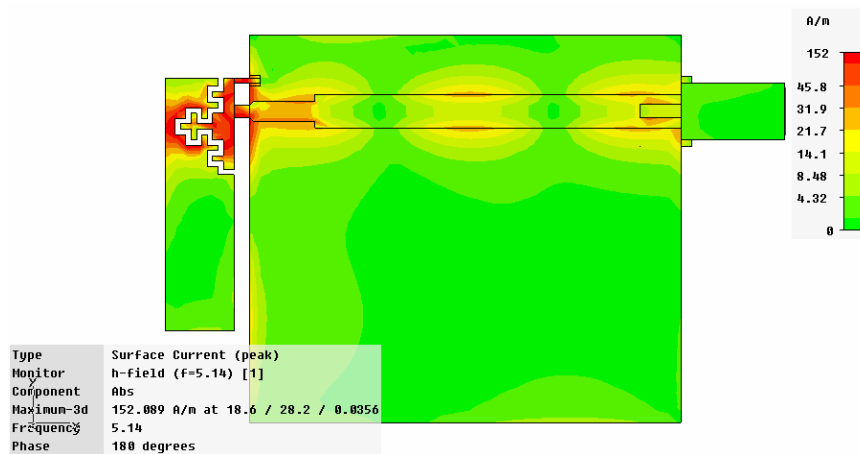


Σχήμα 4-21 Χάρτης Smith της dual-band PIFA με γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη ζώνη συχνοτήτων 5-6 GHz

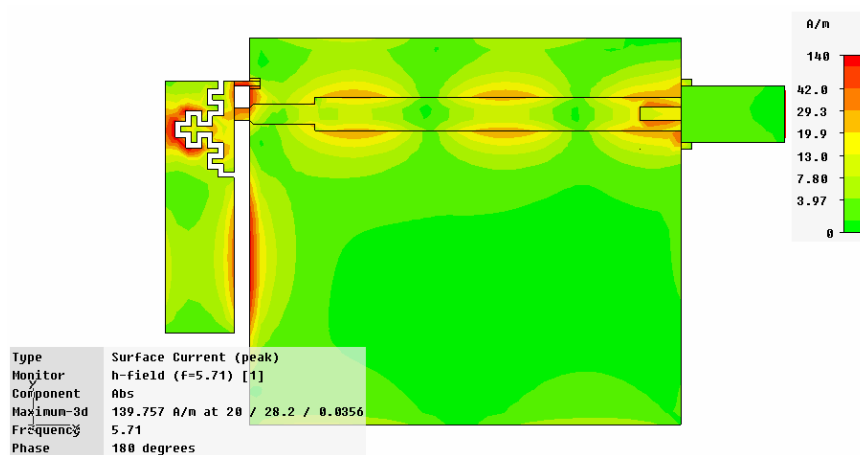
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ρευματικές κατανομές στις δύο ζώνες συχνοτήτων.



Σχήμα 4-22 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.5 GHz



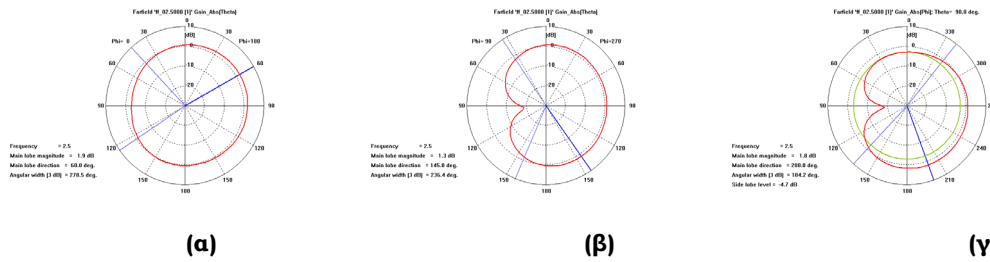
Σχήμα 4-23 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 5.14 GHz



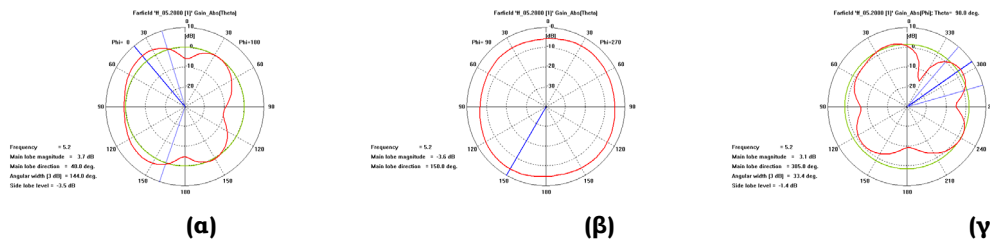
Σχήμα 4-24 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 5.71 GHz

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα ακολουθεί τη σχισμή και εκμεταλλεύεται πλήρως τη διαδρομή των επιμέρους τμημάτων.

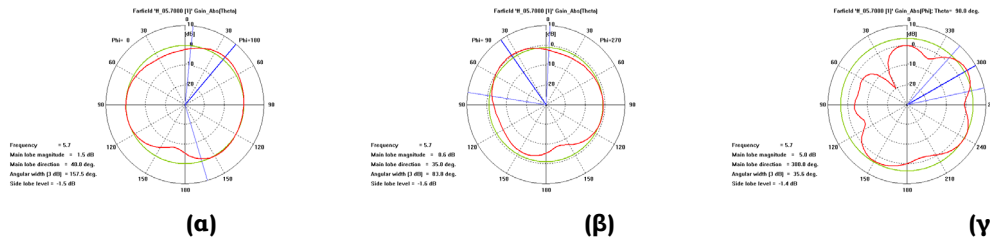
Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως προς το κέρδος στα επίπεδα XZ, YZ και XY.



Σχήμα 4-25 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με γενικευμένη σχισμή Koch στη συχνότητα 2.5 GHz

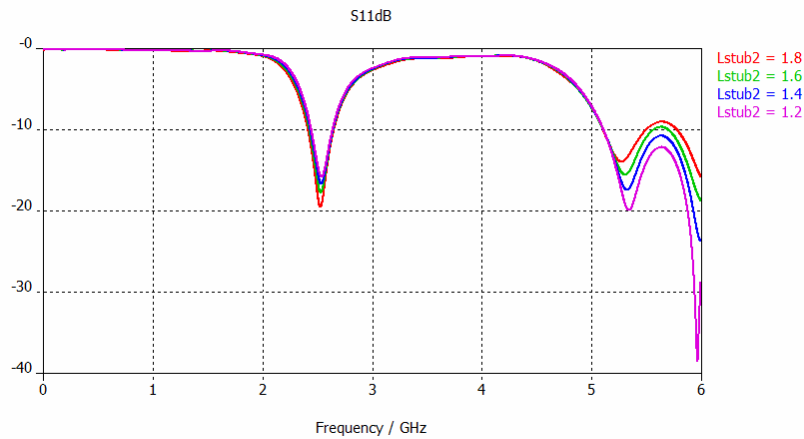


Σχήμα 4-26 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με γενικευμένη σχισμή Koch στη συχνότητα 5.14 GHz



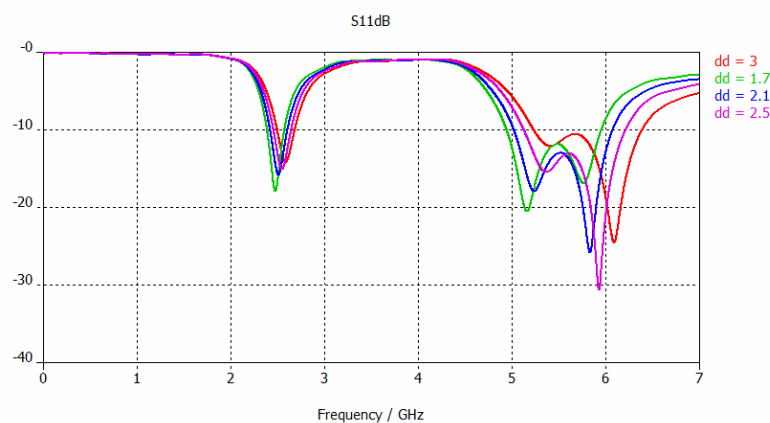
Σχήμα 4-27 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με γενικευμένη σχισμή Koch στη συχνότητα 5.71 GHz

Πριν παραθέσουμε τον πίνακα με τα τελικά αποτελέσματα, θα παρουσιάσουμε μία σειρά παραμετρικών μεταβολών για κάποιες από τις παραμέτρους που είχαν κύριο ρόλο στη συμπεριφορά της κεραίας.



Σχήμα 4-28 Μεταβολή του μήκους του βραχυκυκλωμένου στελέχους και το στελέχους τροφοδοσίας

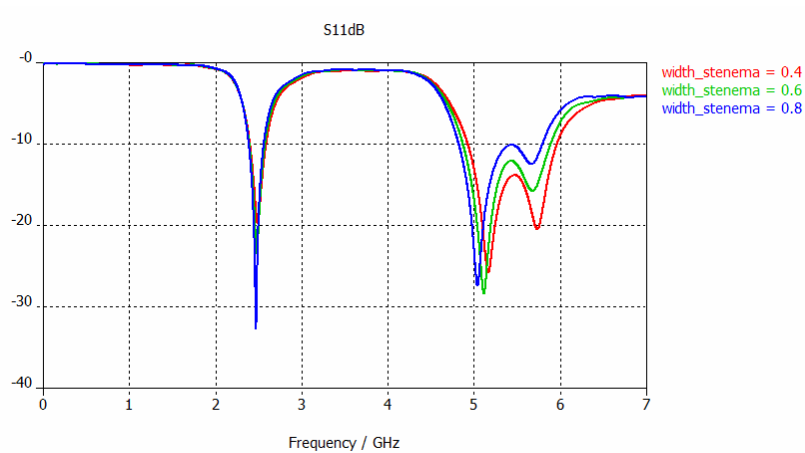
Παρατηρούμε ότι η μείωση του μήκους των στελεχών τροφοδοσίας και βραχυκυκλώματος οδηγεί στην εμφάνιση και του δεύτερου συντονισμού εντός της ζώνης 5-6 GHz, ενώ βελτιώνει την προσαρμογή της κεραίας σε αυτή τη ζώνη. Επιλέγουμε την τιμή $L_{stub2,3}=1.4\text{mm}$, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ισορροπία στους δύο συντονισμούς της ζώνης 5-6 GHz και διότι οδηγεί σε καλύτερη προσαρμογή στη συχνότητα 2.5 GHz.



Σχήμα 4-29 Μεταβολή της απόστασης μεταξύ του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλώματος

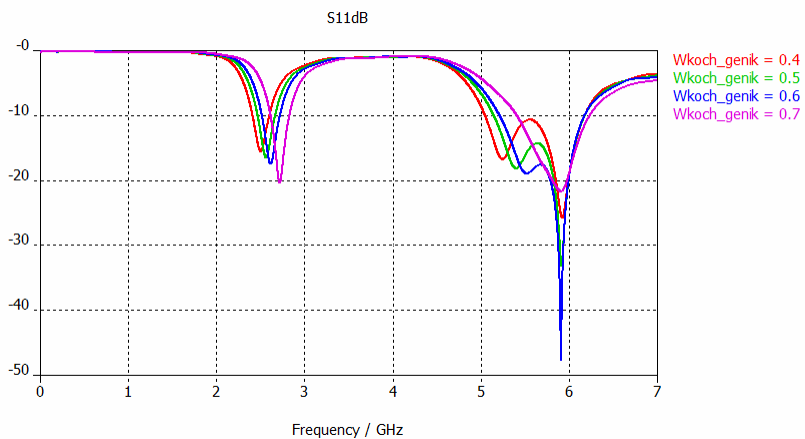
Καταρχήν θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η απόσταση μεταξύ του βραχυκυκλωμένου στελέχους και του στελέχους τροφοδοσίας δε θα πρέπει να είναι μικρότερη από 1.5mm. Με τη μεταβολή της παρατηρούμε ότι αύξηση της οδηγεί στη μετακίνηση των συχνοτήτων συντονισμού προς τα επάνω, ενώ επιδρά αρνητικά στην προσαρμογή της κεραίας τόσο στη συχνότητα 2.5 GHz όσο και στη μικρή συχνότητα συντονισμού στη ζώνη 5-6 GHz. Επιλέξαμε την τιμή 2.1

mm με την οποία έχει επιτευχθεί πολύ καλή προσαρμογή και στις δύο ζώνες συχνοτήτων καθώς και κάλυψη ολόκληρης της ζώνης 5-6 GHz.



Σχήμα 4-30 Μεταβολή του πλάτους στενέματος της μικροταινίας

Με την εκλέπτυνση του τμήματος της μικροταινίας προς το άκρο τροφοδοσίας της κεραίας επιτεύχθηκε αύξηση του πραγματικού μέρους της αντίστασης εισόδου προσεγγίζοντας τα 50Ω και βελτιώνοντας την προσαρμογή της κεραίας. Η τιμή εκλέπτυνσης 0.6mm σε κάθε πλευρά της θεωρήθηκε η πιο κατάλληλη.



Σχήμα 4-31 Μεταβολή του πλάτους της σχισμής

Παρατηρείται ότι αν αυξηθεί λίγο το πλάτος της σχισμής βοηθά το ρεύμα να ακολουθήσει καλύτερα τη διαδρομή της σχισμής. Επιλέχθηκε η τιμή 0.5mm.

Τέλος, παραθέτουμε τον πίνακα των τελικών αποτελεσμάτων.

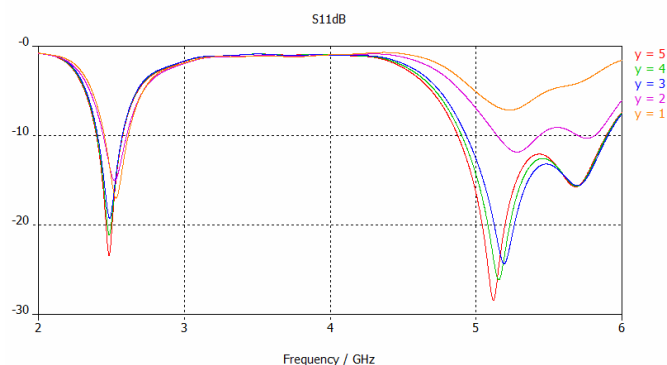
	fres_1=2.5 GHz	Ζώνη συχνοτήτων 5- 6GHz
f_center (GHz)	2.5	5.41
$\overline{e_{rad}}$	93.46%	96.76%
$\overline{e_{total}}$	82.9%	86.13%
e_{totalmax}	92.1%	97.0%
G_{max}	2 (dBi)	4.3 (dBi)
BW	182 MHz	1 GHz
FBW_v	7.3%	18.5%
ka	1.56	3.38
FoM	-4.1 (dB)	-3.3 (dB)

Πίνακας 4-4 Τελικά αποτελέσματα

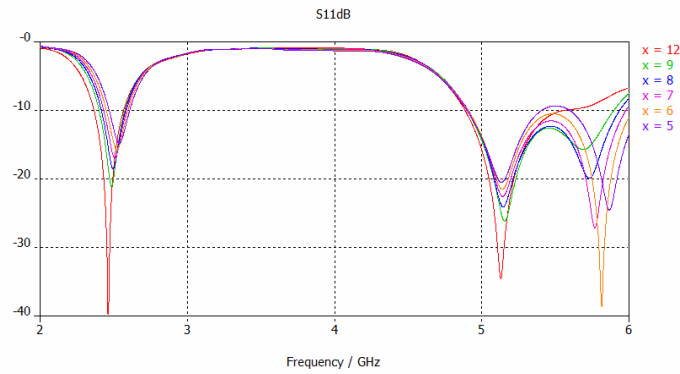
Η απόδοση ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα καλή, αλλά το αξιοσημείωτο είναι η κάλυψη της ζώνης 5-6 GHz. Ο παράγοντας ποιότητας είναι πολύ μικρός λόγω του μεγάλου ηλεκτρικού μεγέθους ka.

4.2.2.5 Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης

Η μελέτη έγινε με αντίστοιχο τρόπο όπως και στην προηγούμενη κεραία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα.

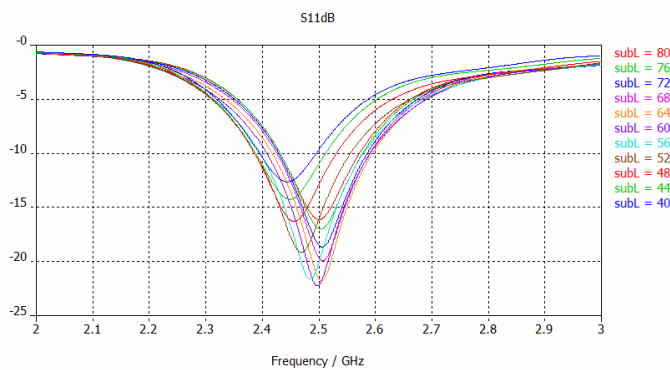


Σχήμα 4-32 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους του επιπέδου γείωσης γ

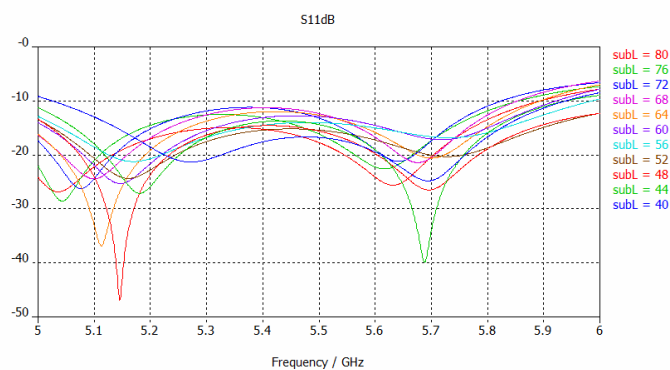


Σχήμα 4-33 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους του επιπέδου γείωσης x

Στη συνέχεια, αφού επιλέξαμε τις βέλτιστες τιμές, στην προκειμένη περίπτωση επιλέξαμε $x=8.5\text{mm}$ και $y=4\text{mm}$, προχωρήσαμε στη μεταβολή του μήκους του επιπέδου γείωσης.



Σχήμα 4-34 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του μήκους του επιπέδου γείωσης στη ζώνη 2-3 GHz

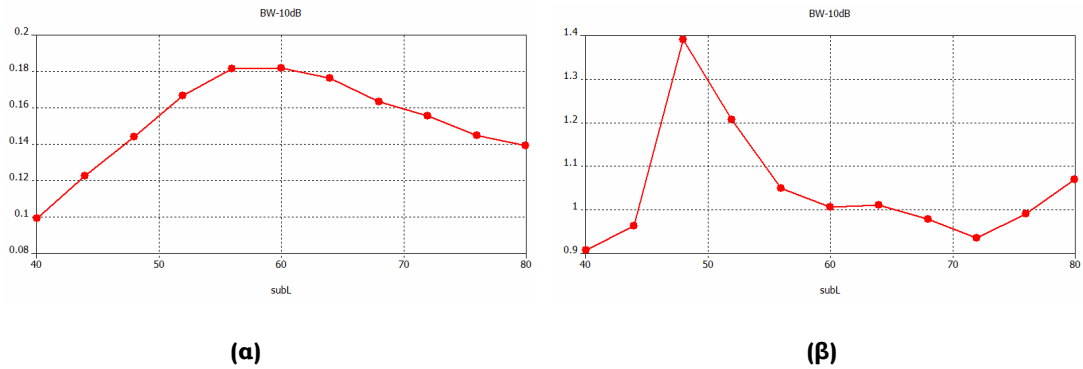


Σχήμα 4-35 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του μήκους του επιπέδου γείωσης στη ζώνη 5-6 GHz

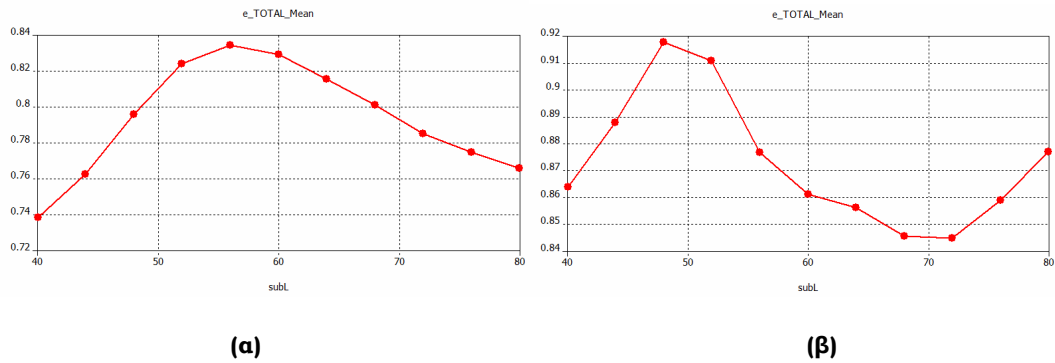
Να σημειωθεί ότι ισχύει $L_{gnd} = \text{sub}L - 20$. Παρατηρούμε για τη ζώνη συχνοτήτων 2-3 GHz ότι πολύ καλά αποτελέσματα δίνουν οι τιμές $L_{gnd}=28-40$

mm, ενώ για τη ζώνη 5-6 GHz οι τιμές $L_{gnd}=24-32\text{mm}$. Παρατηρούμε ότι οι τιμές ταυτίζονται για τις δύο ζώνες συχνοτήτων.

Τέλος, θα παρουσιαστούν και κάποια διαγράμματα με τη μεταβολή κάποιων μεγεθών της κεραίας συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους και του μήκους του επιπέδου γείωσης.



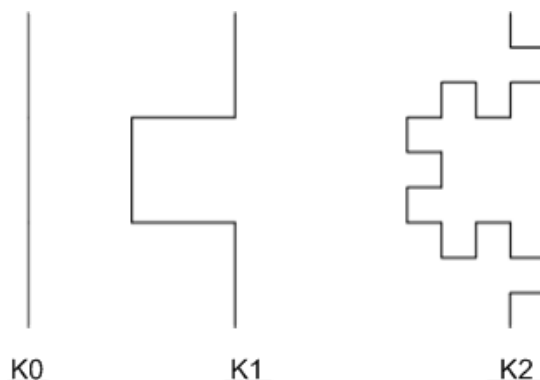
Σχήμα 4-36 Διάγραμμα του εύρους ζώνης συναρτήσει της μεταβολής του επιπέδου γείωσης ($L_{gnd}=\text{sub}L-20$) για α) 2-3 GHz και β) 5-6GHz



Σχήμα 4-37 Διάγραμμα του συνολικής απόδοσης της κεραίας συναρτήσει της μεταβολής του επιπέδου γείωσης ($L_{gnd}=\text{sub}L-20$) για α) 2-3 GHz και β) 5-6 GHz

4.2.3 Dual-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Στη συνέχεια επιλέξαμε να μελετήσουμε τον ίδιο τύπο σχισμής, αλλά τη δυαδική της μορφή.

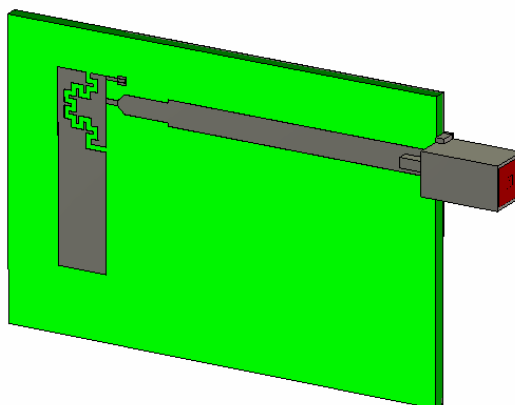


Εικόνα 4-10 Οι δύο πρώτες επαναλήψεις της δυαδικής γενικευμένης Koch δομής

Η παραπάνω δομή έχει το ίδιο συνολικό μήκος με τη γενικευμένη Koch δομή, αλλά είναι πιο ομοιόμορφη ως προς το πλάτος, δηλαδή δεν είναι τόσο ψηλή. Αυτή η ιδιότητα ίσως μας διευκόλυνε στη μείωση των διαστάσεών της.

4.2.3.1 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου

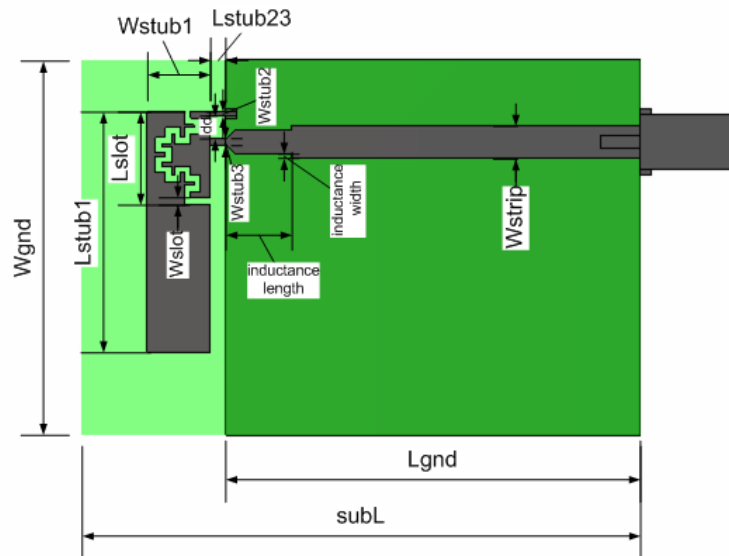
Το μοντέλο της κεραίας παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4-11 Μοντέλο dual-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Και σε αυτή την κεραία το διηλεκτρικό υλικό του υποστρώματος ήταν το TRF-45 της Taconic με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.38$ και απώλειες που εκφράζονται μέσω του μεγέθους εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta = 0.00284$. Και πάλι η τροφοδοσία της κεραίας γινόταν μέσω μικροταινίας, η οποία τροφοδοτούνταν από SMA τετραγωνικό συνδετήρα.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο με τις διαστάσεις.



Εικόνα 4-12 Διαστάσεις της dual-band PIFA με διαδικτική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής.

Παράμετρος	Μήκος (mm)
H	1.63
t	0.0356
Lstub1	23.2
Wstub1	6.1
Lslot	8.3
Wslot	0.6
Lstub2	1.5
Wstub2	0.4
Lstub3	1.5
Wstub3	0.6

dd	2.2
Wstrip	3.1
inductance	6
length	
inductance width	0.4
Lgnd	40
Wgnd	36.2
subL	54

Πίνακας 4-5 Τελικές τιμές των παραμέτρων της dual-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Παρατηρείται ότι και σε αυτή την κεραία, είχαμε τους ίδιους βαθμούς ελευθερίας κατά τη μελέτη της κεραίας. Και σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία που ακολουθήσαμε για τη διεξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων ήταν η ίδια.

Επίσης, παρατηρούμε ότι οι τελικές διαστάσεις της κεραίας είναι σχεδόν ίδιες με τις αντίστοιχες της dual-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch.

4.2.3.2 Διακριτοποίηση (meshing)

Και σε αυτό το μοντέλο κεραίας ενισχύθηκε τοπικά το πλέγμα διακριτοποίησης στα τμήματα κατά μήκος και πλάτος της μικροταινίας, κατά μήκος του στελέχους τροφοδοσίας, κατά μήκος του βραχυκυκλωμένου στελέχους, κατά το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος και κατά τη διατομή του διηλεκτρικού υλικού του τετραγωνικού SMA συνδετήρα. Δηλαδή, στα σημεία όπου η ρευματική κατανομή ήταν πιο έντονη και βέβαια στα σημεία κατά μήκος της σχισμής, όπου οι μεταβολές είναι απότομες.

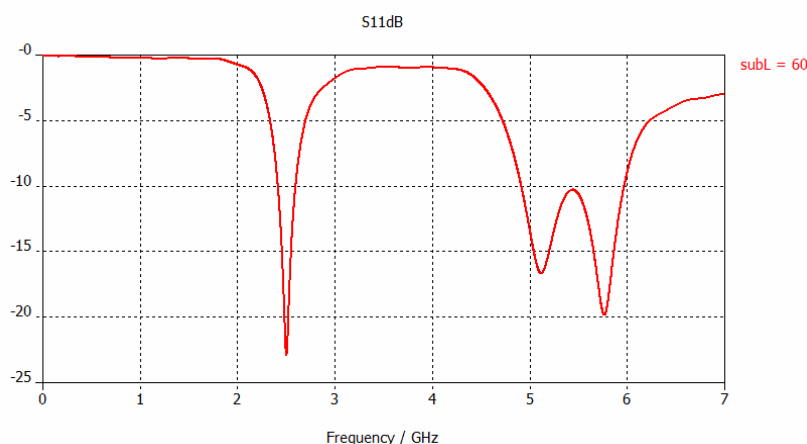
Μετά από την πραγματοποίηση αυτόματης προσαρμογής πλέγματος (adaptive meshing), η σύγκλιση επιτεύχθηκε για adaptive meshing 20/20/50. Ο αριθμός των κελιών Yee ήταν 378.510. Το συγκεκριμένο πλέγμα διακριτοποίησης διατηρήθηκε για όλη τη μελέτη της κεραίας.

4.2.3.3 Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 0-7 GHz. Οι οριακές συνθήκες στο boundary box τέθηκαν open-add space, και η προσομοίωση για τον ελεύθερο χώρο διάδοσης να γίνεται για απόσταση $\lambda_0/8$ από το μοντέλο της κεραίας, όπου το λ_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος ελεύθερου χώρου για συχνότητα που αντιστοιχεί στο μέσο του διαστήματος προσομοίωσης. Τέλος ο χώρος τερματίστηκε σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες κατά Berenger με αριθμό στρωμάτων PML=4.

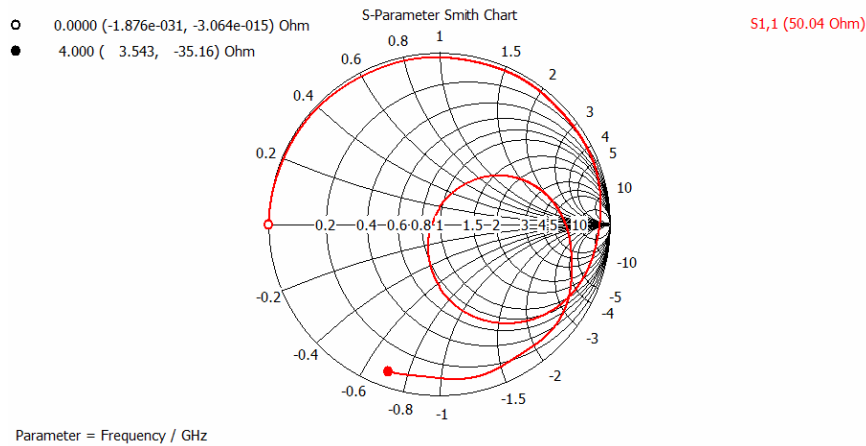
4.2.3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης.

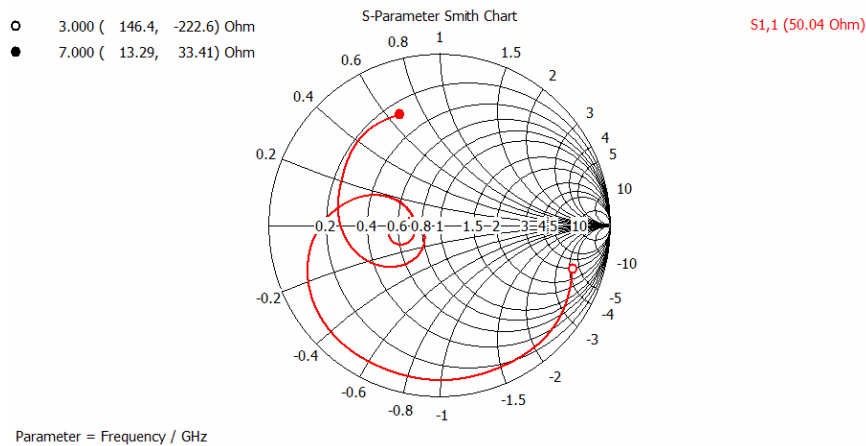


Σχήμα 4-38 Συντελεστής ανάκλασης της dual-band PIFA με δυαδική γενικευμένου τύπου σχισμή Koch.

Παρατηρούμε ότι η κεραία συντονίζεται στα 2.5 GHz, στα 5.11 GHz και 5.77 GHz. Ευτυχώς η δυαδική μορφή της γενικευμένης σχισμής Koch διατήρησε την ιδιότητα της κάλυψης ολόκληρης της ζώνης συχνοτήτων 5-6 GHz.

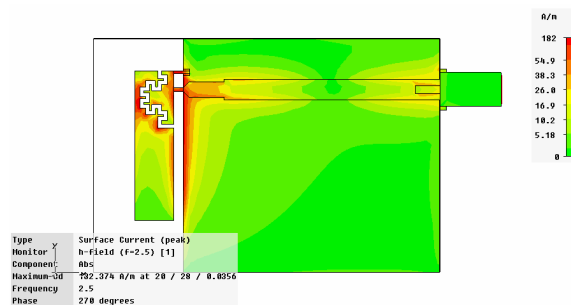


Σχήμα 4-39 Χάρτης Smith της dual-band PIFA με διαδική γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.5 GHz



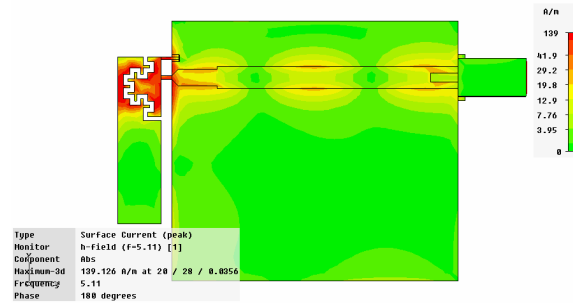
Σχήμα 4-40 Χάρτης Smith της dual-band PIFA με διαδική γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη ζώνη συχνοτήτων 5-6 GHz

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ρευματικές κατανομές στις δύο ζώνες συχνοτήτων.



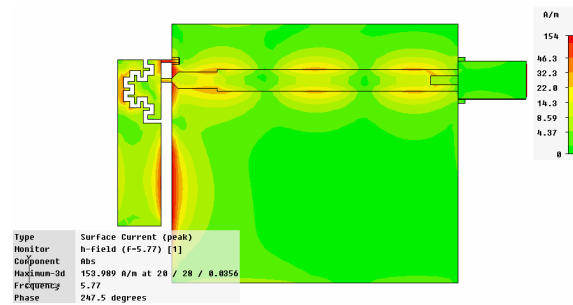
Σχήμα 4-41 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με διαδική γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.5 GHz

Το ρεύμα ακολουθεί τη διαδρομή και συνεχίζει σε όλο το μήκος του μονόπολου, άρα η συχνότητα συντονισμού στα 2.5 GHz οφείλεται και επηρεάζεται από το μήκος του μονόπολου.



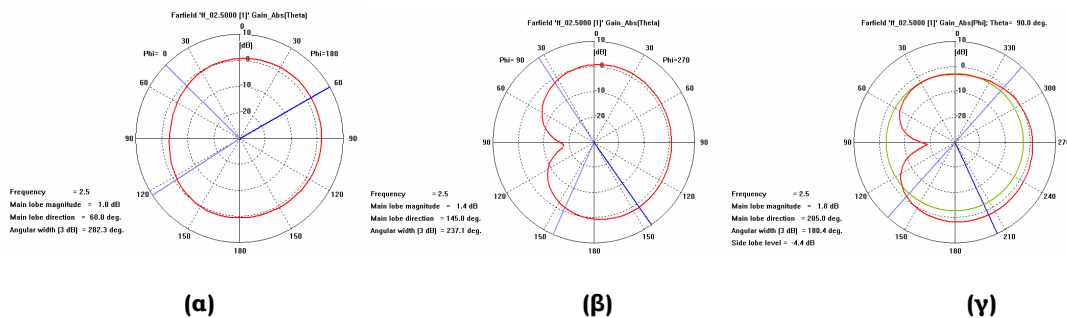
Σχήμα 4-42 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με δυαδική γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 5.11 GHz

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα ακολουθεί τη σχισμή και εκμεταλλεύεται πλήρως τη διαδρομή των επιμέρους τμημάτων και σταματά στο τέλος της σχισμής. Έτσι, ο συντονισμός στα 5.11 GHz οφείλεται στο μήκος της σχισμής.

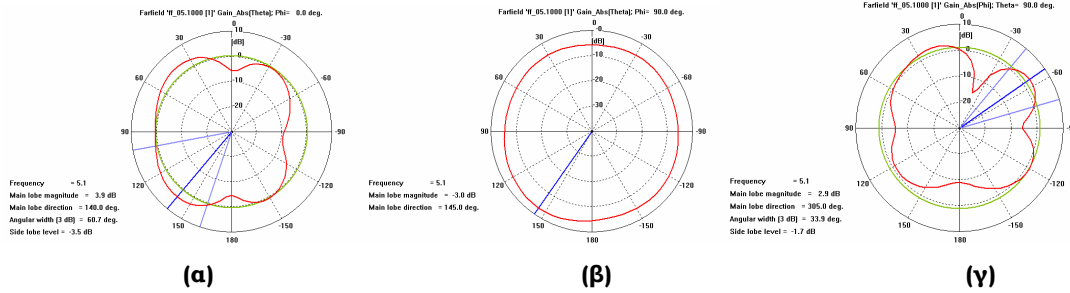


Σχήμα 4-43 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με δυαδική γενικευμένη σχισμή Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 5.77 GHz

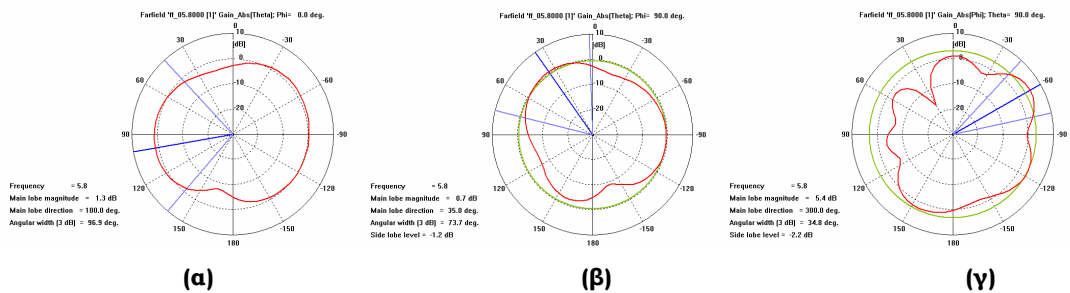
Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως προς το κέρδος στα επίπεδα XZ, YZ και XY.



Σχήμα 4-44 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με δυαδική γενικευμένη σχισμή Koch στη συχνότητα 2.5 GHz

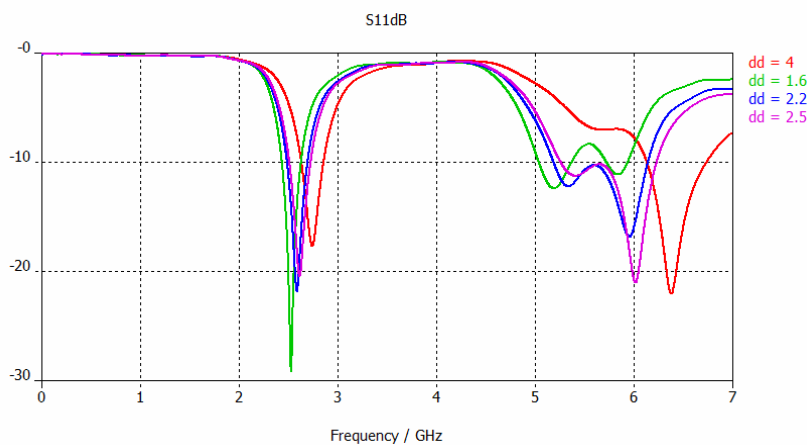


Σχήμα 4-45 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\phi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\phi=90^\circ$) και γ) XY (ϕ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με δυαδική γενικευμένη σχισμή Koch στη συχνότητα 5.11 GHz



Σχήμα 4-46 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\phi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\phi=90^\circ$) και γ) XY (ϕ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με δυαδική γενικευμένη σχισμή Koch στη συχνότητα 5.77 GHz

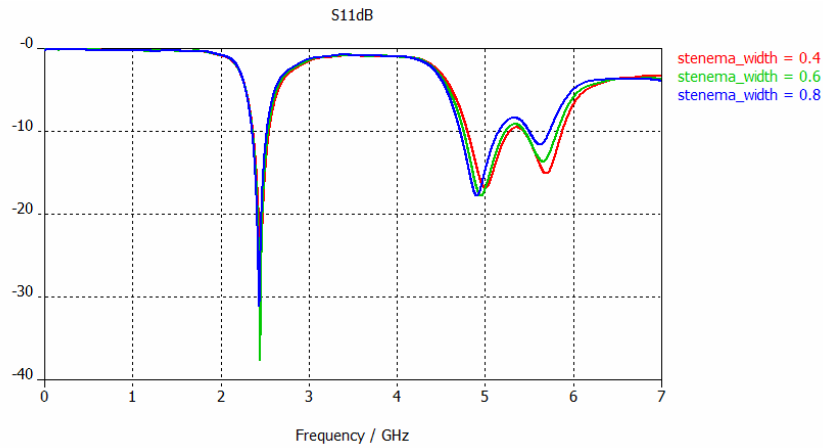
Πριν παραθέσουμε τον πίνακα με τα τελικά αποτελέσματα, θα παρουσιάσουμε μία σειρά παραμετρικών μεταβολών για κάποιες από τις παραμέτρους που είχαν κύριο ρόλο στη συμπεριφορά της κεραίας.



Σχήμα 4-47 Μεταβολή απόστασης μεταξύ του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλώματος

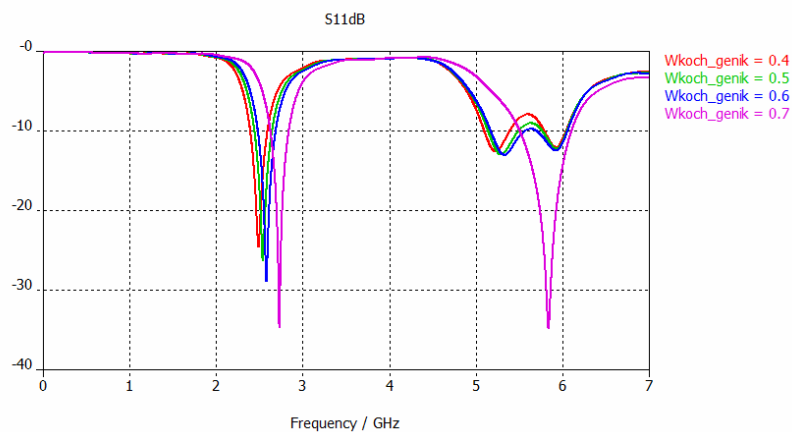
Με τη μεταβολή της παρατηρούμε ότι αύξηση της οδηγεί στη μετακίνηση των συχνοτήτων συντονισμού προς τα επάνω, ενώ επιδρά αρνητικά στην προσαρμογή της κεραίας τόσο στη συχνότητα 2.5 GHz όσο και στη μικρή

συχνότητα συντονισμού στη ζώνη 5-6 GHz. Επιλέξαμε την τιμή 2.2 mm με την οποία έχει επιτευχθεί πολύ καλή προσαρμογή και στις δύο ζώνες συχνοτήτων καθώς και κάλυψη ολόκληρης της ζώνης 5-6 GHz.



Σχήμα 4-48 Μεταβολή του πλάτους στενέματος της μικροταινίας

Για να βελτιώσουμε το πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου προς τα 50Ω στενέψαμε το τμήμα της μικροταινίας προς το άκρο τροφοδοσίας της κεραίας. Η τιμή εκλέπτυνσης 0.4mm σε κάθε πλευρά της θεωρήθηκε η πιο κατάλληλη, καθώς με αυτή βελτιωνόταν η προσαρμογή της κεραίας σε όλο το εύρος 5-6GHz αφού και ο συντελεστής ανάκλασης της κεντρικής συχνότητας παραμένει οριακά κάτω από τα -10dB.



Σχήμα 4-49 Μεταβολή του πλάτους της σχισμής

Παρατηρείται ότι αν αυξηθεί λίγο το πλάτος της σχισμής βοηθά το ρεύμα να ακολουθήσει καλύτερα τη διαδρομή της σχισμής και αυτό συντελεί στην καλύτερη προσαρμογή της κεραίας. Επιλέχθηκε η τιμή 0.6mm.

Τέλος, παραθέτουμε τον πίνακα των τελικών αποτελεσμάτων.

	fres_1=2.5 GHz	Ζώνη συχνοτήτων 5- 6GHz
f_center (GHz)	2.5	5.41
$\overline{e_{rad}}$	93.6%	96.7%
$\overline{e_{total}}$	83.6%	87.3%
$e_{totalmax}$	92.8%	95.5%
Gmax	1.98 (dBi)	4.4 (dBi)
BW	191 MHz	1.05 GHz
FBWv	7.6%	19.26%
ka	1.57	3.41
FoM	-3.9 (dB)	-3.0 (dB)

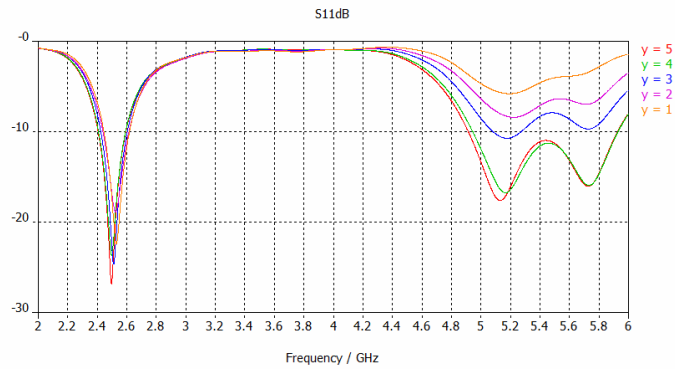
Πίνακας 4-6 Πίνακας τελικών αποτελεσμάτων για τα χαρακτηριστικά της κεραίας

Η απόδοση ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα καλή, αλλά το αξιοσημείωτο είναι η κάλυψη της ζώνης 5-6 GHz. Ενώ το εύρος ζώνης γύρω από τη συχνότητα 2.5 GHz είναι γύρω στα 191 MHz. Ο παράγοντας ποιότητας είναι πολύ μικρός λόγω του μεγάλου ηλεκτρικού μεγέθους ka.

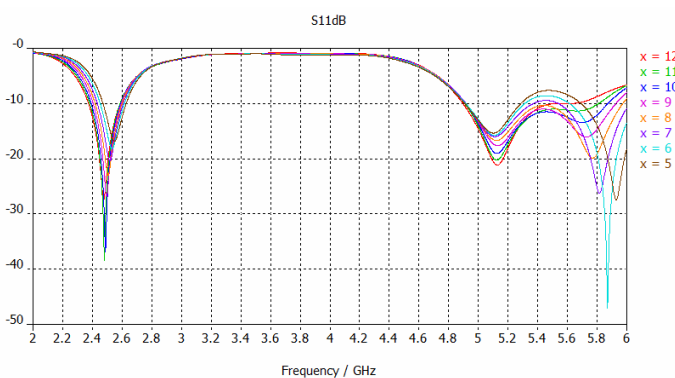
Με μία σύντομη σύγκριση ανάμεσα στην dual-band PIFA με σχισμή γενικευμένης Koch και σε αυτή με τη δυαδική σχισμή παρατηρούμε ότι τα τελικά αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά της κεραίας είναι σχεδόν ίδια.

4.2.3.5 Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης

Η μελέτη έγινε με αντίστοιχο τρόπο όπως και στην προηγούμενη κεραία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4-50 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους του επιπέδου γείωσης y

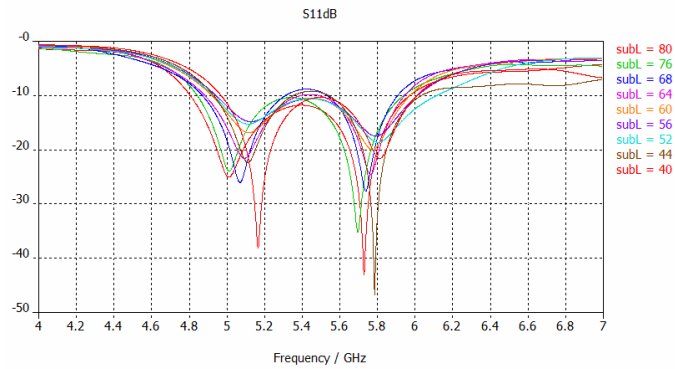


Σχήμα 4-51 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους του επιπέδου γείωσης x

Οι βέλτιστες τιμές ήταν $x=8\text{mm}$ και $y=5\text{mm}$. Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στη μεταβολή του μήκους του επιπέδου γείωσης.



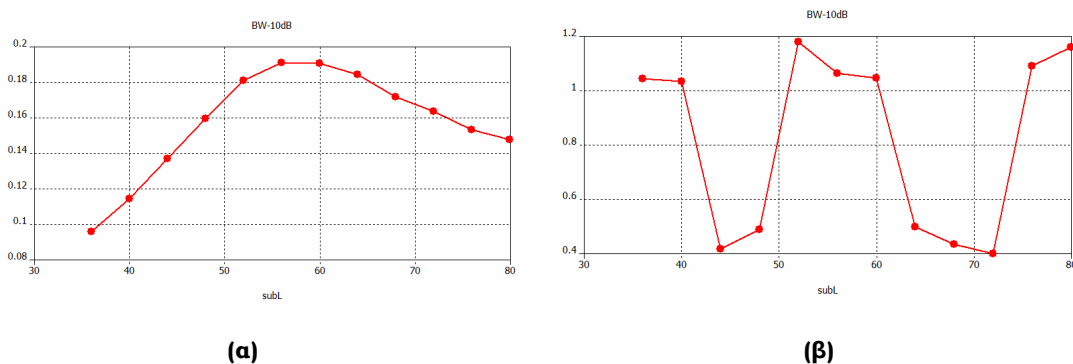
Σχήμα 4-52 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του μήκους του επιπέδου γείωσης στη ζώνη 2-3 GHz



Σχήμα 4-53 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του μήκους του επιπέδου γείωσης στη ζώνη 5-6 GHz

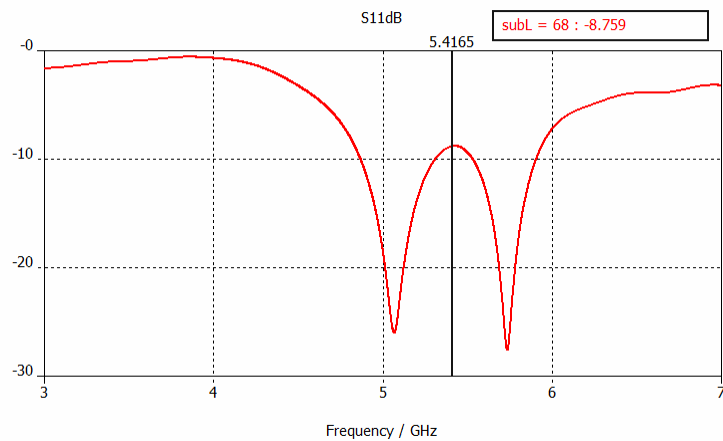
Να σημειωθεί ότι ισχύει $L_{gnd} = subL - 20$. Παρατηρούμε για τη ζώνη συχνοτήτων 2-3 GHz ότι πολύ καλά αποτελέσματα δίνουν οι τιμές $L_{gnd} = 32-44$ mm, ενώ για τη ζώνη 5-6 GHz οι τιμές $L_{gnd} = 20-48$ mm.

Τέλος, θα παρουσιαστούν και κάποια διαγράμματα με τη μεταβολή κάποιων μεγεθών της κεραίας συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους και του μήκους του επιπέδου γείωσης.

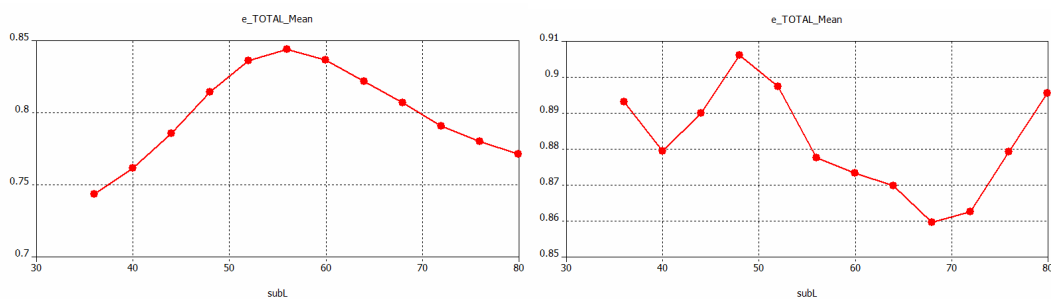


Σχήμα 4-54 Διάγραμμα του εύρους ζώνης συναρτήσει της μεταβολής του επιπέδου γείωσης ($L_{gnd} = subL - 20$) για α) 2-3 GHz και β) 5-6GHz

Στο δεύτερο διάγραμμα, οι απότομες μεταβολές της τιμής του εύρους ζώνης οφείλονται στο 3D ηλεκτρομαγνητικό προσομοιωτή, ο οποίος δεν υπολογίζει ενιαίο εύρος ζώνης αν σε κάποια συχνότητα ο συντελεστής ανάκλασης έχει τιμή άνω των -10dB. Στις τιμές που συμβαίνει αυτό στο παραπάνω διάγραμμα, σημαίνει ότι κάποιες συχνότητες στη ζώνη 5-6 GHz είχαν συντελεστή ανάκλασης μικρότερο των -10dB. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο επόμενο σχήμα, όπου στη συχνότητα 5.41GHz, ο συντελεστής ανάκλασης είναι στα -8dB, ενώ εκατέρωθεν της οι τιμές του είναι κάτω των -10dB. Έτσι η τιμή του εύρους ζώνης υπολογίζεται μόνο για τον πρώτο συντονισμό.



Σχήμα 4-55 Παράδειγμα διέγερσης δύο κοντινών στη συχνότητα συντονισμών, στο οποίο η μέγιστη τιμή της παραμέτρου S_{11} ανάμεσα στους 2 συντονισμούς υπερβαίνει τα -10dB.



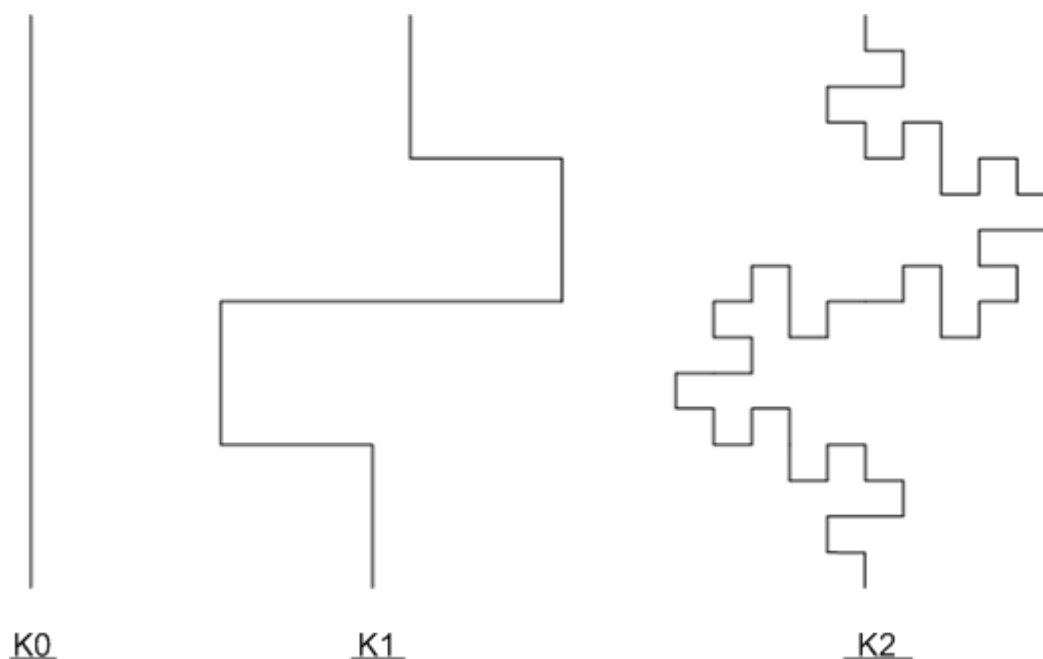
(α)

(β)

Σχήμα 4-56 Διάγραμμα του συνολικής απόδοσης της κεραίας συναρτήσει της μεταβολής του επιπέδου γείωσης ($L_{gnd}=subL-20$) για α) 2-3 GHz και β) 5-6 GHz

4.2.4 Dual-band PIFA Minkowski

Στο τελευταίο μοντέλο κεραίας θα μελετηθεί η σχισμή τύπου Minkowski, της οποίας η δομή φαίνεται παρακάτω.



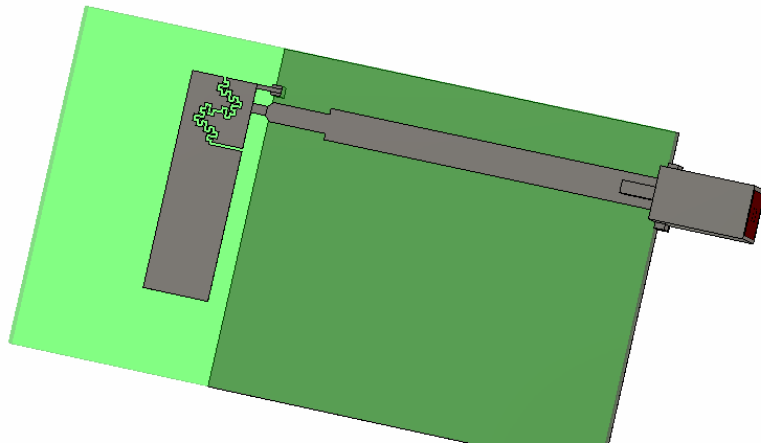
Εικόνα 4-13 Οι δύο πρώτες επαναλήψεις της δομής Minkowski

Η παραπάνω δομή είναι αρκετά πολυπλοκότερη σε σχέση με τις δομές που ήδη μελετήσαμε. Τα διαστήματα που θα πρέπει να ακολουθήσει η ρευματική κατανομή είναι αρκετά μικρότερα και κοντά το ένα στο άλλο. Το γεγονός αυτό μπορεί να δημιουργήσει το εξής πρόβλημα. Εφόσον, η κάθε γωνία ακτινοβολεί σφαιρικά κύματα και άρα εκπέμπει σήματα, αλλά μπορεί και να δέχεται σήματα από τις γειτονικές γωνίες, αυτό σημαίνει ότι ενδεχομένως το ρεύμα να μη μπορεί να ακολουθήσει τη διαδρομή αλλά να υπερπηδά κάποια τμήματα. Το αποτέλεσμα είναι ότι τελικά το ενεργό μήκος της σχισμής, το οποίο θα έπρεπε να ακολουθήσει το σήμα είναι μικρότερο από το συνολικό μήκος της, κάτι που οδηγεί στην ανάγκη για αύξηση του συνολικού μήκους της κεραίας, ώστε να διατηρηθεί σταθερή η συχνότητα συντονισμού, γεγονός που εμποδίζει την ηλεκτρική σμίκρυνσή της.

Επιπλέον, το πλάτος της σχισμής θα πρέπει να μείνει σχετικά μικρό, αλλιώς υπάρχει το πρόβλημα της ένωσης των επιμέρους τμημάτων.

4.2.4.1 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου

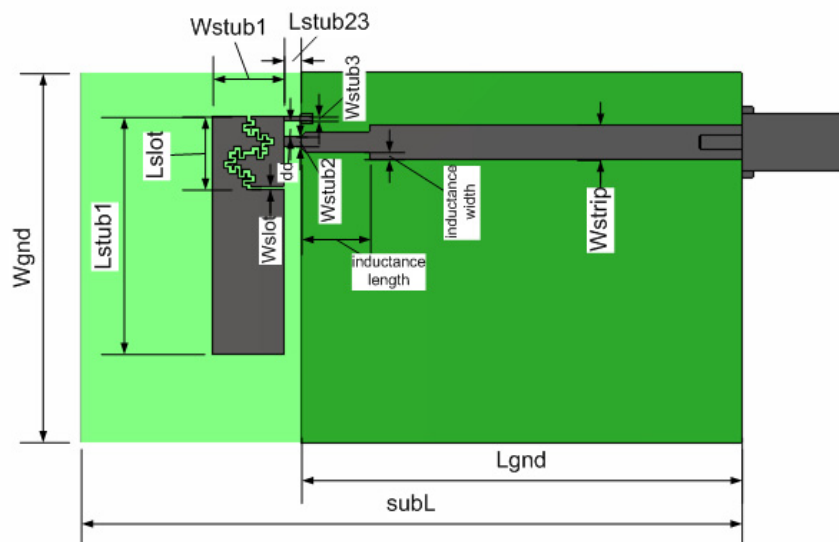
Το μοντέλο της κεραίας παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4-14 Μοντέλο dual-band PIFA με σχισμή τύπου Minkowski

Και σε αυτή την κεραία το διηλεκτρικό υλικό του υποστρώματος ήταν το TRF-45 της Taconic με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.38$ και απώλειες που εκφράζονται μέσω του μεγέθους εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta = 0.00284$. Και πάλι η τροφοδοσία της κεραίας γινόταν μέσω μικροταινίας, η οποία τροφοδοτούνταν από SMA τετραγωνικό συνδετήρα.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο με τις διαστάσεις.



Εικόνα 4-15 Διαστάσεις της dual-band PIFA με σχισμή τύπου Minkowski

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής.

Παράμετρος	Μήκος (mm)
H	1.63
t	0.0356
Lstub1	21.2
Wstub1	6.6
Lslot	6.7
Wslot	0.3
Lstub2	1.5
Wstub2	0.4
Lstub3	1.5
Wstub3	0.9
dd	1.5
Wstrip	3.1
inductance	6
length	
inductance width	0.6
Lgnd	40
Wgnd	33.6
subL	60

Πίνακας 4-7 Τελικές τιμές των παραμέτρων της dual-band PIFA με σχισμή τύπου Minkowski

Παρατηρείται ότι και σε αυτή την κεραία, είχαμε τους ίδιους βαθμούς ελευθερίας κατά τη μελέτη της κεραίας. Και σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία που ακολουθήσαμε για τη διεξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων ήταν η ίδια.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, το πλάτος της σχισμής παρέμεινε αρκετά μικρό σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα κεραιών.

4.2.4.2 Διακριτοποίηση (meshing)

Και σε αυτό το μοντέλο κεραίας ενισχύθηκε τοπικά το πλέγμα διακριτοποίησης στα τμήματα κατά μήκος και πλάτος της μικροταινίας, κατά μήκος του

σελέχους τροφοδοσίας, κατά μήκος του βραχυκυκλωμένου σελέχους, κατά το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος και κατά τη διατομή του διηλεκτρικού υλικού του τετραγωνικού SMA συνδετήρα. Δηλαδή, στα σημεία όπου η ρευματική κατανομή ήταν πιο έντονη και βέβαια στα σημεία κατά μήκος της σχισμής, όπου οι μεταβολές είναι απότομες.

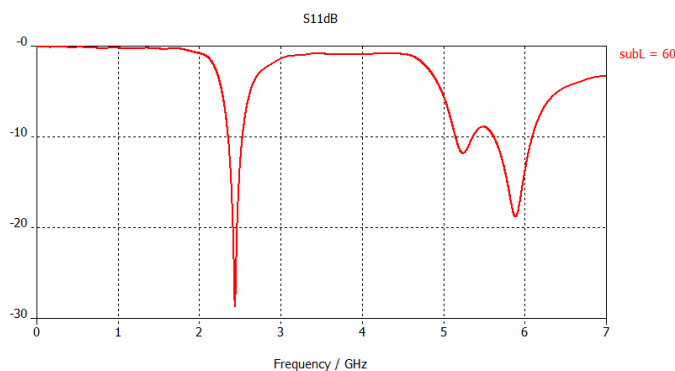
Μετά από την πραγματοποίηση αυτόματης προσαρμογής πλέγματος (adaptive meshing), η σύγκλιση επιτεύχθηκε για adaptive meshing 20/20/50. Ο αριθμός των κελιών Yee ήταν 494.214. Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των κελιών λόγω της διακριτοποίησης ήταν αρκετά μεγαλύτερος σε σχέση με τα άλλα μοντέλα, γεγονός που επιβάρυνε το χρόνο προσομοίωσης.

4.2.4.3 Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 0-7 GHz. Οι οριακές συνθήκες στο boundary box τέθηκαν open-add space, και η προσομοίωση για τον ελεύθερο χώρο διάδοσης να γίνεται για απόσταση $\lambda_0/8$ από το μοντέλο της κεραίας, όπου το λ_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος ελεύθερου χώρου για συχνότητα που αντιστοιχεί στο μέσο του διαστήματος προσομοίωσης. Τέλος ο χώρος τερματίστηκε σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες κατά Berenger με αριθμό στρωμάτων PML=4.

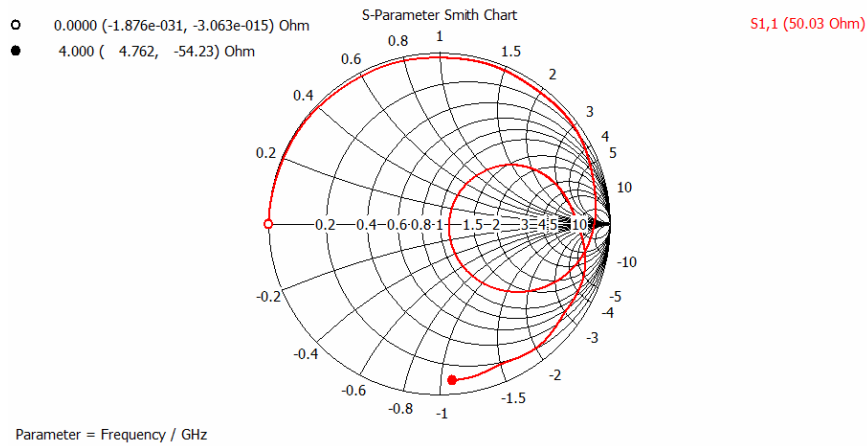
4.2.4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης.

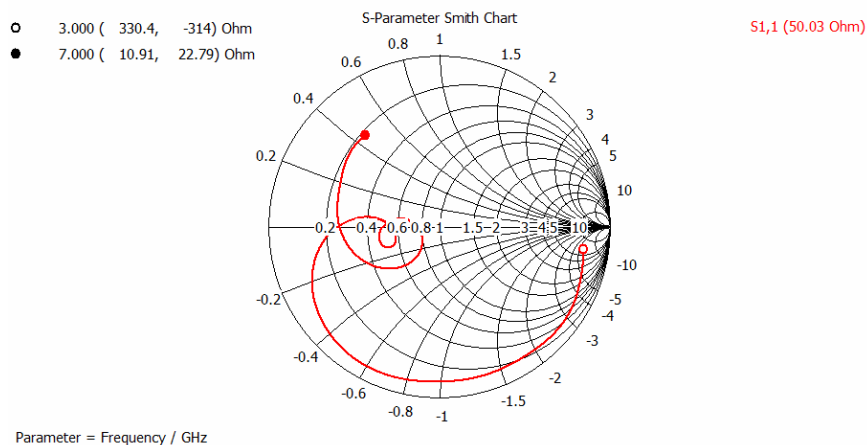


Σχήμα 4-57 Συντελεστής ανάκλασης της dual-band PIFA με σχισμή τύπου Minkowski.

Η κεραία συντονίζεται στα 2.45 GHz, στα 5.24 GHz και 5.88 GHz. Παρατηρούμε ότι και πάλι έχει επιτευχθεί η κάλυψη της ζώνης 5-6 GHz, παρόλο που δεν ήταν εφικτό να διατηρηθεί η καλή προσαρμογή σε όλη τη ζώνη.

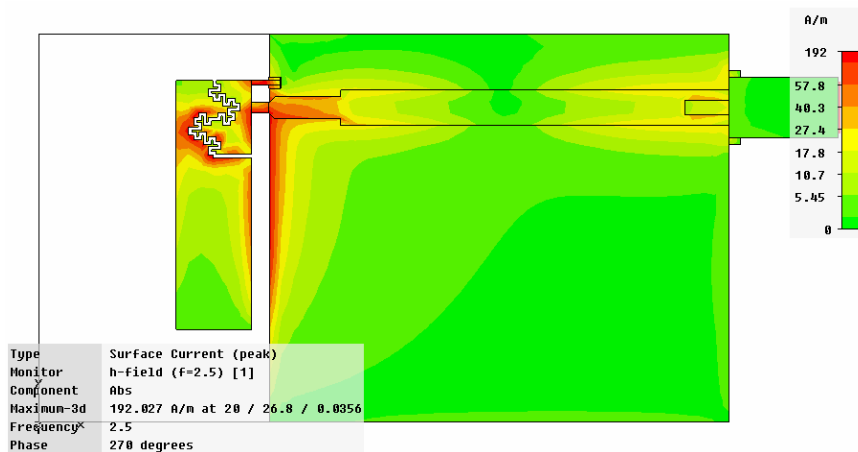


Σχήμα 4-58 Χάρτης Smith της dual-band PIFA με σχισμή Minkowski με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.45 GHz



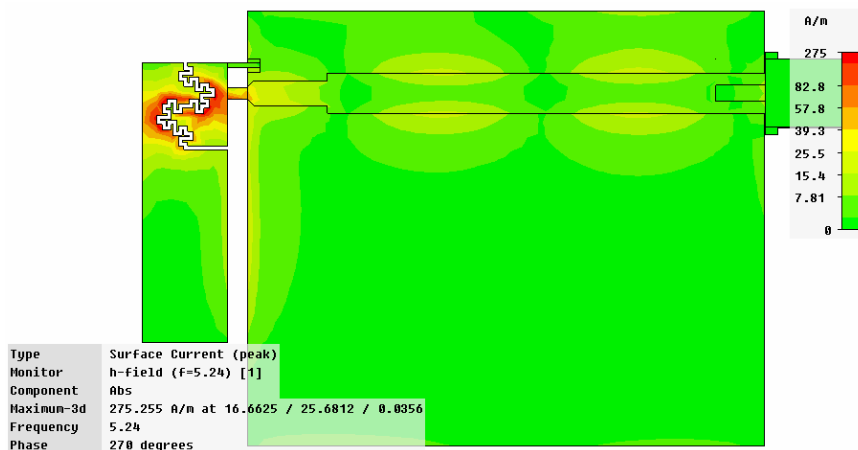
Σχήμα 4-59 Χάρτης Smith της dual-band PIFA με σχισμή Minkowski με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη ζώνη συχνοτήτων 5-6 GHz

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ρευματικές κατανομές στις δύο ζώνες συχνοτήτων.



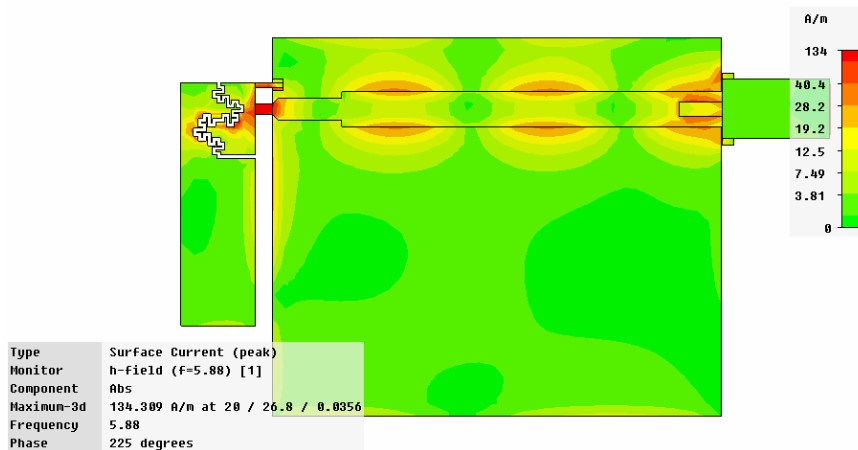
Σχήμα 4-60 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με σχισμή Minkowski με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.45 GHz

Το ρεύμα ακολουθεί τη διαδρομή και συνεχίζει σε όλο το μήκος του μονόπολου, άρα η συχνότητα συντονισμού στα 2.5 GHz οφείλεται και επηρεάζεται από το μήκος του μονόπολου. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι το σήμα δεν ακολουθεί όλη τη διαδρομή, όπως είχαμε υποπτευθεί από την αρχή.



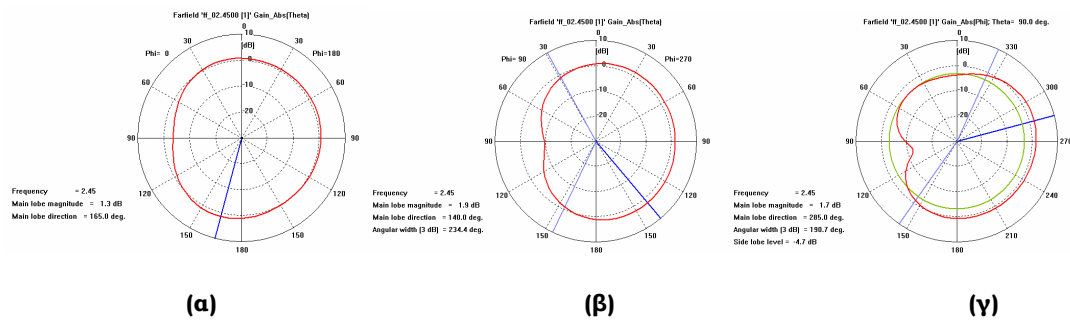
Σχήμα 4-61 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με σχισμή Minkowski με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 5.24 GHz

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα ακολουθεί τη σχισμή και πάλι χωρίς να εκμεταλλεύεται πλήρως τη διαδρομή των επιμέρους τμημάτων και σταματά στο τέλος της. Έτσι, ο συντονισμός στα 5.24 GHz οφείλεται στο μήκος της σχισμής.

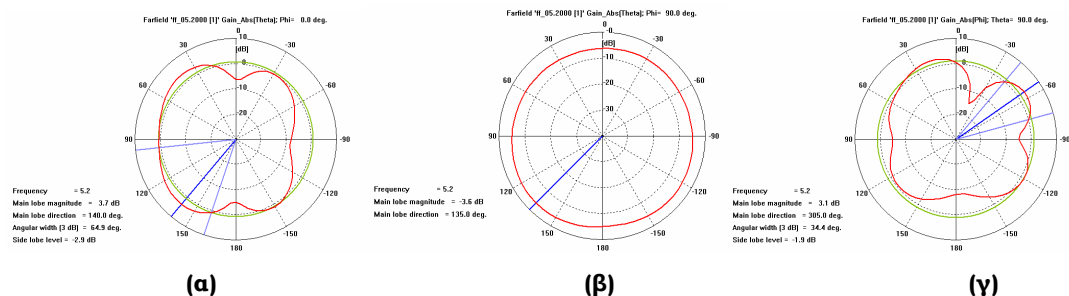


Σχήμα 4-62 Ρευματική κατανομή της dual-band PIFA με σχισμή Minkowski με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 5.88 GHz

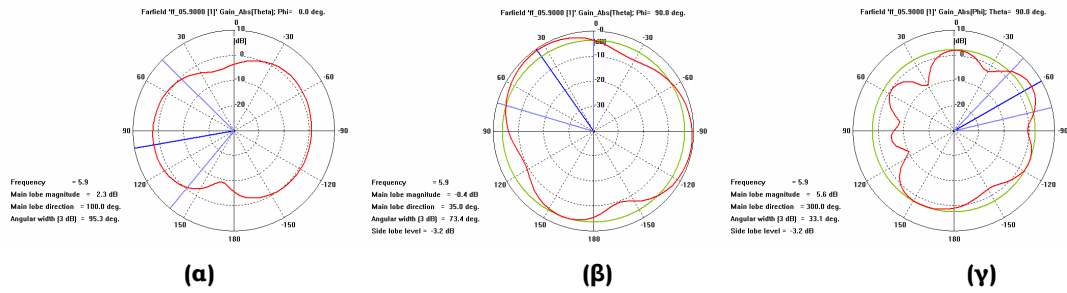
Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως προς το κέρδος στα επίπεδα XZ, YZ και XY.



Σχήμα 4-63 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με σχισμή Minkowski στη συχνότητα 2.45 GHz

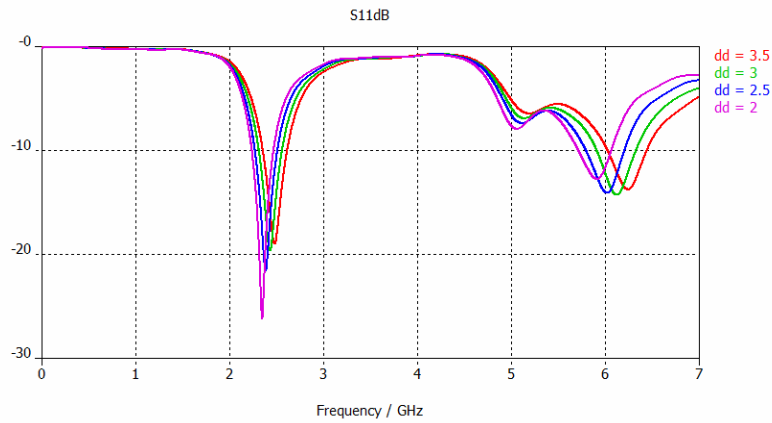


Σχήμα 4-64 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με σχισμή Minkowski στη συχνότητα 5.24 GHz



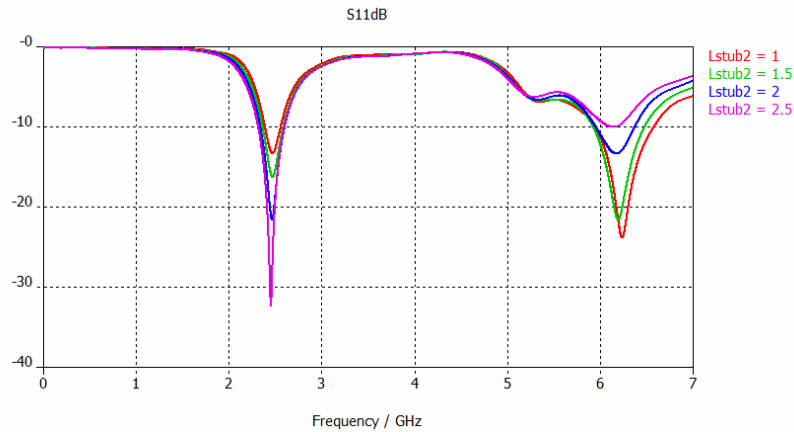
Σχήμα 4-65 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της dual-band PIFA με σχισμή Minkowski στη συχνότητα 5.88 GHz

Πριν παραθέσουμε τον πίνακα με τα τελικά αποτελέσματα, θα παρουσιάσουμε μία σειρά παραμετρικών μεταβολών για κάποιες από τις παραμέτρους που είχαν κύριο ρόλο στη συμπεριφορά της κεραίας.



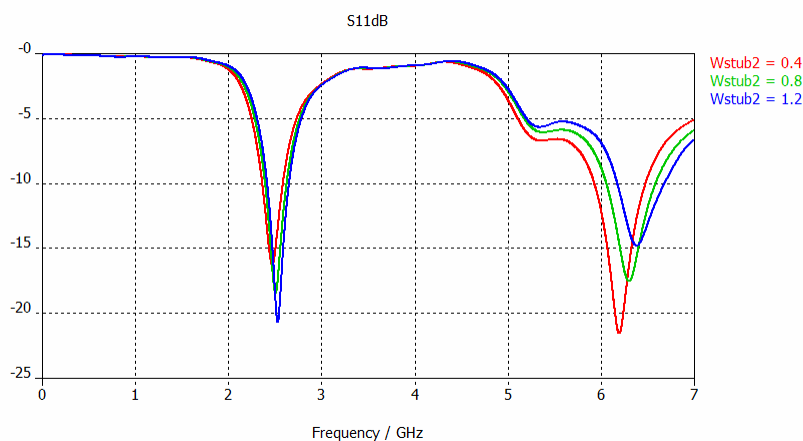
Σχήμα 4-66 Μεταβολή απόστασης μεταξύ του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλώματος

Σε αυτή την κεραία η παράμετρος της απόστασης μεταξύ του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλωμένου στελέχους ήταν ιδιαίτερα κρίσιμη. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4-66 όσο μικρότερη η τιμή της, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι τόσο το καλύτερο για την προσαρμογή της κεραίας. Επιλέξαμε την οριακή τιμή 1.5mm.



Σχήμα 4-67 Μεταβολή του μήκους του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλώματος

Με τη μεταβολή αυτής της παραμέτρου, σε αυτή την κεραία δυστυχώς η μεταβολή της είχε ακριβώς τα αντίθετα αποτελέσματα για τις δύο ζώνες συχνοτήτων. Έτσι, επιλέξαμε συμβιβαστικά μία ενδιάμεση τιμή, συγκεκριμένα την 1.5 mm.

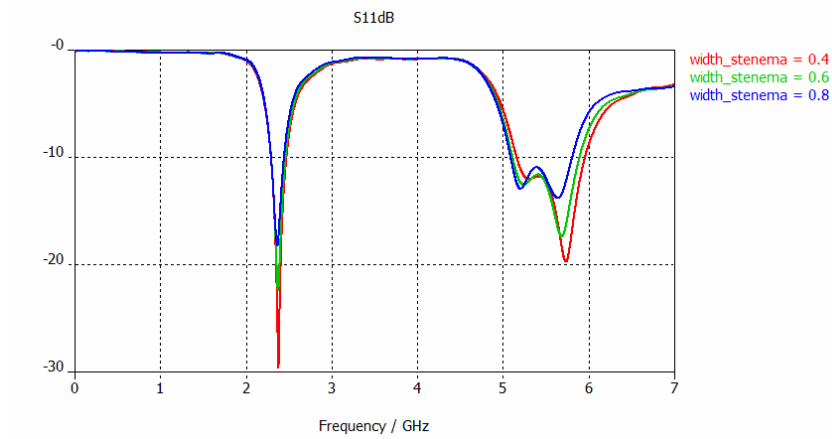


Σχήμα 4-68 Μεταβολή του πλάτους της σχισμής

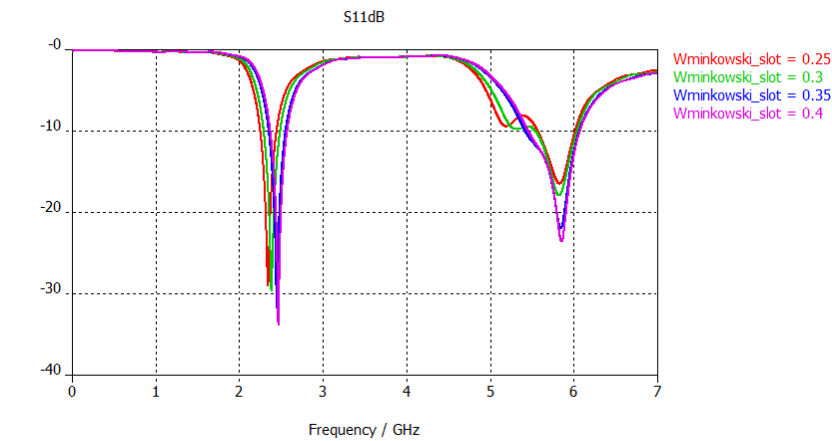
Για την παράμετρο του πλάτους του βραχυκυκλωμένου στελέχους, ομοίως επιλέξαμε μία συμβιβαστική τιμή, την 0.4mm, διότι η κυριότερη δυσκολία μας ήταν η προσαρμογή της κεραίας στη ζώνη συχνοτήτων 5-6 GHz, και αυτή ήταν η τιμή που έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα, παρόλο που είναι οριακή.

Η σημαντική βελτίωση του πραγματικού μέρους της αντίστασης εισόδου προς τα 50Ω έγινε με αύξηση του πλάτους του στελέχους τροφοδοσίας από 0.4mm σε 0.9mm, αντίθετα με ότι είχε δείξει μία παραμετρική μελέτη της παραμέτρου στην αρχή της μελέτης. Περαιτέρω βελτίωση έγινε μέσω της εκλέπτυνσης του τμήματος, προς το άκρο της τροφοδοσίας της κεραίας, και με τη διατήρηση του

πλάτους της σχισμής σε όσο το δυνατό πιο μικρά επίπεδα, λόγω της γεωμετρίας της σχισμής Minkowski, όπως είχαμε αναφέρει.



Σχήμα 4-69 Μεταβολή του πλάτους εκλέπτυνσης του τμήματος της μικροταινίας



Σχήμα 4-70 Μεταβολή του πλάτους της σχισμής

Τέλος, παραθέτουμε τον πίνακα των τελικών αποτελεσμάτων.

	fres_1=2.5 GHz	Ζώνη συχνοτήτων 5- 6GHz
f_center (GHz)	2.45	5.45
$\overline{e_{rad}}$	94%	96.6%
$\overline{e_{total}}$	83.4%	84%
$e_{totalmax}$	93.2%	95.2%
Gmax	2.1 (dBi)	4.6 (dBi)

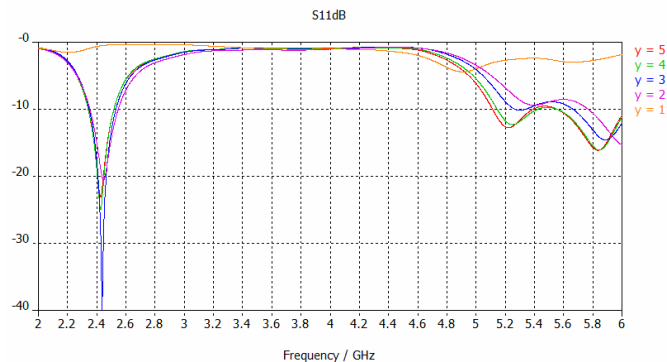
BW	182 MHz	950 MHz
FBWν	7.4%	17.4%
ka	1.5	3.2
FoM	-3.8 (dB)	-3.0 (dB)

Πίνακας 4-8 Πίνακας τελικών αποτελεσμάτων για τα χαρακτηριστικά της κεραίας

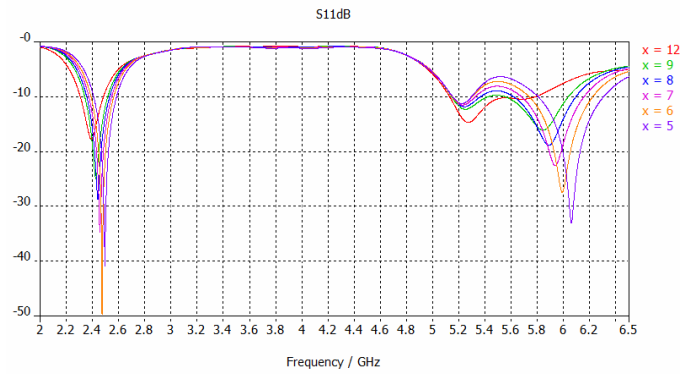
Η απόδοση ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα καλή, αλλά το αξιοσημείωτο είναι η κάλυψη της ζώνης 5-6 GHz, αν και δεν είχαμε προσαρμογή σε όλο το εύρος, και επίσης ο συντονισμός της κεντρικής συχνότητας ήταν λίγο χειρότερος από τα -10dB. Ο παράγοντας ποιότητας είναι πολύ μικρός λόγω του μεγάλου ηλεκτρικού μεγέθους ka.

4.2.4.5 Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης

Η μελέτη έγινε με αντίστοιχο τρόπο όπως και στην προηγούμενη κεραία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα.

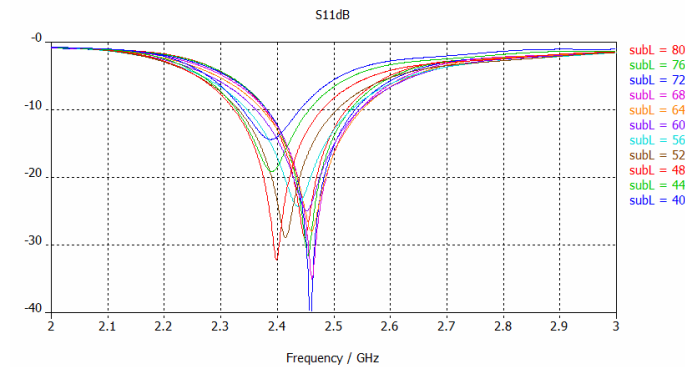


Σχήμα 4-71 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους του επιπέδου γείωσης y

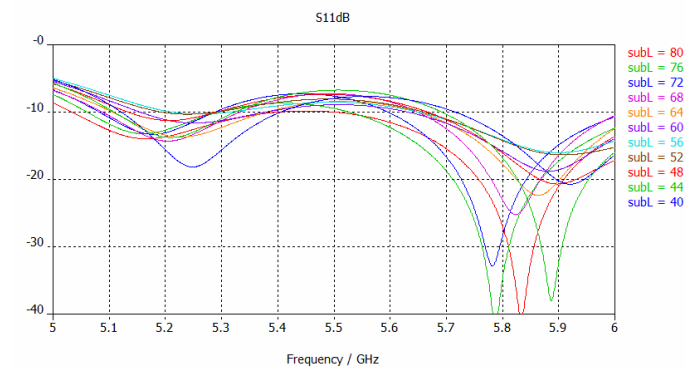


Σχήμα 4-72 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους του επιπέδου γείωσης x

Οι βέλτιστες τιμές ήταν $x=8\text{mm}$ και $y=4\text{mm}$. Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στη μεταβολή του μήκους του επιπέδου γείωσης.



Σχήμα 4-73 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του μήκους του επιπέδου γείωσης στη ζώνη 2-3 GHz

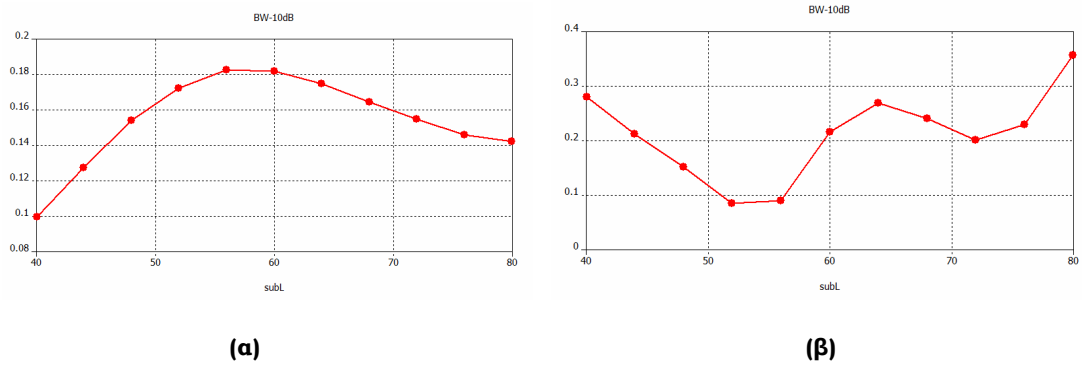


Σχήμα 4-74 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της μεταβολής του μήκους του επιπέδου γείωσης στη ζώνη 5-6 GHz

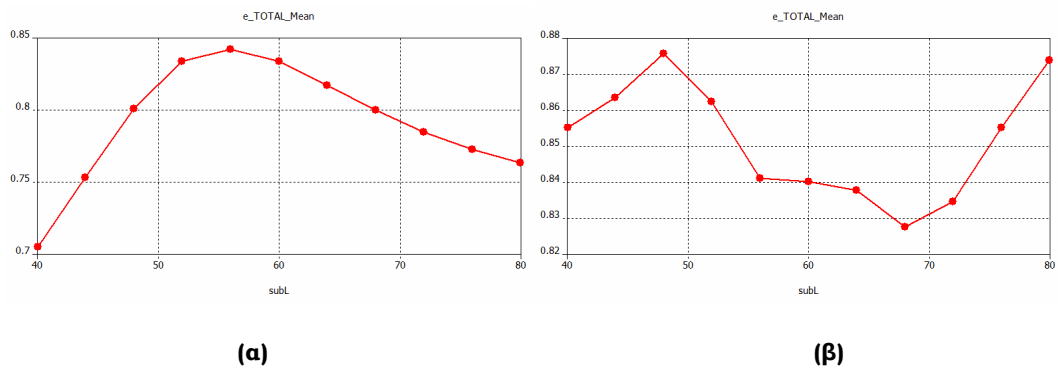
Να σημειωθεί ότι ισχύει $L_{gnd} = \text{sub}L - 20$. Παρατηρούμε για τη ζώνη συχνοτήτων 2-3 GHz ότι πολύ καλά αποτελέσματα δίνουν οι τιμές $L_{gnd}=28-32$ mm, ενώ για τη ζώνη 5-6 GHz οι τιμές $L_{gnd}=20-24\text{mm}$. Σε αυτή την

περίπτωση, τα αποτελέσματα της μελέτης του επιπέδου γείωσης είναι αρκετά αντικρουόμενα για τις δύο ζώνες συχνοτήτων. Μία συμβιβαστική λύση είναι η επιλογή της τιμής $L_{gnd}=42\text{mm}$.

Τέλος, θα παρουσιαστούν και κάποια διαγράμματα με τη μεταβολή κάποιων μεγεθών της κεραίας συναρτήσει της μεταβολής του πλάτους και του μήκους του επιπέδου γείωσης.



Σχήμα 4-75 Διάγραμμα του εύρους ζώνης συναρτήσει της μεταβολής του επιπέδου γείωσης ($L_{gnd}=\text{sub}L-20$) για α) 2-3 GHz και β) 5-6GHz



Σχήμα 4-76 Διάγραμμα του συνολικής απόδοσης της κεραίας συναρτήσει της μεταβολής του επιπέδου γείωσης ($L_{gnd}=\text{sub}L-20$) για α) 2-3 GHz και β) 5-6 GHz

4.3 Βιβλιογραφία

- [1] Evangelos S. Angelopoulos, Antonis I. Costaridis and Dimitra I. Kaklamani, “A novel Dual-Band F-Inverted Antenna Printed on a PCMCIA card ”, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 42, No. 2, July 20, 2004.
- [2] G. P. Karakoussis, A. I. Costaridis, C. G. Biniaris and D. I. Kaklamani, “A Dual-Band Inverted-F Antenna Printed on a PC Card for the ISM and UNNI Bands ”, IEEE, 2003.

5. Single-band τυπωμένες κεραιές ανεστραμμένου F-μονόπολου (PIFA) με σχισμές pre-fractal

5.1 Εισαγωγή

Το επόμενο μέρος της μελέτης σχετίζεται άμεσα με το αντικείμενο του προηγούμενου κεφαλαίου. Συγκεκριμένα αποφασίσαμε να συνεχίσουμε τη μελέτη μας, αυτή τη φορά προσπαθώντας να κατασκευάσουμε κεραιές ανεστραμμένης F γεωμετρίας με χρήση σχισμής που να λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 2-3 GHz.

Ουσιαστικά αυτό επιτεύχθηκε με αύξηση του μήκους της σχισμής, ώστε ο συντονισμός που θα οφειλόταν σε αυτή να γινόταν για πολύ μικρότερη συχνότητα συντονισμού, μέσα στη ζώνη 2-3 GHz. Οι σχισμές τις οποίες μελετήσαμε ήταν η σχισμή τύπου Koch, τύπου γενικευμένης Koch, καθώς και η δυαδική της. Και πάλι τα πλεονεκτήματα αυτών των τύπων σχισμών σε σχέση με την απλή σχισμή L ήταν η καλύτερη εκμετάλλευση του χώρου που οδηγούσε σε σμίκρυνση της κεραιάς καθώς και το καλύτερο εύρος ζώνης. Και σε αυτές τις κεραιές το επίπεδο γείωσης συνέβαλε στην ακτινοβολία, ήταν δηλαδή ενεργό μέρος της διάταξης της κεραιάς, λειτουργώντας σαν ασύμμετρο είδωλο της κεραιάς.

Η ακτίνα για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού μεγέθους ka έγινε με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε και δίνεται από τον ίδιο τύπο

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{W_{\text{gnd}}^2 + (W_{\text{stub1}} + L_{\text{stub23}} + L_{\text{gnd}})^2}.$$

Ωστόσο, μία διαφορά είναι ότι χρησιμοποιήσαμε διαφορετικό διηλεκτρικό υλικό για το υπόστρωμα. Το υλικό ήταν το Bungard FR-4 της Rogers με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=4.6$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta=0.017$ και ύψος $H=1.55\text{mm}$.

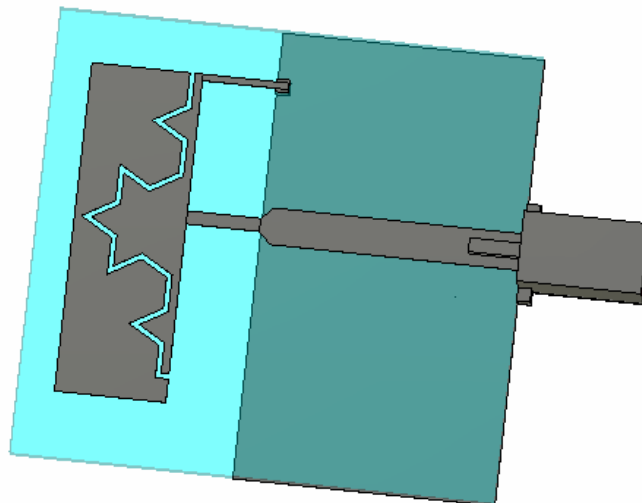
Η τροφοδοσία των κεραιών γίνεται μέσω μικροταινίας, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτούνταν από τετραγωνικό SMA συνδετήρα. Σε αυτή την περίπτωση το διηλεκτρικό υλικό του συνδετήρα είναι το Teflon με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 3.3$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0.0003$.

5.2 Single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch

Η πρώτη κεραία που μελετήσαμε ήταν η single-band ανεστραμμένης F γεωμετρίας με χρήση της σχισμής τύπου Koch.

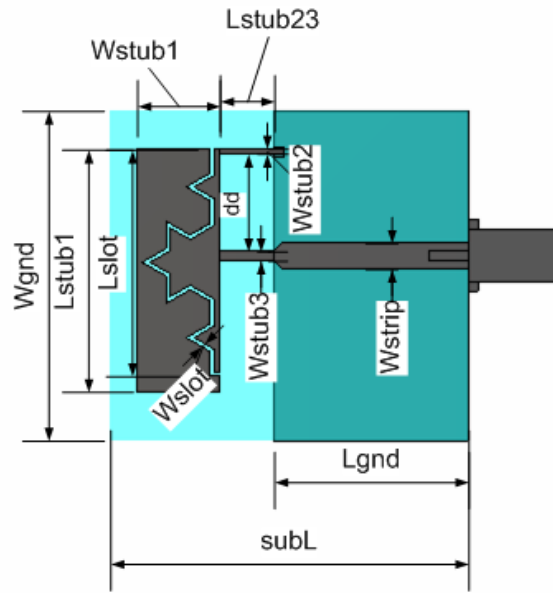
5.2.1 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου

Το μοντέλο της κεραιάς παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5-1 Μοντέλο single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο με τις διαστάσεις.



Εικόνα 5-2 Διαστάσεις της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής.

Παράμετρος	Μήκος (mm)
H	1.55
t	0.0356
Lstub1	25.2
Wstub1	8.5
Lslot	23.4
Wslot	0.4
Lstub2	5.6
Wstub2	0.5
Lstub3	5.6
Wstub3	1
dd	10
Wstrip	2.8
Lgnd	20
Wgnd	34.2
subL	57

Πίνακας 5-1 Τελικές τιμές των παραμέτρων της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch

Είναι φανερό ότι το μήκος της σχισμής έχει προσεγγίσει πολύ αυτό του μονόπολου, αφού στόχος είναι δύο συντονισμοί σε κοντινές συχνότητες, και οι δύο στη ζώνη 2-3 GHz. Επίσης, το πλάτος του μονόπολου της κεραίας έχει αυξηθεί, αφού όπως είχαμε αναφέρει και στο προηγούμενο κεφάλαιο εξαρτάται από το μήκος των επιμέρους τμημάτων και άρα από το μήκος της σχισμής. Οι βαθμοί ελευθερίας της κεραίας παραμένουν ίδιοι, με αυτούς των dual-band, ενώ ίδιος παραμένει και ο τρόπος διεξαγωγής της μελέτης της κεραίας.

5.2.2 Διακριτοποίηση (meshing)

Στο μοντέλο της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch ενισχύθηκε τοπικά το πλέγμα διακριτοποίησης μόνο στο τμήμα κατά το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος.

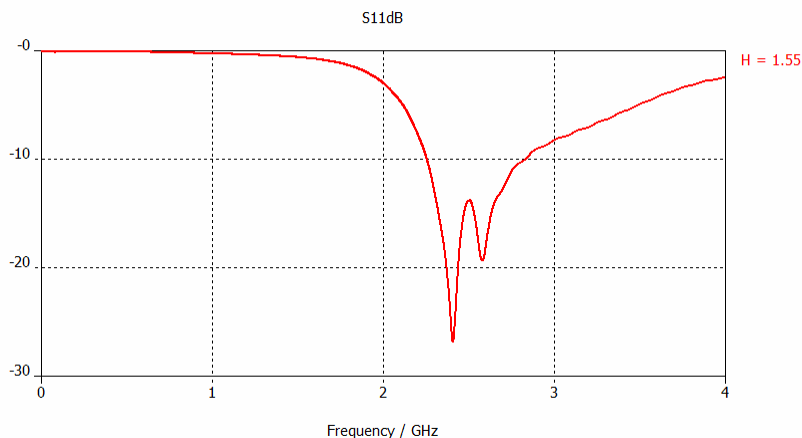
Μετά από την πραγματοποίηση αυτόματης προσαρμογής πλέγματος (adaptive meshing), η σύγκλιση επιτεύχθηκε για adaptive meshing 25/25/50. Ο αριθμός των κελιών Yee ήταν 334.400. Το συγκεκριμένο πλέγμα διακριτοποίησης διατηρήθηκε για όλη τη μελέτη της κεραίας.

5.2.3 Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 0-4 GHz. Οι οριακές συνθήκες στο boundary box τέθηκαν open-add space, και η προσομοίωση για τον ελεύθερο χώρο διάδοσης να γίνεται για απόσταση $\lambda_0/8$ από το μοντέλο της κεραίας, όπου το λ_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος ελεύθερου χώρου για συχνότητα που αντιστοιχεί στο μέσο του διαστήματος προσομοίωσης. Τέλος ο χώρος τερματίστηκε σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες κατά Berenger με αριθμό στρωμάτων PML=4.

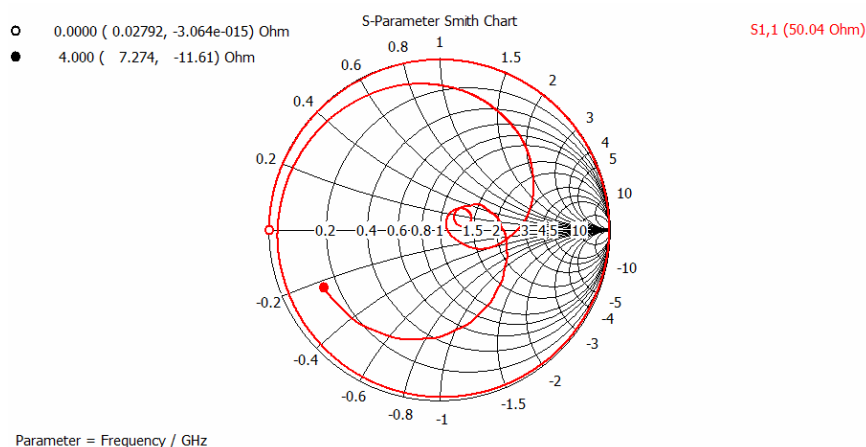
5.2.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης.



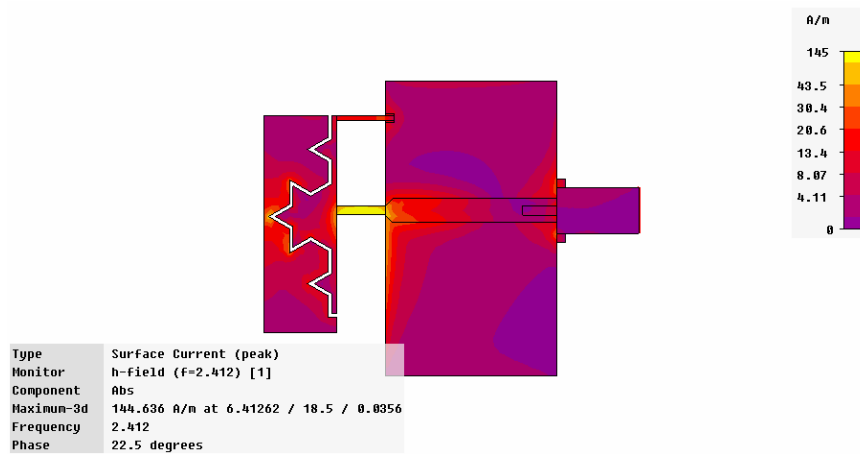
Σχήμα 5-1 Συντελεστής ανάκλασης της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch.

Παρατηρούμε ότι η κεραία συντονίζεται στα 2.41 GHz και στα 2.58 GHz. Το εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγάλο και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ζώνης 2-3 GHz.

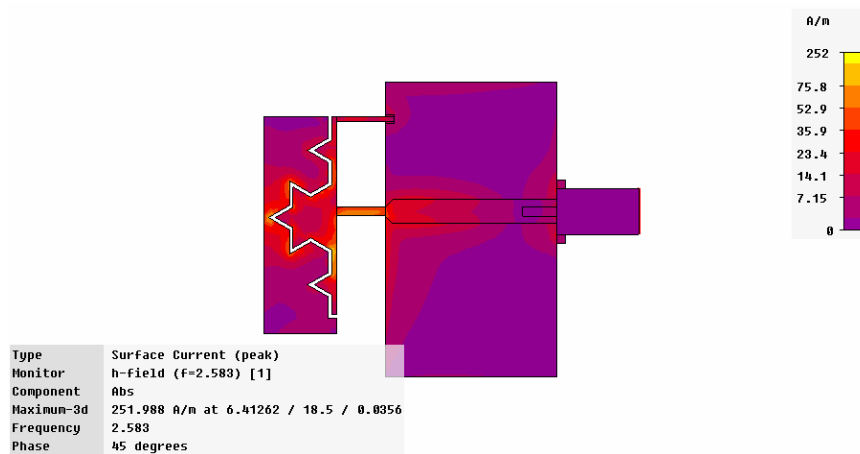


Σχήμα 5-2 Χάρτης Smith της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch με αναφορά στην είσοδο του συνδετήρα στη συχνότητα συντονισμού 2.41 GHz

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ρευματικές κατανομές στις δύο συχνότητες συντονισμού. Παρατηρείται η επαγωγή του ρεύματος στο επίπεδο γείωσης.



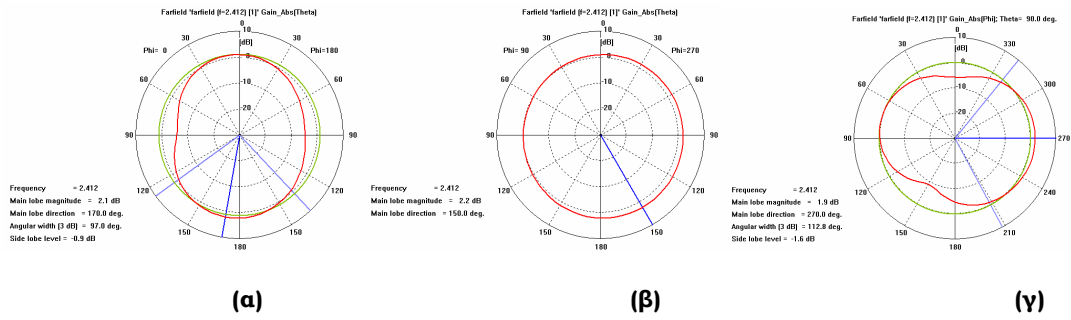
Σχήμα 5-3 Ρευματική κατανομή της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch στη συχνότητα συντονισμού 2.41 GHz



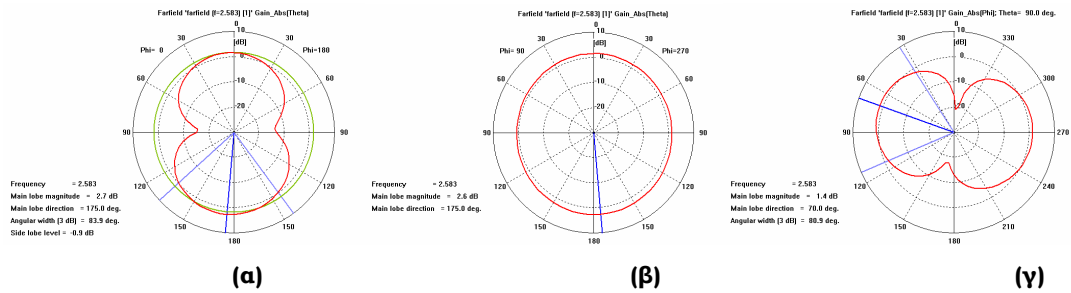
Σχήμα 5-4 Ρευματική κατανομή της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch στη συχνότητα συντονισμού 2.58 GHz

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα ακολουθεί τη σχισμή και εκμεταλλεύεται πλήρως τη διαδρομή των επιμέρους τμημάτων.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως προς το κέρδος στα επίπεδα XZ, YZ και XY.

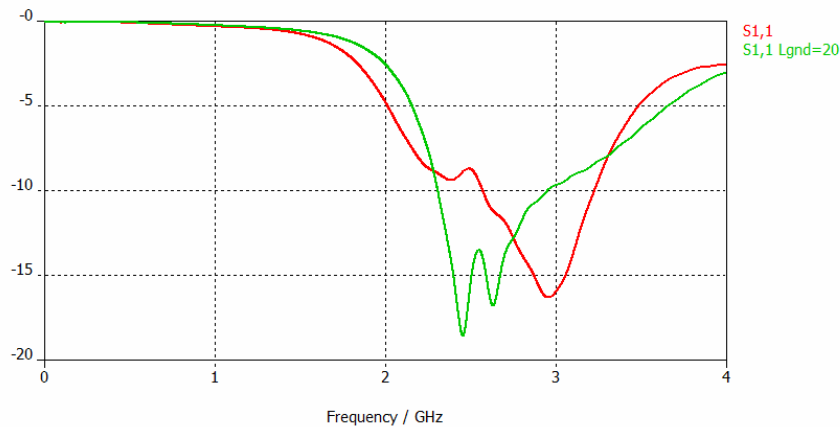


Σχήμα 5-5 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch στη συχνότητα 2.41 GHz



Σχήμα 5-6 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch στη συχνότητα 2.58 GHz

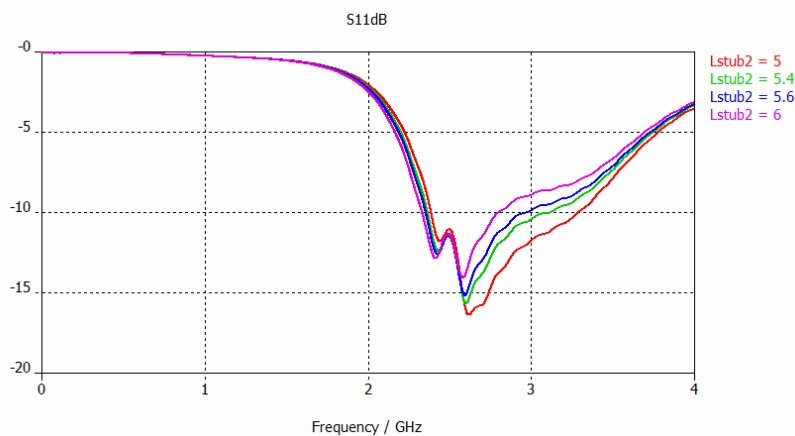
Πριν προχωρήσουμε στις παρακάτω αξιζει να σημειωθεί ότι αρχικά η μελέτη μας ξεκίνησε με διαστάσεις επιπέδου γείωσης $L_{gnd} \times W_{gnd} = 30\text{mm} \times 34.2\text{mm}$. Το μήκος του επιπέδου γείωσης L_{gnd} ισούται με $\lambda_0/4$, όπου $\lambda_0 = c/f_0 = 120\text{mm}$ στα 2.5 GHz, που αποτελεί την κεντρική συχνότητα. Η τιμή $\lambda_0/4$ αποτελεί μία καλή τιμή έναρξης, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε μια καλά συντονισμένη κεραία και με αξιόλογες ιδιότητες, ενώ επιπλέον μας δίνει τη δυνατότητα να επιτύχουμε μικρότερες διαστάσεις για τα στελέχη της κεραίας. [paper kak gndplane FoM] Ωστόσο, επειδή αντιμετωπίσαμε δυσκολίες στο συντονισμό και στην προσαρμογή της κεραίας, μειώσαμε το μήκος του επιπέδου γείωσης σε $L_{gnd} = \lambda_0/6 = 20\text{mm}$, γεγονός που οδήγησε σε εμφανή βελτίωση της συμπεριφοράς της κεραίας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5-7 Μείωση του μήκους του επιπέδου γείωσης

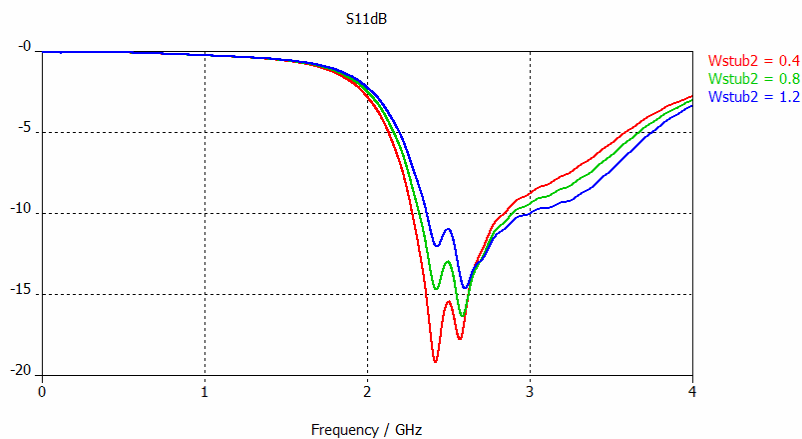
Η κόκκινη καμπύλη είναι για $L_{gnd}=30\text{mm}$, ενώ η πράσινη καμπύλη είναι για $L_{gnd}=20\text{mm}$. Παρακάτω, θα γίνει πιο εκτενής μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης.

Πριν παραθέσουμε τον πίνακα με τα τελικά αποτελέσματα, θα παρουσιάσουμε μία σειρά παραμετρικών μεταβολών για κάποιες από τις παραμέτρους που είχαν κύριο ρόλο στη συμπεριφορά της κεραίας.



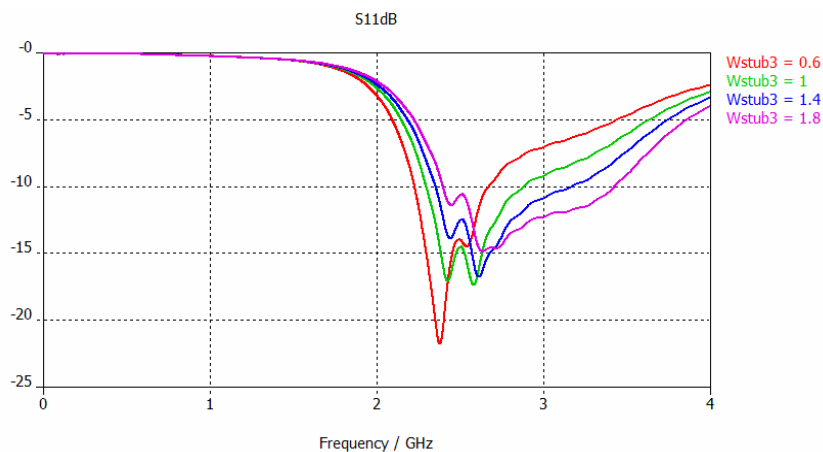
Σχήμα 5-8 Μεταβολή του μήκους του βραχυκυκλωμένου στελέχους και το στελέχους τροφοδοσίας

Η μείωση του μήκους των στελεχών τροφοδοσίας και βραχυκυκλώματος οδηγεί στη χειροτέρευση της προσαρμογής της πρώτης συχνότητας συντονισμού, αλλά έχει μεγαλύτερη θετική επίδραση στην προσαρμογή της δεύτερης συχνότητας συντονισμού. Επιλέγουμε την τιμή $L_{stub2,3}=5.6\text{mm}$, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ισορροπία στους δύο συντονισμούς.



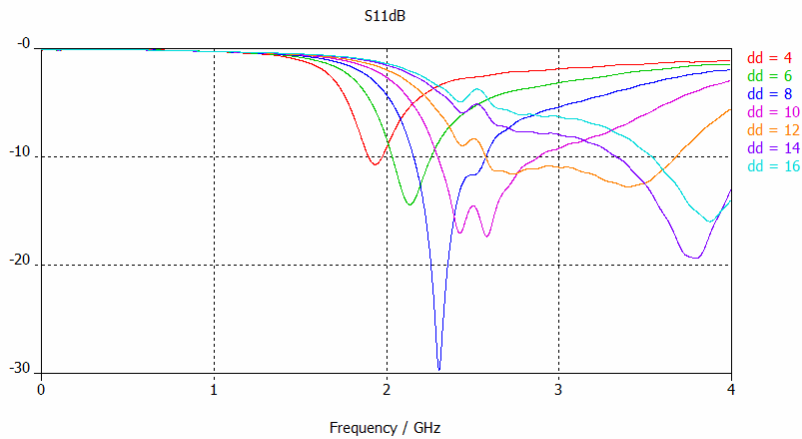
Σχήμα 5-9 Μεταβολή του πλάτους του βραχυκυκλωμένου στελέους

Είναι εμφανής ότι η μείωσή του ευνοεί την προσαρμογή της κεραίας. Γι' αυτό επιλέξαμε την μικρότερη τιμή $W_{stub2}=0.4\text{mm}$, παρόλο που είναι οριακή τιμή για κατασκευαστικούς λόγους.



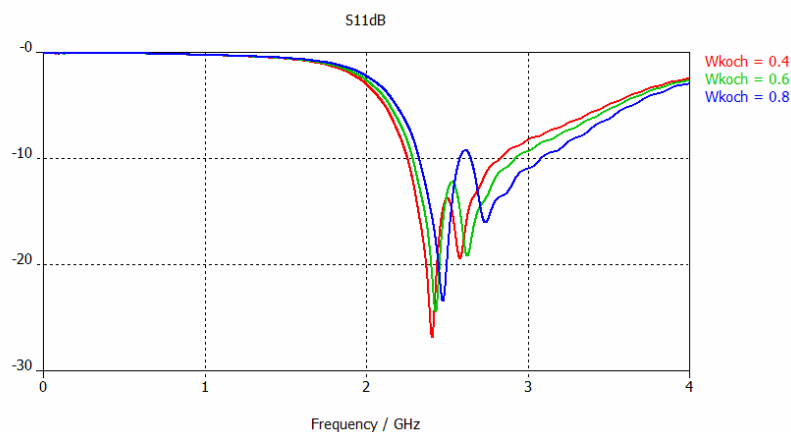
Σχήμα 5-10 Μεταβολή του πλάτους του στελέους τροφοδοσίας

Η αύξηση του πλάτους του στελέους τροφοδοσίας μειώνει την προσαρμογή της κεραίας στη μικρότερη συχνότητα συντονισμού, ενώ επηρεάζει αντίθετα την προσαρμογή στη μεγαλύτερη συχνότητα συντονισμού. Επιλέξαμε την τιμή $W_{stub3}=1\text{mm}$, όπου έχει επιτευχθεί ισορροπία.

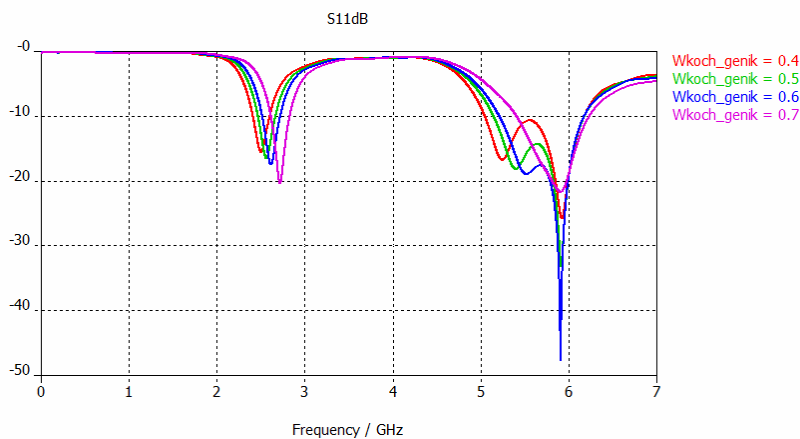


Σχήμα 5-11 Μεταβολή της απόστασης μεταξύ του βραχυκυκλωμένου στελέχους και του στελέχους τροφοδοσίας

Η μελέτη μας άρχισε επιλέγοντας την τιμή για την απόσταση μεταξύ των δύο στελεχών ίση με 10mm και στη συνέχεια προσπαθήσαμε να βελτιώσουμε τη συμπεριφορά της κεραίας βάσει των υπολοίπων παραμέτρων της. Έτσι, όταν στο τέλος, έγινε η παραμετρική μελέτη της απόστασης αυτής παρατηρήσαμε ότι οποιαδήποτε μεταβολή της επηρέαζε δραστικά τη κεραία, καθώς είχε «κλειδώσει» στη τιμή με την οποία είχε γίνει όλη η μελέτη. Γι' αυτό στα επόμενα μοντέλα η μελέτη της κεραίας ξεκινούσε με αυτή την παράμετρο.



Σχήμα 5-12 Μεταβολή του πλάτους της σχισμής



Σχήμα 5-13 Μεταβολή του πλάτους της σχισμής

Τέλος, παραθέτουμε τον πίνακα των τελικών αποτελεσμάτων.

	Ζώνη συχνοτήτων 2-3GHz
f_center (GHz)	2.54
$\overline{e_{rad}}$	91.87%
$\overline{e_{total}}$	80.7%
$e_{totalmax}$	94.06%
Gmax	2.3 (dBi)
BW	571 MHz
FBWν	22.4%
ka	1.28
FoM	1.48 (dB)

Πίνακας 5-2 Τελικά αποτελέσματα

Η απόδοση ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα καλή. Το ηλεκτρικό μέγεθος δυστυχώς είναι μεγάλο και δεν προσεγγίζει την ηλεκτρικά μικρή κεραία.

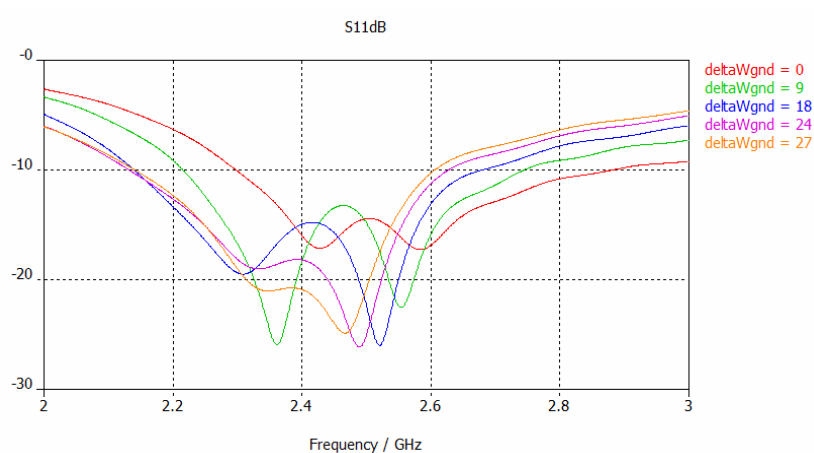
5.2.5 Μελέτη των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης

Η συμβολή του επιπέδου γείωσης ήταν ιδιαίτερα σημαντική για τον καθορισμό της συμπεριφοράς της κεραίας, καθώς αποτελούσε ένα ενεργό τμήμα της κεραίας που συνέβαλε στην ακτινοβολή. Παρακάτω θα αναφερθούμε στον

τρόπο με τον οποίο επηρεάζει τη συμπεριφορά μίας κεραίας η μεταβολή των διαστάσεών του.

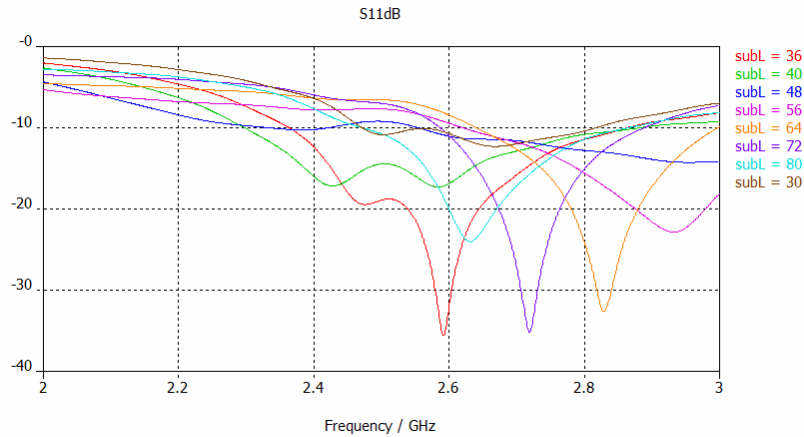
Η αρχική τιμή των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης ήταν $L_{gnd} \times W_{gnd} = 20\text{mm} \times 34.2\text{mm}$. Αρχικά έγινε μελέτη του πλάτους του επιπέδου γείωσης με σταθερή τιμή για το μήκος του και ίση με την αρχική και ομοίως έγινε στη συνέχεια και η μεταβολή του μήκους.

Η μεταβολή του πλάτους γινόταν κατά $\Delta W_{gnd}/2$ από την κάθε πλευρά δεξιά και αριστερά του μονόπολου, ενώ το μήκος του μονόπολου παρέμενε σταθερό.



Σχήμα 5-14 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης για μεταβολή του πλάτους του επιπέδου γείωσης

Παρατηρούμε ότι για αύξηση του πλάτους, δηλαδή για μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου ΔW_{gnd} , οι συχνότητες συντονισμού μετατοπίζονται προς μικρότερες τιμές, ενώ τείνει να εκλείπει ο πρώτος συντονισμός.



Σχήμα 5-15 Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης για μεταβολή του μήκους του επιπέδου γείωσης

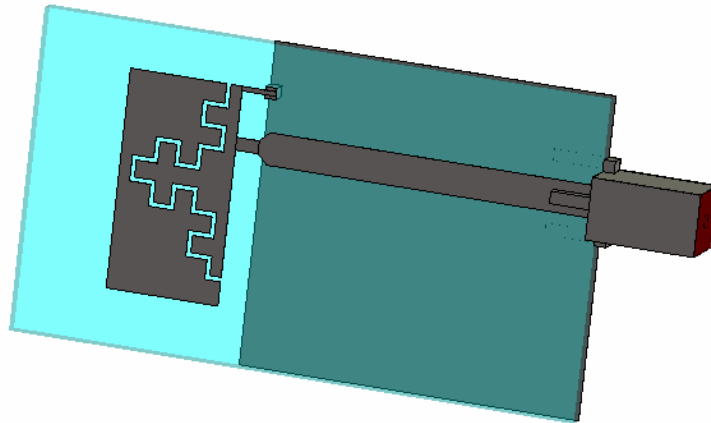
Παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές του μήκους του επιπέδου γείωσης, όπου $L_{gnd} = subL - 20$, εμφανίζεται μόνο ένας συντονισμός. Ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά της κεραίας δίνουν τα μικρά μήκη $L_{gnd} = 16\text{mm}$ και 20mm , κάτι που επιβεβαιώνει το γεγονός, το οποίο ισχυρίζονται πολλοί μελετητές, ότι το επίπεδο γείωσης δεν είναι απαραίτητο να είναι μεγάλο, ώστε η κεραία να εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο, το μήκος του δε θα πρέπει να είναι μικρότερο από το συνολικό πλάτος της κεραίας, δηλαδή θα πρέπει να ισχύει $L_{gnd} \geq W_{stub1} + L_{stub23}$ $L_{gnd} \geq W_{stub1} + L_{stub23}$, όπου θυμίζουμε ότι W_{stub1} είναι το πλάτος του στελέχους του μονόπολου και L_{stub23} είναι το μήκος του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλωμένου στελέχους.

5.3 Single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Το δεύτερο μοντέλο ήταν η single-band ανεστραμμένης F γεωμετρίας με χρήση της σχισμής τύπου γενικευμένης Koch.

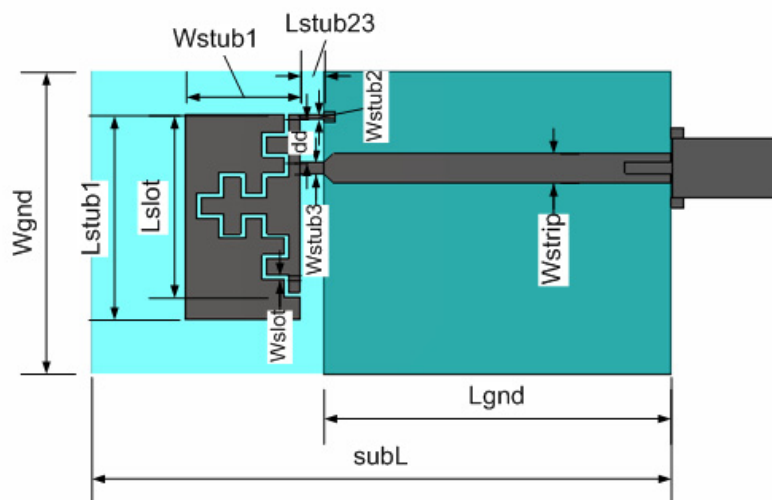
5.3.1 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου

Το μοντέλο της κεραίας παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5-3 Μοντέλο single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο με τις διαστάσεις.



Εικόνα 5-4 Διαστάσεις της single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής.

Παράμετρος	Μήκος (mm)
H	1.55
t	0.0356
Lstub1	19
Wstub1	9.9
Lslot	16.9
Wslot	0.4
Lstub2	2
Wstub2	0.4
Lstub3	2
Wstub3	1.1
dd	4
Wstrip	2.8
Lgnd	30
Wgnd	28
subL	50

Πίνακας 5-3 Τελικές τιμές των παραμέτρων της single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Αυτή τη φορά η μελέτη της απόστασης της του στελέχους τροφοδοσίας και του βραχυκυκλωμένου στελέχους έγινε αρχικά και καταλήξαμε σε μία μικρότερη τιμή, $dd=4\text{mm}$. Το γεγονός αυτό στην επιλογή μικρότερων τιμών και για τις άλλες διαστάσεις, χωρίς αυτό να σημαίνει χειροτέρευση των χαρακτηριστικών της κεραίας. Αντίθετα, οδήγησε σε σμίκρυνση της κεραίας.

Για το επίπεδο γείωσης οι διαστάσεις ήταν $L_{gnd} \times W_{gnd} = 30\text{mm} \times 28\text{mm} = \lambda_0/4 \times \lambda_0/4$.

5.3.2 Διακριτοποίηση (meshing)

Στο μοντέλο της single-band PIFA με σχισμή τύπου Koch ενισχύθηκε τοπικά το πλέγμα διακριτοποίησης στο στέλεχος του μονόπολου, κατά μήκος του στελέχους τροφοδοσίας, κατά μήκος του βραχυκυκλωμένου στελέχους, κατά το

ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος και κατά τη διατομή του διηλεκτρικού υλικού του τετραγωνικού SMA συνδετήρα.

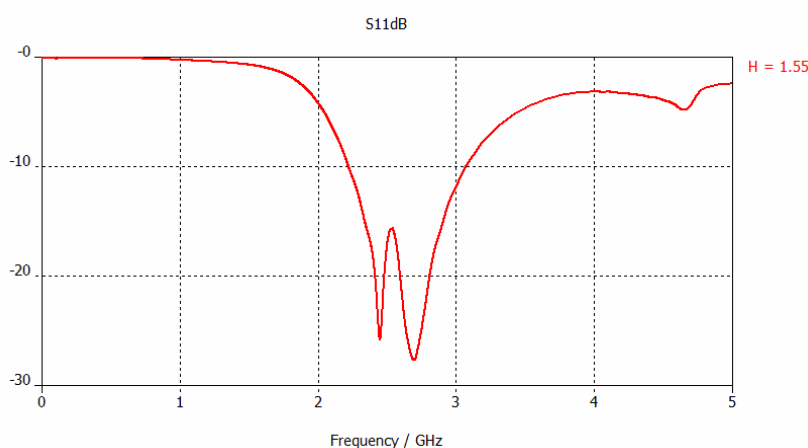
Μετά από την πραγματοποίηση αυτόματης προσαρμογής πλέγματος (adaptive meshing), η σύγκλιση επιτεύχθηκε για adaptive meshing 20/20/50. Ο αριθμός των κελιών Yee ήταν 345.548. Το συγκεκριμένο πλέγμα διακριτοποίησης διατηρήθηκε για όλη τη μελέτη της κεραίας.

5.3.3 Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 0-5 GHz. Οι οριακές συνθήκες στο boundary box τέθηκαν open-add space, και η προσομοίωση για τον ελεύθερο χώρο διάδοσης να γίνεται για απόσταση $\lambda_0/8$ από το μοντέλο της κεραίας, όπου το λ_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος ελεύθερου χώρου για συχνότητα που αντιστοιχεί στο μέσο του διαστήματος προσομοίωσης. Τέλος ο χώρος τερματίστηκε σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες κατά Berenger με αριθμό στρωμάτων PML=4.

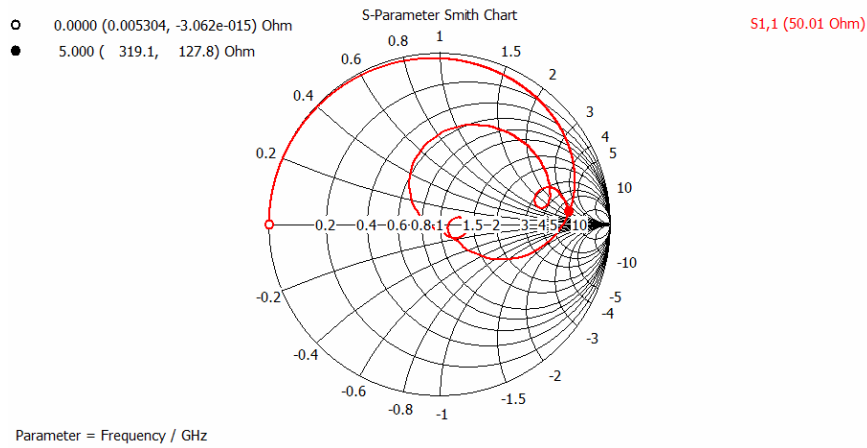
5.3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης.



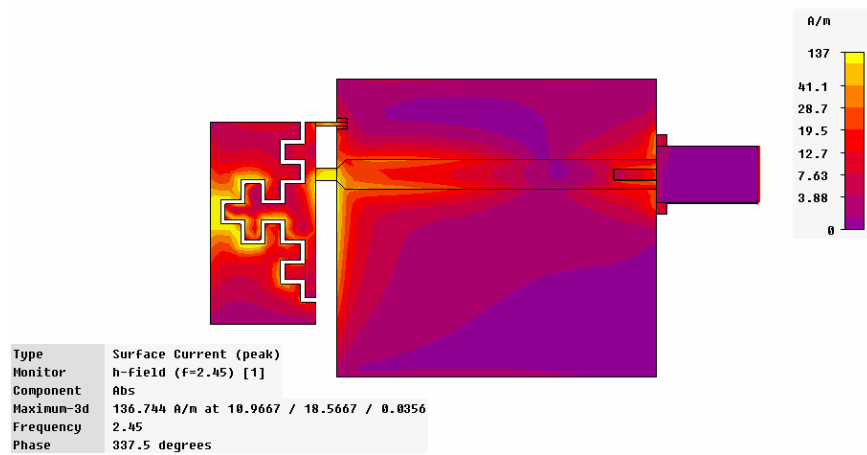
Σχήμα 5-16 Συντελεστής ανάκλασης της single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch.

Η κεραία συντονίζεται στα 2.45 GHz και στα 2.7 GHz. Το εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγάλο και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ζώνης 2-3 GHz.

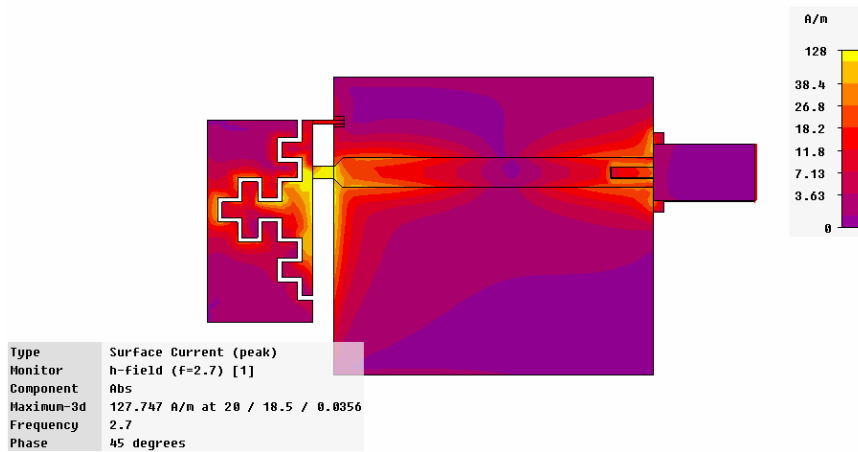


Σχήμα 5-17 Χάρτης Smith της single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού 2.45 GHz

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ρευματικές κατανομές στις δύο συχνότητες συντονισμού. Παρατηρείται η επαγωγή του ρεύματος στο επίπεδο γείωσης.



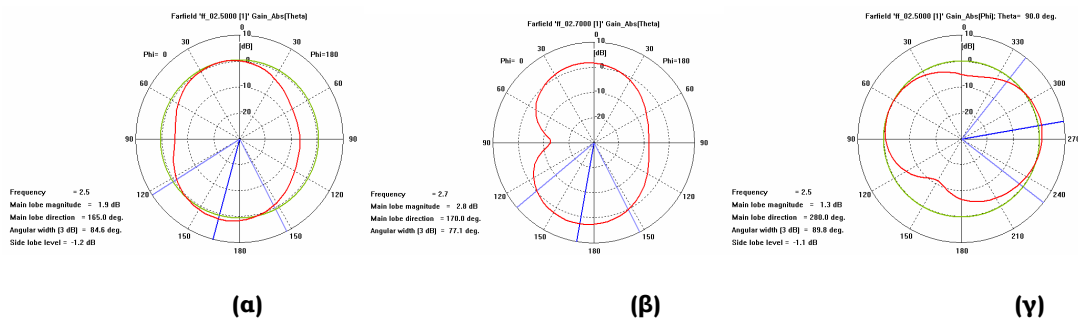
Σχήμα 5-18 Ρευματική κατανομή της single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch στη συχνότητα συντονισμού 2.45 GHz



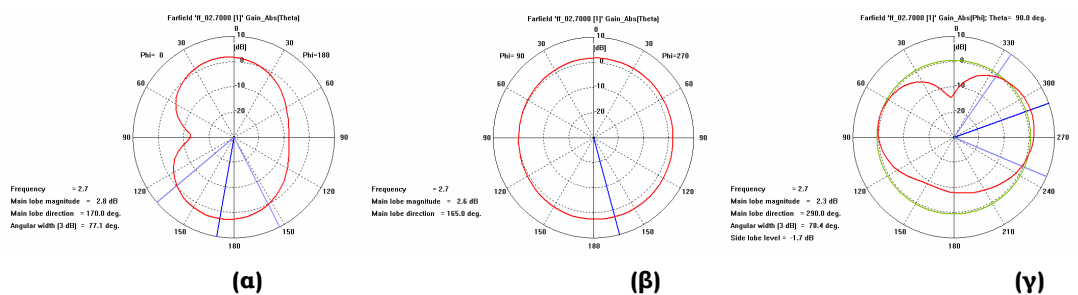
Σχήμα 5-19 Ρευματική κατανομή της single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch στη συχνότητα συντονισμού 2.7 GHz

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα δεν ακολουθεί τη συνολική διαδρομή που ορίζει η σχισμή, αλλά υπερπηδά κάποια από τα επιμέρους τμήματα.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως προς το κέρδος στα επίπεδα XZ, YZ και XY.

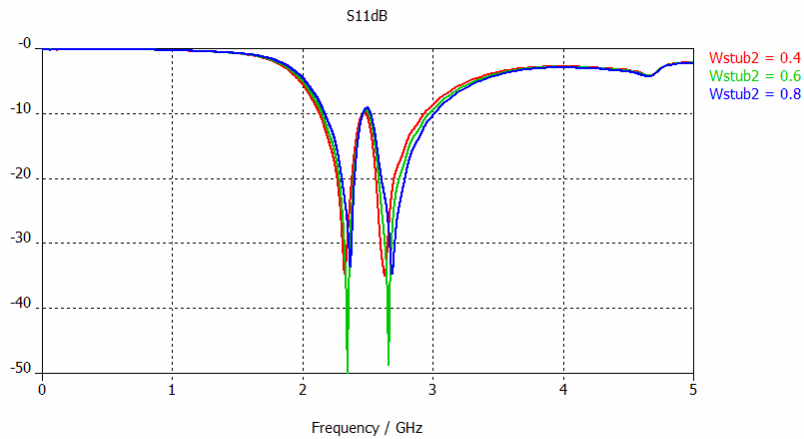


Σχήμα 5-20 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch στη συχνότητα 2.45 GHz



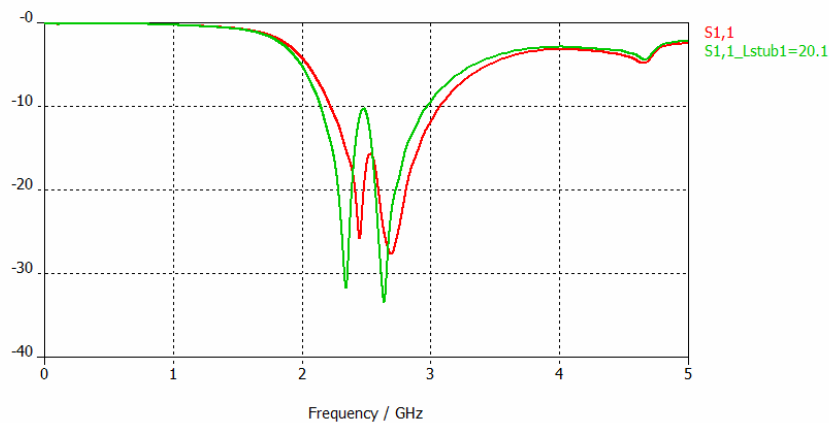
Σχήμα 5-21 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της single-band PIFA με σχισμή τύπου γενικευμένης Koch στη συχνότητα 2.7 GHz

Στη συνέχεια, παραθέτουμε κάποιες παραμετρικές μελέτες.



Σχήμα 5-22 Μεταβολή του πλάτους του βραχυκυκλωμένου στελέχους

Τελικά για τη βελτίωση της προσαρμογής της κεραίας σημαντική ήταν η μείωση του μήκους του μονόπολου από $L_{stub1} = 20.1\text{mm}$ (πράσινη καμπύλη) σε $L_{stub1} = 19\text{mm}$ (κόκκινη καμπύλη) στο Σχήμα 5-23.



Σχήμα 5-23 Μεταβολή του μήκους του μονόπολου L_{stub1}

Τέλος, παραθέτουμε τον πίνακα των τελικών αποτελεσμάτων.

	Ζώνη συχνοτήτων 2-3GHz
f_center (GHz)	2.65
$\overline{e_{rad}}$	89.34%
$\overline{e_{total}}$	81.65%
$\overline{e_{totalmax}}$	91.39%
Gmax	2.6 (dBi)
BW	845 MHz

FBW_v	31.9%
ka	1.4
FoM	2.7 (dB)

Πίνακας 5-4 Τελικά αποτελέσματα

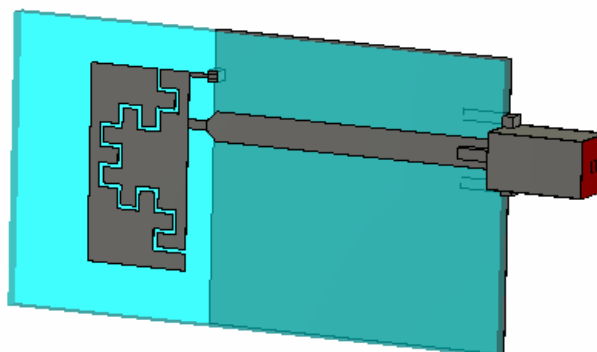
Παρατηρούμε ότι σε σχέση με τη single-band PIFA με σχισμή γενικευμένης Koch, η απόδοση έχει ελαττωθεί, αλλά έχει αυξηθεί κατά πολύ το εύρος ζώνης, όπως και ο παράγοντας απόδοσης.

5.4 Single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Τέλος μελετήσαμε το μοντέλο για τη single-band ανεστραμμένης F γεωμετρίας με χρήση της δυαδικής σχισμής τύπου γενικευμένης Koch.

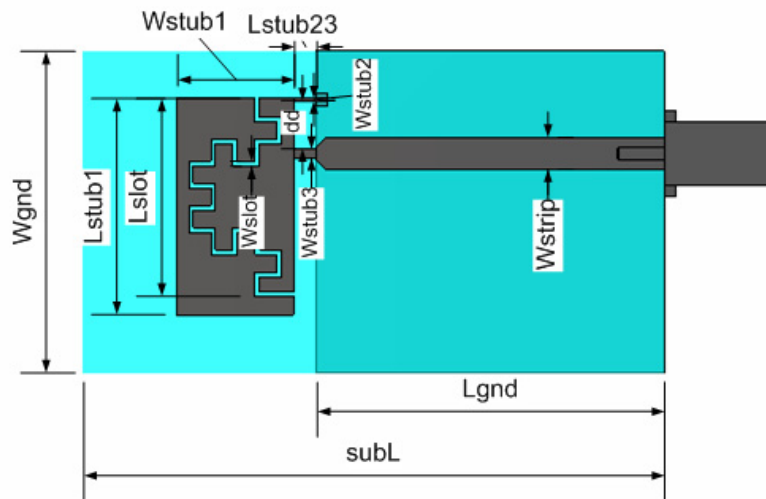
5.4.1 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου

Το μοντέλο της κεραίας παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5-5 Μοντέλο single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο με τις διαστάσεις.



Εικόνα 5-6 Διαστάσεις της single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής.

Παράμετρος	Μήκος (mm)
H	1.55
t	0.0356
Lstub1	18.7
Wstub1	10
Lslot	17.1
Wslot	0.4
Lstub2	1.9
Wstub2	0.4
Lstub3	1.9
Wstub3	0.9
dd	4
Wstrip	2.8
Lgnd	30
Wgnd	27.7
subL	50

Πίνακας 5-5 Τελικές τιμές των παραμέτρων της single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch

Οι περισσότερες τιμές των κρίσιμων παραμέτρων ήταν κοντά στις τιμές της προηγούμενης κεραίας. Γι' αυτό η παραμετρική μελέτη δεν έδειξε κάτι διαφορετικό.

Για το επίπεδο γείωσης οι διαστάσεις ήταν $L_{gnd} \times W_{gnd} = 30\text{mm} \times 27.7\text{mm} = \lambda_0/4 \times \lambda_0/4$.

5.4.2 Διακριτοποίηση (meshing)

Στο μοντέλο της single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου Koch ενισχύθηκε τοπικά το πλέγμα διακριτοποίησης στο στέλεχος του μονόπολου, κατά μήκος του στελέχους τροφοδοσίας, κατά μήκος του βραχυκυκλωμένου στελέχους, κατά το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος και κατά τη διατομή του διηλεκτρικού υλικού του τετραγωνικού SMA συνδετήρα.

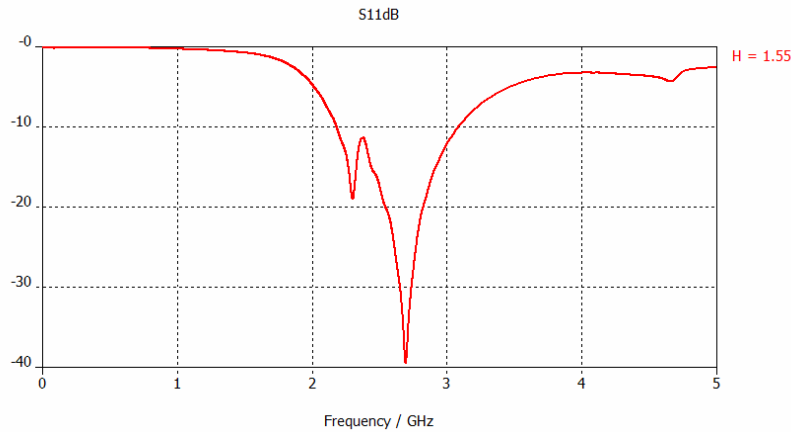
Μετά από την πραγματοποίηση αυτόματης προσαρμογής πλέγματος (adaptive meshing), η σύγκλιση επιτεύχθηκε για adaptive meshing 20/20/50. Ο αριθμός των κελιών Yee ήταν 353.584. Το συγκεκριμένο πλέγμα διακριτοποίησης διατηρήθηκε για όλη τη μελέτη της κεραίας.

5.4.3 Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 0-5 GHz. Οι οριακές συνθήκες στο boundary box τέθηκαν open-add space, και η προσομοίωση για τον ελεύθερο χώρο διάδοσης να γίνεται για απόσταση $\lambda_0/8$ από το μοντέλο της κεραίας, όπου το λ_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος ελεύθερου χώρου για συχνότητα που αντιστοιχεί στο μέσο του διαστήματος προσομοίωσης. Τέλος ο χώρος τερματίστηκε σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες κατά Berenger με αριθμό στρωμάτων PML=4.

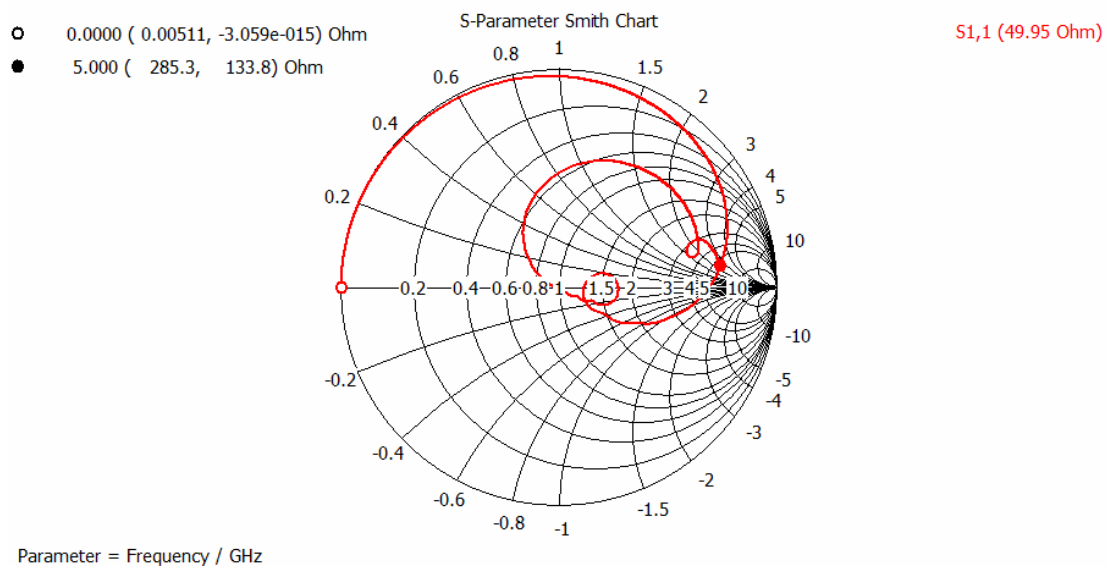
5.4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης.



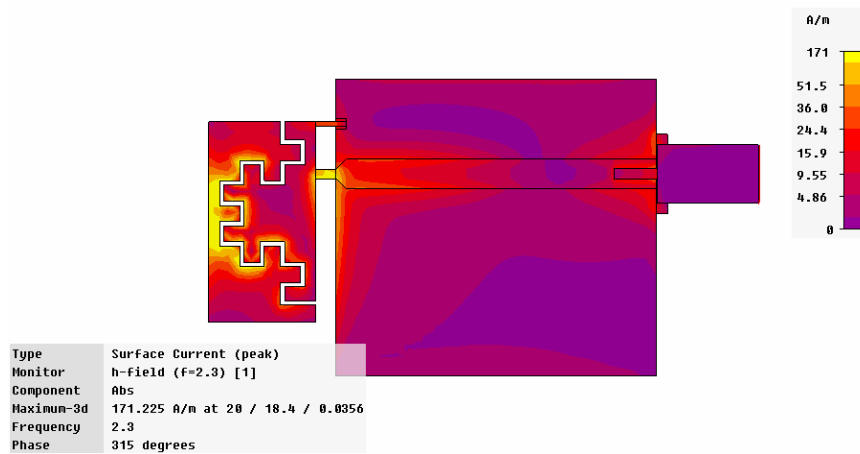
Σχήμα 5-24 Συντελεστής ανάκλασης της single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch.

Η κεραία συντονίζεται στα 2.3 GHz και στα 2.7 GHz. Το εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγάλο και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ζώνης 2-3 GHz, ωστόσο η προσαρμογή της κεραίας δεν είναι πολύ καλή σε όλη τη ζώνη.

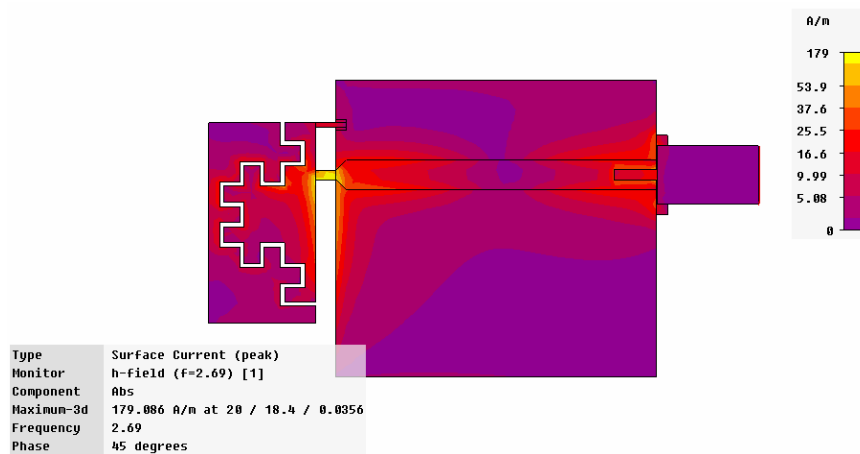


Σχήμα 5-25 Χάρτης Smith της single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch με αναφορά στην είσοδο της κεραίας

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ρευματικές κατανομές στις δύο συχνότητες συντονισμού. Παρατηρείται η ισχυρή επαγωγή του ρεύματος στο επίπεδο γείωσης.



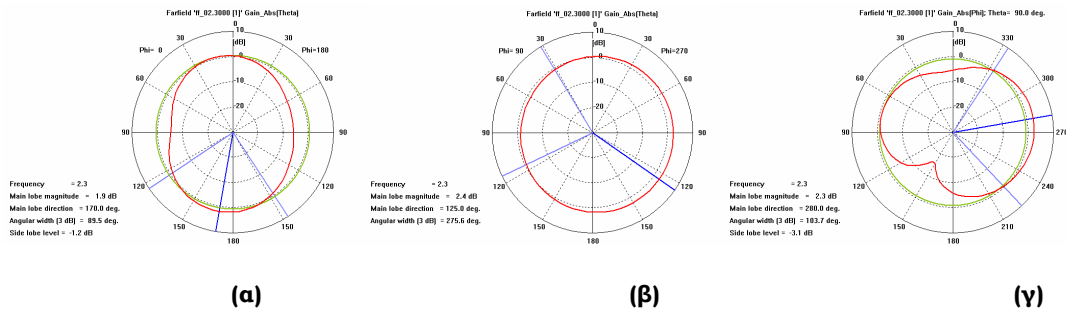
Σχήμα 5-26 Ρευματική κατανομή της single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch στη συχνότητα συντονισμού 2.3 GHz



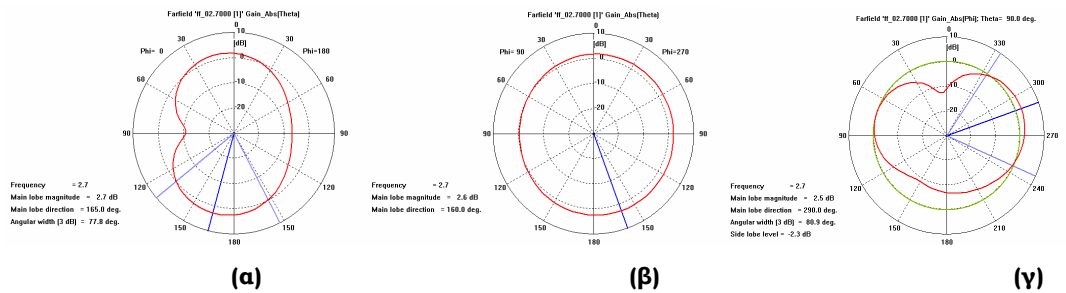
Σχήμα 5-27 Ρευματική κατανομή της single-band PIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch στη συχνότητα συντονισμού 2.7 GHz

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα δεν ακολουθεί τη συνολική διαδρομή που ορίζει η σχισμή, αλλά υπερπηδά κάποια από τα επιμέρους τμήματα.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως προς το κέρδος στα επίπεδα XZ, YZ και XY.

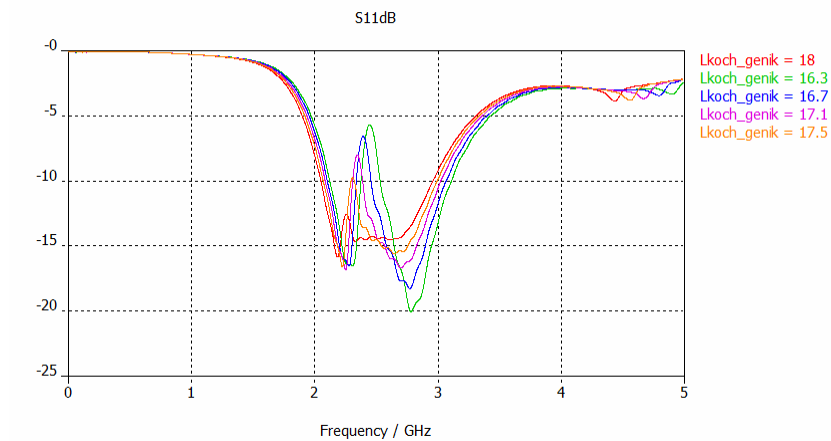


Σχήμα 5-28 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\phi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\phi=90^\circ$) και γ) XY (ϕ για $\theta=90^\circ$) της single-band RIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch στη συχνότητα 2.3 GHz

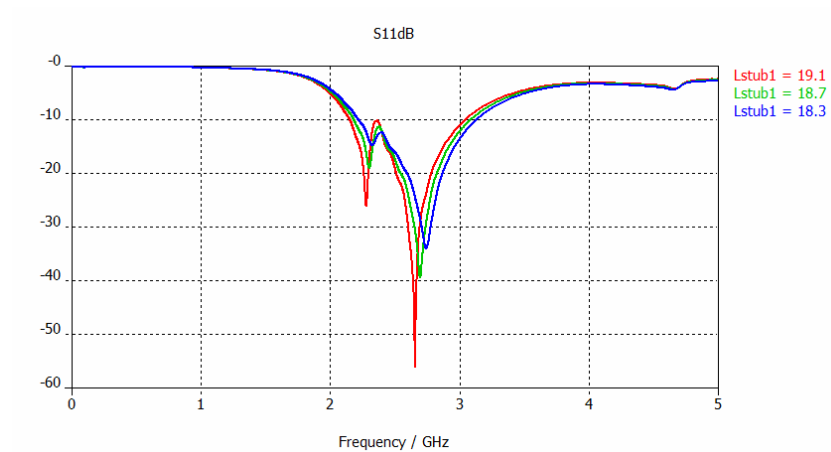


Σχήμα 5-29 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\phi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\phi=90^\circ$) και γ) XY (ϕ για $\theta=90^\circ$) της single-band RIFA με δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch στη συχνότητα 2.7 GHz

Στη συνέχεια, παραθέτουμε κάποιες παραμετρικές μελέτες. Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι τιμές των κρίσιμων παραμέτρων δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά και η συμπεριφορά τους ήταν όμοια με αυτή στην single-band RIFA με γενικευμένη σχισμή Koch. Η βελτίωση τόσο για τους συντονισμούς όσο και για την προσαρμογή της κεραίας σε όλη τη ζώνη 2-3 GHz, έτσι ώστε ο συντελεστής ανάκλασης να λαμβάνει τιμή μικρότερη των -10dB για μεγάλο εύρος συχνοτήτων στη ζώνη αυτή, προέκυψε από τις μεταβολές των μηκών της σχισμής και του μονόπολου.



Σχήμα 5-30 Μεταβολή του μήκους της οπισμής



Σχήμα 5-31 Μεταβολή του μήκους του μονόπολου Lstub1

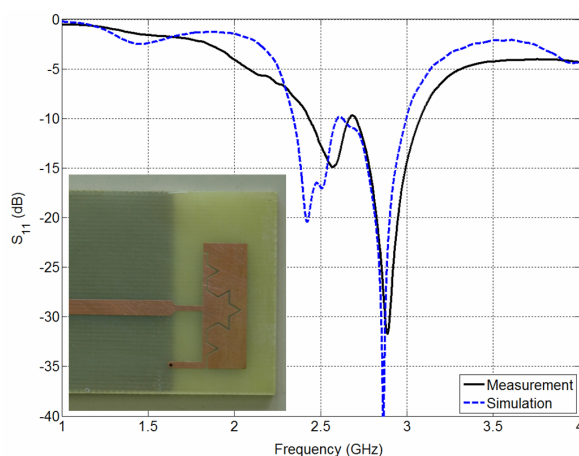
Τέλος, παραθέτουμε τον πίνακα των τελικών αποτελεσμάτων.

	Ζώνη συχνοτήτων 2-3GHz
f_center (GHz)	2.64
$\overline{e_{rad}}$	90.37%
$\overline{e_{total}}$	83.62%
$e_{totalmax}$	92.1%
Gmax	2.6 (dBi)
BW	897 MHz
FBWv	34%
ka	1.39
FoM	3.12 (dB)

Το εύρος ζώνης αυξήθηκε ακόμη περισσότερο σε σχέση με τις άλλες δύο κεραιές. Ωστόσο η απόδοση ακτινοβολίας μειώθηκε. Το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραιάς είναι περίπου ίσο και με των άλλων δύο κεραιών.

5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

Έχει γίνει η κατασκευή των μοντέλων single-band PIFA με σχισμή L και Koch. Ακολουθεί το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης βάσει των οποίων γίνεται η σύγκριση, μόνο για την dual-band PIFA με σχισμή Koch.



Σχήμα 5-32 Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και αυτών που προέκυψαν από μετρήσεις της κεραιάς σε ανηχοϊκό θάλαμο.

Η σύγκριση έδειξε ότι υπάρχει συμφωνία των αποτελεσμάτων σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Οι αποκλίσεις οφείλονται αφενός στο γεγονός ότι υπήρχε διαφορά στα χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού υλικού του υποστρώματος με βάση του οποίου έγιναν οι προσομοιώσεις και με αυτού του PCB. Υπήρξε μία μετατόπιση της τάξης του 5% στη μικρή συχνότητα. Η μετατόπιση αυτή οφείλεται αφενός στο διηλεκτρικό υλικό του υποστρώματος, αφετέρου στο διηλεκτρικό του συνδετήρα, το Teflon στην προκειμένη περίπτωση, για το οποίο δεν έχουμε ιδιαίτερα ακριβείς λεπτομέρειες, ώστε να γίνει σωστή προσομοίωσή του.

6. Κυκλική κεραία ανεστραμμένης F γεωμετρίας με κυκλικό επίπεδο γείωσης

6.1 Εισαγωγή

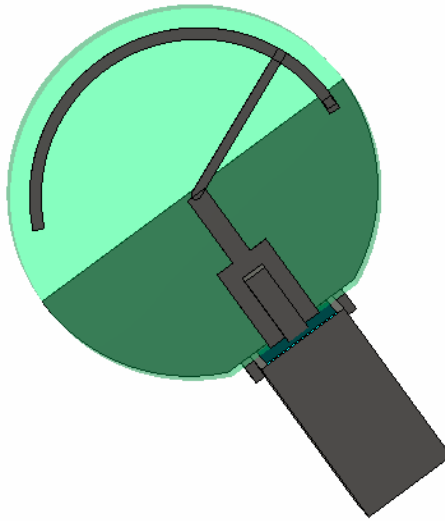
Η κατασκευή του τελευταίου μοντέλου της κεραίας που μελετήσαμε βασίστηκε στον τρόπο λειτουργίας των κεραιών ανεστραμμένης F γεωμετρίας. Η σχεδίασή της ήταν μία επέκταση του τυπωμένου ανεστραμμένου μονόπολου $\lambda_0/4$ σε κυκλικό υπόστρωμα, με κυκλικό επίπεδο γείωσης, με σκοπό να ενσωματωθεί και να χρησιμοποιηθεί σε κυκλικούς ανιχνευτές αρκετά μικρού μεγέθους.

Ο σκοπός αυτής της κεραίας (Circular PIFA-Circular ground plane) ήταν να συντονίσει στα 2.5 GHz με ένα επιθυμητό εύρος ζώνης, κοντά ή άνω των 100 MHz. Ωστόσο, ο πρωταρχικός στόχος ήταν η δημιουργία μίας κεραίας με ηλεκτρικό μέγεθος όσο το δυνατόν πιο κοντά στο αντίστοιχο μιας ηλεκτρικά μικρής κεραίας, δηλαδή το μέγεθος ka να προσεγγίσει το 0.5. Χάριν της επίτευξης του ηλεκτρικά μικρού μεγέθους, το εύρος ζώνης γνωρίζαμε ότι θα κυμαινόταν σε αρκετά μικρές τιμές, γεγονός το οποίο ήμασταν έτοιμοι να το αποδεχτούμε.

Το επίπεδο γείωσης καταλάμβανε την ημικυκλική επιφάνεια στο κάτω μέρος του διηλεκτρικού υποστρώματος, όντας αντιδιαμετρικά τυπωμένο σε σχέση με την κεραία. Και σε αυτή την περίπτωση συνέβαλε σαν ενεργή διάταξη στην ακτινοβολία της κεραίας.

6.2 Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο της κυκλικής PIFA παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 6-1 Μοντέλο της κυκλικής PIFA

Η ολοκληρωμένη διάταξη της κεραίας έχει τυπωθεί σε κυκλικό υπόστρωμα πάχους $H=1.63\text{mm}$, με διηλεκτρικό υλικό TRF-45 της Taconic, το οποίο χαρακτηρίζεται από διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.38$ και απώλειες που εκφράζονται μέσω του μεγέθους εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta = 0.00284$. Και σε αυτό το μοντέλο η τροφοδοσία γίνεται μέσω μικροταινίας, η οποία συνδέεται με τον τετραγωνικό SMA συνδετήρα, που μελετήθηκε στο κεφάλαιο 2, το διηλεκτρικό του οποίου είναι το Teflon PTFE με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 2$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0.0003$. Το πλάτος της μικροταινίας παραμένει σταθερό και ισούται με $W_{\text{strip}}=3.1\text{mm}$, το οποίο καθορίστηκε, έτσι ώστε να υπάρχει προσαρμογή ανάμεσα σε αυτή και τον συνδετήρα.

Μία σύντομη περιγραφή του μοντέλου είναι η εξής. Καταρχήν οι δύο κύκλοι που καθορίζουν το υπόστρωμα και το τόξο της κεραίας είναι ομόκεντροι. Η ακτίνα του υποστρώματος και του επιπέδου γείωσης (εξωτερική ακτίνα) είναι λίγο μεγαλύτερη από την ακτίνα που καθορίζει το τόξο της κεραίας, καθαρά για κατασκευαστικούς λόγους, αφού το στέλεχος της κεραίας δε γίνεται να τυπωθεί ακριβώς στην άκρη του υποστρώματος. Επιλέξαμε η διαφορά τους να είναι η ελάχιστη δυνατή ίση με 1mm . Το στέλεχος που ενώνει την μικροταινία με το μονόπολο αποτελεί το στέλεχος τροφοδοσίας της κεραίας και έχει τη δυνατότητα να μετατοπίζεται αριστερά και δεξιά στη περιφέρεια του τόξου της κεραίας, μεταβάλλοντας μία γωνία. Το τόξο της κεραίας καθορίζεται από μία άλλη γωνία και ανάλογα μπορεί να αυξομειώνεται. Με την αύξησή του το

ανοιχτοκυκλωμένο άκρο της κεραίας προσεγγίζει το επίπεδο γείωσης, κάνοντας την αντίσταση εισόδου περισσότερο χωρητική.

Το στέλεχος τροφοδοσίας ουσιαστικά διαχωρίζει το τόξο της κεραίας σε δύο τμήματα. Το τμήμα στα δεξιά του έχει το ρόλο του βραχυκυκλωμένου στελέχους ενώ το τμήμα στα αριστερά του έχει το ρόλο του ανεστραμμένου μονόπολου, κάνοντας μία αντιστοιχία με τη γεωμετρία της κλασικής PIFA. Επίσης είναι φανερή η γεωμετρία του επιπέδου γείωσης.

Τέλος, το άκρο του υποστρώματος, στο σημείο που ενώνεται ο συνδετήρας με τη μικροταινία, έχει τετραγωνιστεί έτσι ώστε ο συνδετήρας να είναι σε απόλυτη επαφή με το υπόστρωμα και τη μικροταινία.

6.3 Καθορισμός της ακτίνας a της νοητής σφαίρας για τον υπολογισμό του μεγέθους ka

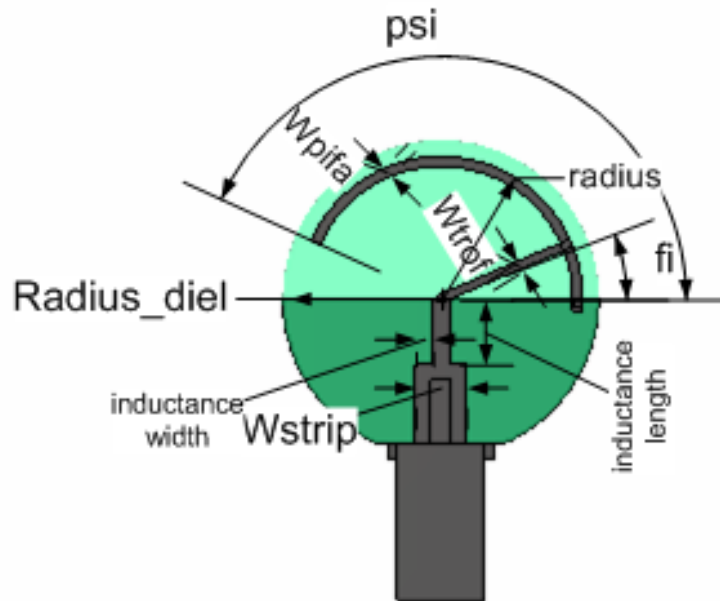
Σε αυτή την κεραία είναι φανερό ότι η ακτίνα a θα ταυτίζεται με την ακτίνα του υποστρώματος. Με αυτό τον τρόπο θα καλύπτεται και η κεραία και το επίπεδο γείωσης. Έτσι, η εξάρτηση του ηλεκτρικού μεγέθους ka και της ακτίνας του υποστρώματος είναι άμεση. Άρα για να επιτευχθεί $ka=0.5$ θα πρέπει

$$ka = \frac{2\pi}{\lambda_0} \times \text{radius_diel} = 0.5 \quad (6.1)$$

με $\lambda_0 = \frac{c}{f_{\text{res}}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/sec}}{2.5 \text{ GHz}} = 120 \text{ mm}$, άρα συνεπάγεται ότι η ακτίνα του υποστρώματος θα πρέπει να ισούται με $\text{radius_diel} = 9.5 \text{ mm}$.

6.4 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μοντέλου

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μοντέλο της κεραίας με τις διαστάσεις της.



Εικόνα 6-2 Διαστάσεις της κυκλικής PIFA

όπου

radius : η ακτίνα του κύκλου που καθορίζει το τόξο του μονόπολου

radius_diel : η ακτίνα του κύκλου του υποστρώματος

fi : η γωνία μετατόπισης του στελέχους τροφοδοσίας

psi : η γωνία που καθορίζει το μήκος του τόξου του μονόπολου της κεραίας

Wtref : το πλάτος του στελέχους τροφοδοσίας

Wpifa : το πλάτος του τόξου του μονόπολου

Wstrip : το πλάτος της μικροταινίας

inductance_length : το μήκος του τμήματος εκλέπτυνσης της μικροταινίας

inductance_width : το πλάτος εκλέπτυνσης του τμήματος της μικροταινίας

Παρατηρούμε ότι οι παράμετροι και άρα και οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου είναι πολύ λιγότεροι σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα PIFA που μελετήσαμε στα δύο προηγούμενα κεφάλαια.

Παρακάτω παραθέτουμε τον πίνακα με τις τελικές διαστάσεις του μοντέλου.

Παράμετρος	Τιμές
H (mm)	1.63
t (mm)	0.0356
radius (mm)	8.6

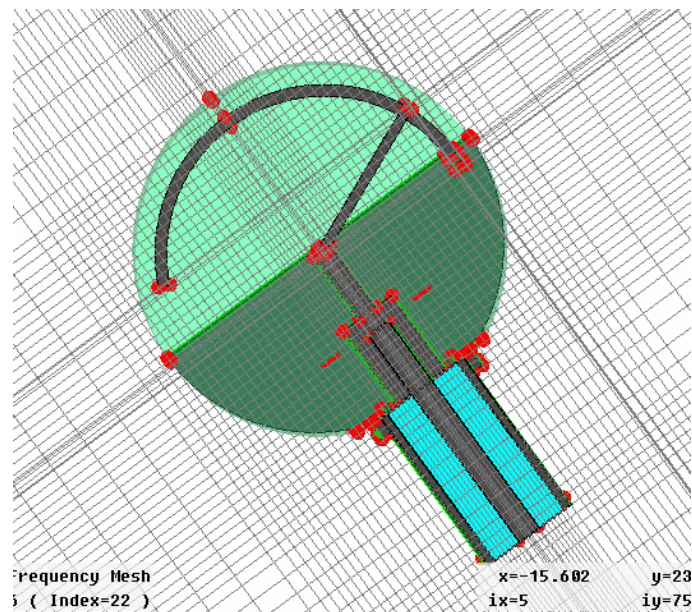
radius_diel (mm)	9.6
fi (μοίρες)	23°
psi (μοίρες)	154°
Wtrof (mm)	0.5
Wpifa (mm)	0.6
Wstrip (mm)	3.1
inductance_length(mm)	4
inductance_width (mm)	1

Πίνακας 6-1 Τελικές διαστάσεις μοντέλου

6.5 Διακριτοποίηση (Meshing)

Σε αυτή την κεραία η διακριτοποίηση είναι πολύ σημαντική διότι έχουμε να κάνουμε με κυκλικές επιφάνειες, οι οποίες δεν μπορούν να προσεγγιστούν πολύ καλά από τα εξαεδρικού τύπου κελιά Yee.

Απαραίτητη ήταν η τοπική ενίσχυση του πλέγματος διακριτοποίησης κατά μήκος και πλάτος της μικροταινίας, κατά μήκος και πλάτος του τόξου της κεραίας , κατά το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος και κατά τη διατομή του διηλεκτρικού υλικού του τετραγωνικού SMA συνδετήρα.



Εικόνα 6-3 Πλέγμα διακριτοποίησης

Μετά από την πραγματοποίηση αυτόματης προσαρμογής πλέγματος (adaptive meshing), η σύγκλιση επιτεύχθηκε για adaptive meshing 20/20/50. Ο αριθμός των κελιών Yee ήταν 264.966. Το συγκεκριμένο πλέγμα διακριτοποίησης διατηρήθηκε για όλη τη μελέτη της κεραίας.

6.6 Λοιπές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 0-4 GHz. Οι οριακές συνθήκες στο boundary box τέθηκαν open-add space, και η προσομοίωση για τον ελεύθερο χώρο διάδοσης να γίνεται για απόσταση $\lambda_0/8$ από το μοντέλο της κεραίας, όπου το λ_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος ελεύθερου χώρου για συχνότητα που αντιστοιχεί στο μέσο του διαστήματος προσομοίωσης. Τέλος ο χώρος τερματίστηκε σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες κατά Berenger με αριθμό στρωμάτων PML=4.

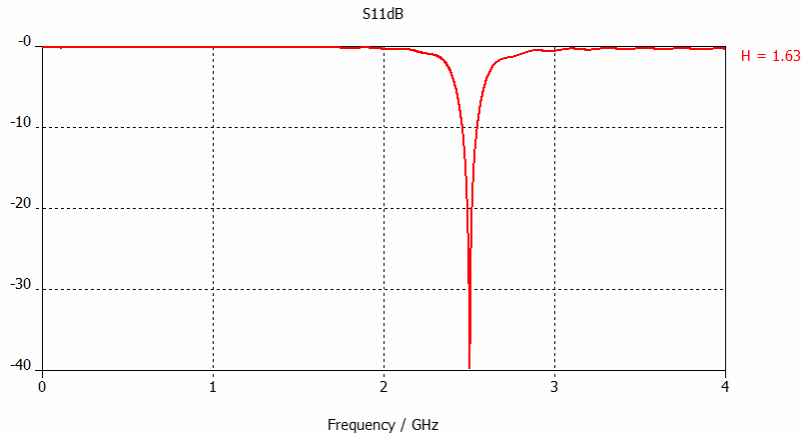
6.7 Διεξαγωγή της μελέτης της κεραίας C-PIFA

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων θα γίνει μία σύντομη αναφορά στη διαδικασία διεξαγωγής της μελέτη αυτής της κεραίας.

Πρώτος στόχος ήταν να επιτευχθεί ο συντονισμός στα 2.5 GHz. Σκεπτόμενοι με βάση τη γεωμετρία της κλασικής PIFA αποφασίσαμε ότι το τόξο δεξιά του στελέχους τροφοδοσίας, που αντιπροσωπεύει το μήκος του βραχυκυκλωμένου στελέχους στην κλασική PIFA, θα έπρεπε να είναι περίπου ίσο με το μήκος του στελέχους τροφοδοσίας που είναι ίσο με την ακτίνα του τόξου του μονόπολου. Αυτό σημαίνει ότι το μήκος του τόξου δεξιά της τροφοδοσίας θα έπρεπε να ισούται με π rad, άρα η τιμή της γωνίας ϕ θα έπρεπε να είναι ίση με 57° περίπου. Για αυτή την τιμή ο συντονισμός επιτεύχθη για γωνία $\psi=135^\circ$. Με αυτές τις αρχικές τιμές συνεχίστηκε η μελέτη για την επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων.

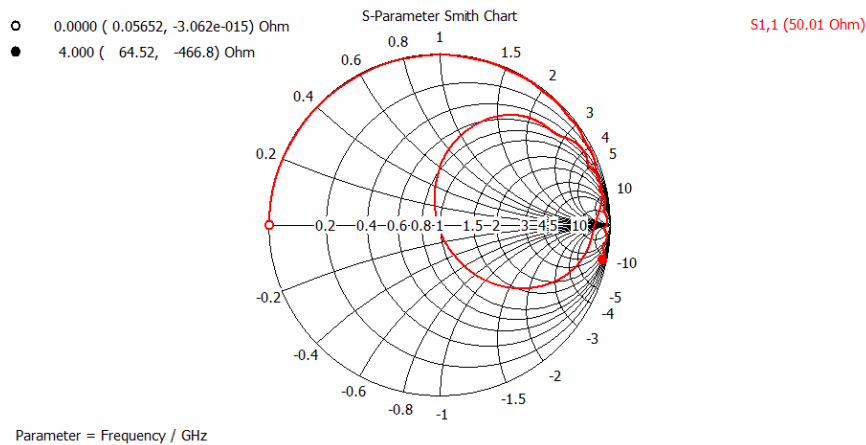
6.8 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά, παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης.



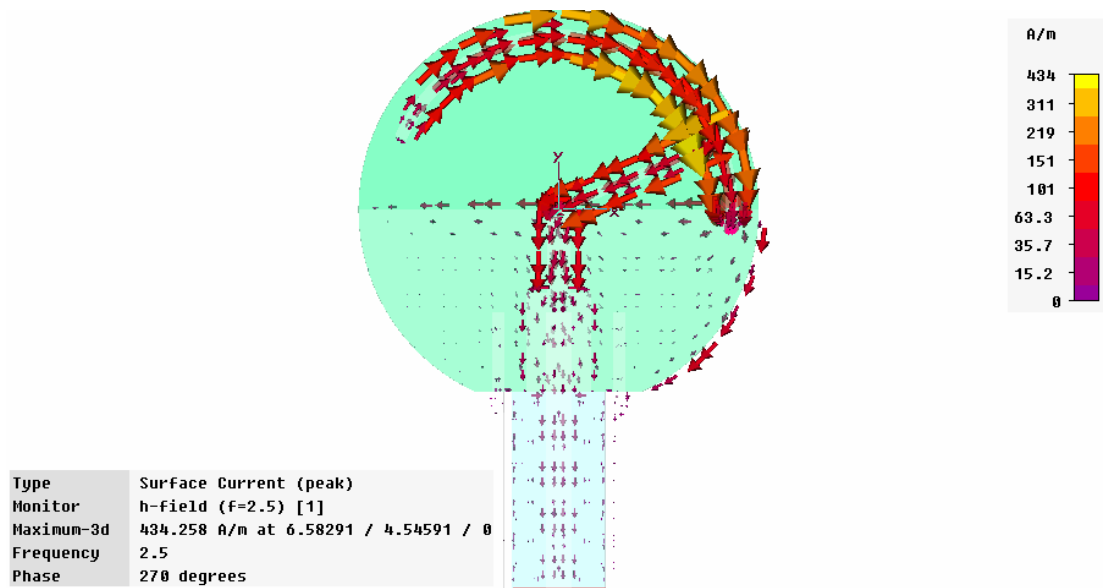
Σχήμα 6-1 Συντελεστής ανάκλασης της κυκλικής PIFA

Επιτυγχάνεται συντονισμός στα 2.5 GHz, ωστόσο λόγω του μικρού μεγέθους το εύρος ζώνης, ώστε ο συντελεστής ανάκλασης να είναι κάτω των -10dB είναι μικρό.



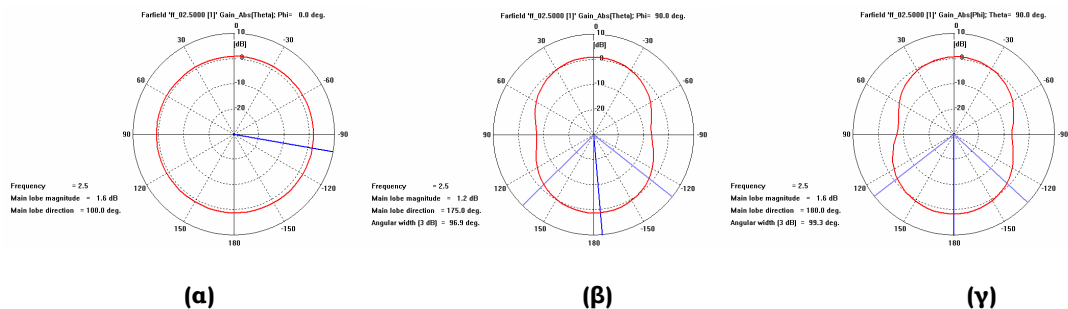
Σχήμα 6-2 Χάρτης Smith της κυκλικής PIFA με αναφορά στην είσοδο της κεραίας

Ακολουθεί η ρευματική κατανομή.



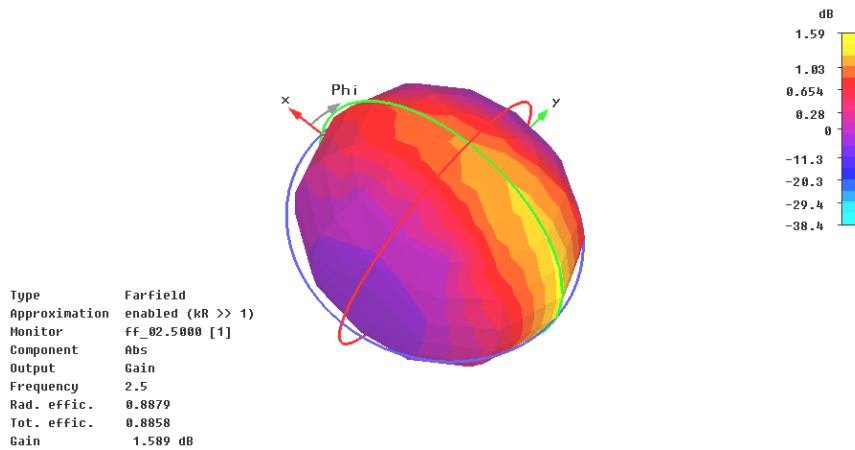
Σχήμα 6-3 Ρευματική κατανομή στα 2.5 GHz

Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως προς το κέρδος στα επίπεδα XZ, YZ και XY.



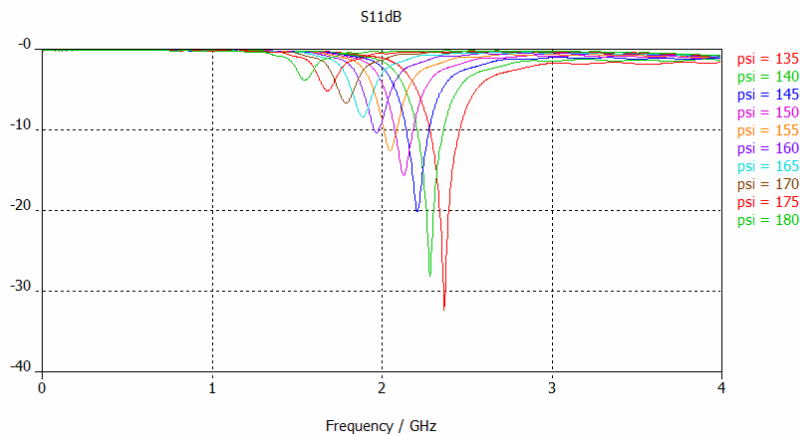
Σχήμα 6-4 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο: α) XZ (θ για $\varphi=0^\circ$) β) YZ (θ για $\varphi=90^\circ$) και γ) XY (φ για $\theta=90^\circ$) της κυκλικής PIFA στη συχνότητα 2.5 GHz

Καθώς και το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας.



Σχήμα 6-5 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας

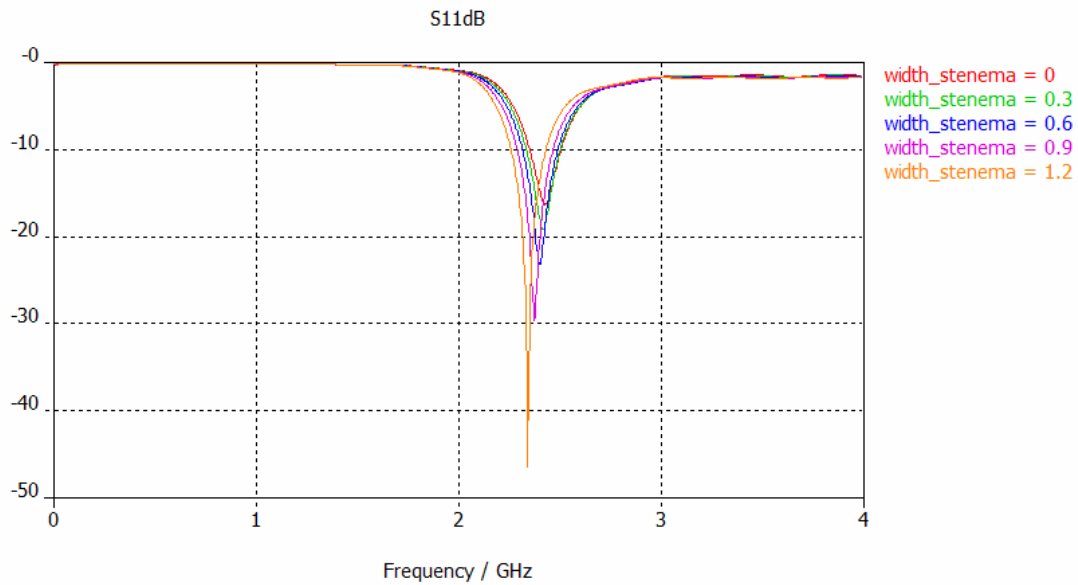
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποιες από τις παραμετρικές μελέτες που κάναμε για τις διάφορες παραμέτρους, που μας οδήγησαν στην εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά της κεραίας.



Σχήμα 6-6 Μεταβολή της γωνίας psi

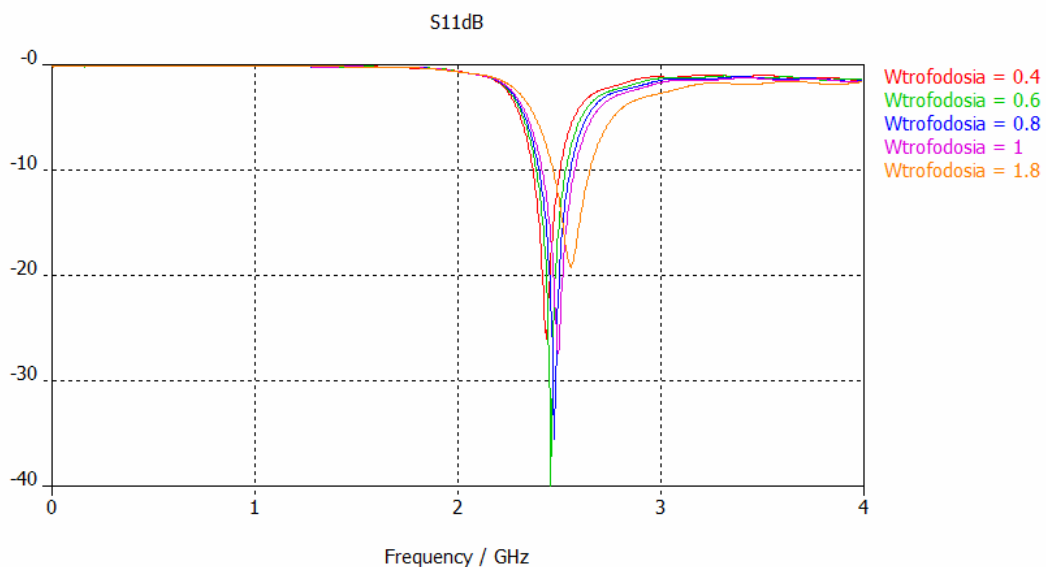
Η γωνία psi είναι αυτή που καθορίζει το μήκος του μονόπολου. Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι με αύξησή της προς την οριακή τιμή των 180° η συχνότητα συντονισμού μετατοπίζεται προς μικρότερες τιμές, ενώ παράλληλα χειροτερεύει η προσαρμογή της κεραίας συνεχώς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ανοικτοκυκλωμένο άκρο της κεραίας πλησιάζει πολύ κοντά στο επίπεδο γείωσης και έτσι η αντίσταση εισόδου της κεραίας γίνεται όλο και πιο χωρητική.

Αυτό όπως είχαμε δει και στα προηγούμενα μοντέλα κεραίων αντισταθμίζεται από το στένεμα τμήματος της μικροταινίας προς το άκρο της τροφοδοσίας.



Σχήμα 6-7 Μελέτη του πλάτους λέπτυνσης της μικροταινίας

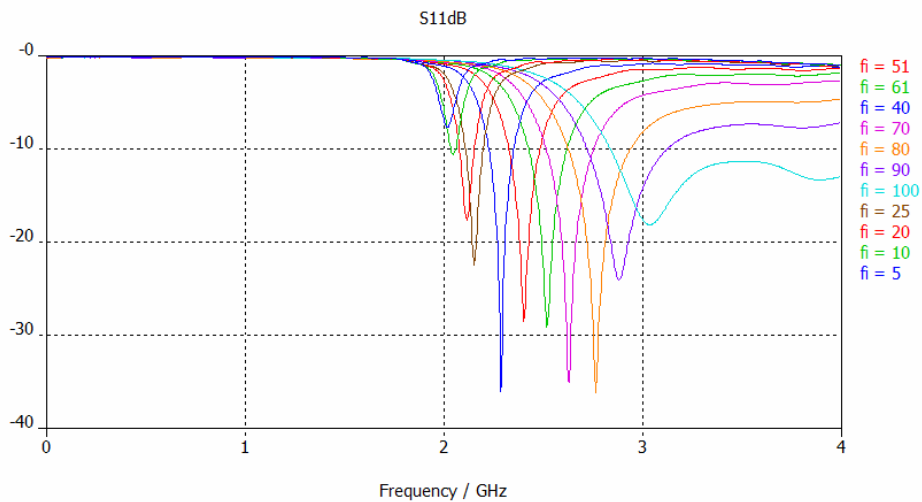
Παρατηρούμε ότι όσο περισσότερο μειώνεται το πάχος της μικροταινίας η προσαρμογή της κεραίας συνεχώς βελτιώνεται. Επιλέξαμε την τιμή $inductance_width = 1\text{mm}$.



Σχήμα 6-8 Μελέτη του πλάτους του στελέχους τροφοδοσίας

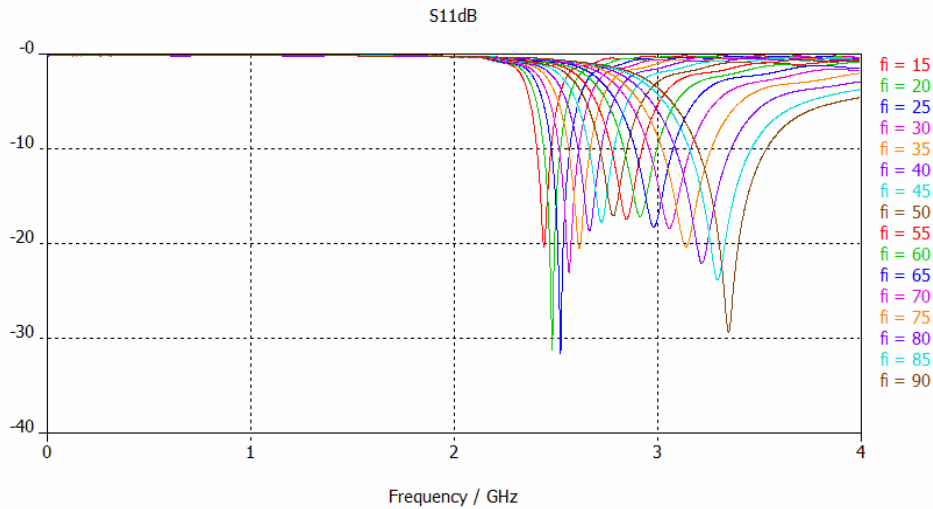
Οι πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες τιμές του πλάτους του στελέχους τροφοδοσίας επιδρούν αρνητικά στην προσαρμογή της κεραίας και άρα και στο συντελεστή ανάκλασης. Επιλέξαμε την καλύτερη ενδιάμεση τιμή, $Wtrofodossia=0.5\text{mm}$.

Στη συνέχεια, θέλαμε να δούμε πώς επιδρά η μετακίνηση του στελέχους τροφοδοσίας στο συντονισμό και στην προσαρμογή της κεραίας. Αρχικά η παραμετρική σάρωση έγινε για διάφορες τιμές αγγίζοντας τις οριακές τιμές. Όπως βλέπουμε για μεγάλο εύρος τιμών της απλά επιδρά στη μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού χωρίς όμως να επηρεάζει την προσαρμογή της κεραίας. Μόνο για πολύ μικρές τιμές, $\phi_i=5^\circ$, 10° ή πολύ μεγάλες τιμές, $\phi_i=100^\circ$ ο συντελεστής ανάκλασης χειροτερεύει κατά πολύ.



Σχήμα 6-9 Μεταβολή της γωνίας ϕ_i

Στην τελική παραμετρική μελέτη της γωνίας ϕ_i , το αποτέλεσμα ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακό. Για το διάστημα γωνιών $\phi_i=15^\circ-90^\circ$ ο συντελεστής ανάκλασης παραμένει στα ίδια επίπεδα, η προσαρμογή της κεραίας παραμένει πολύ καλή και απλά μετατοπίζεται η συχνότητα συντονισμού. Συγκεκριμένα, για αύξηση της γωνίας η μετατόπιση της συχνότητας είναι προς μεγαλύτερες τιμές.



Σχήμα 6-10 Τελική παραμετρική μελέτη της γωνίας ϕ

Αυτή η ιδιότητα της γωνίας ϕ οδήγησε στην σμίκρυνση της κεραίας, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ηλεκτρικά μικρή. Η εξήγηση είναι η εξής. Είναι ήδη γνωστό από τη θεωρία ότι με μείωση του μήκους του μονόπολου η συχνότητα συντονισμού αυξάνεται. Άρα, με σμίκρυνση της ακτίνας το μήκος του τόξου της κεραίας μειώνεται και αυτό συνεπάγεται με αύξηση της συχνότητας συντονισμού. Όμως, αυτό στην περίπτωσή μας μπορούσε να αντισταθμιστεί χωρίς απώλειες προσαρμογής, με τη μείωση της γωνίας ϕ .

Τέλος, παραθέτουμε τον πίνακα τελικών αποτελεσμάτων.

	2.5 GHz
f_center (GHz)	2.5
$\overline{e_{rad}}$ (%)	86.2
$\overline{e_{total}}$ (%)	27.5
e_totalmax (%)	88.6
Gmax (dBi)	1.35
BW (MHz)	86.5
FBWv (%)	3.45
ka (rad)	0.5

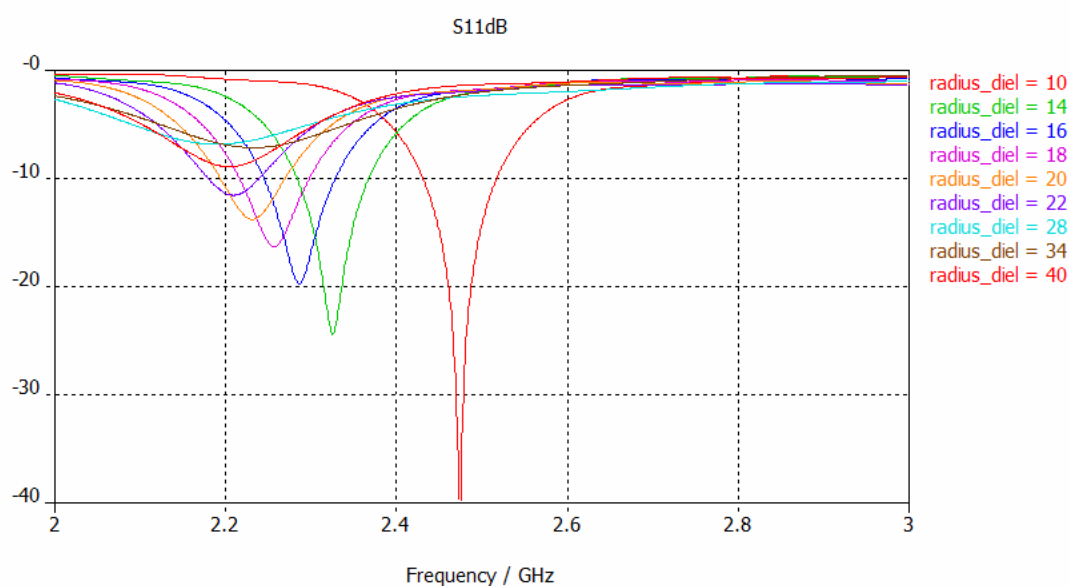
Πίνακας 6-2 Πίνακας τελικών αποτελεσμάτων

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα είναι ότι το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας είναι $ka=0.5$, άρα η κεραία C-PIFA είναι ηλεκτρικά μικρή. Χάριν, αυτού η κεραία δεν έχει πολύ καλή απόδοση ακτινοβολίας και το εύρος ζώνης είναι αρκετά μικρό.

6.9 Μελέτη του επιπέδου γείωσης

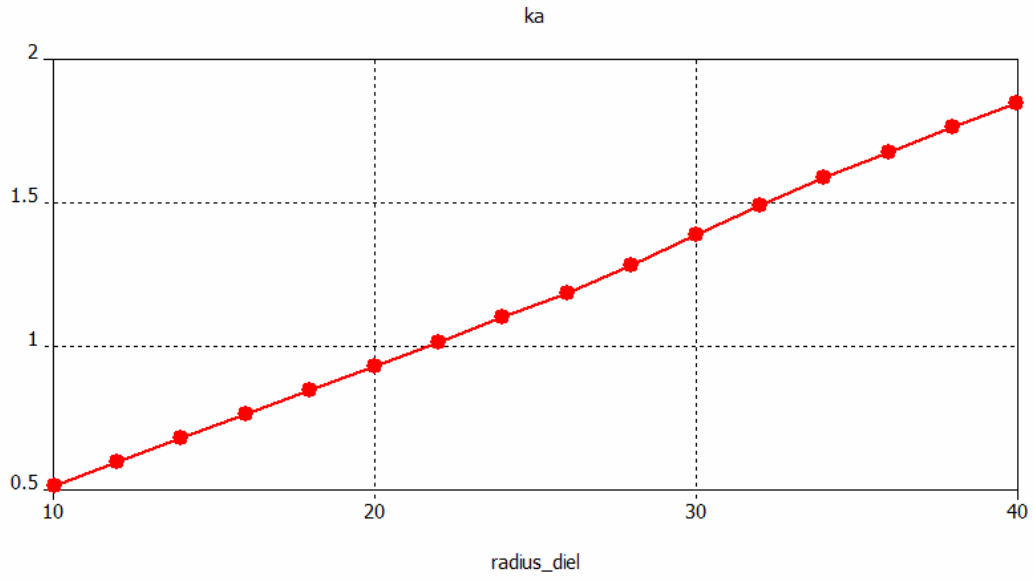
Τέλος, έγινε παραμετρική μελέτη του μεγέθους του επιπέδου γείωσης, το οποίο εξαρτάται από την ακτίνα του διηλεκτρικού υποστρώματος. Η ακτίνα που καθορίζει το μήκος του τόξου της κεραίας παρέμεινε σταθερή και ίση με $radius=8.6mm$.

Η ακτίνα του υποστρώματος μεταβλήθηκε από 10mm-40mm.

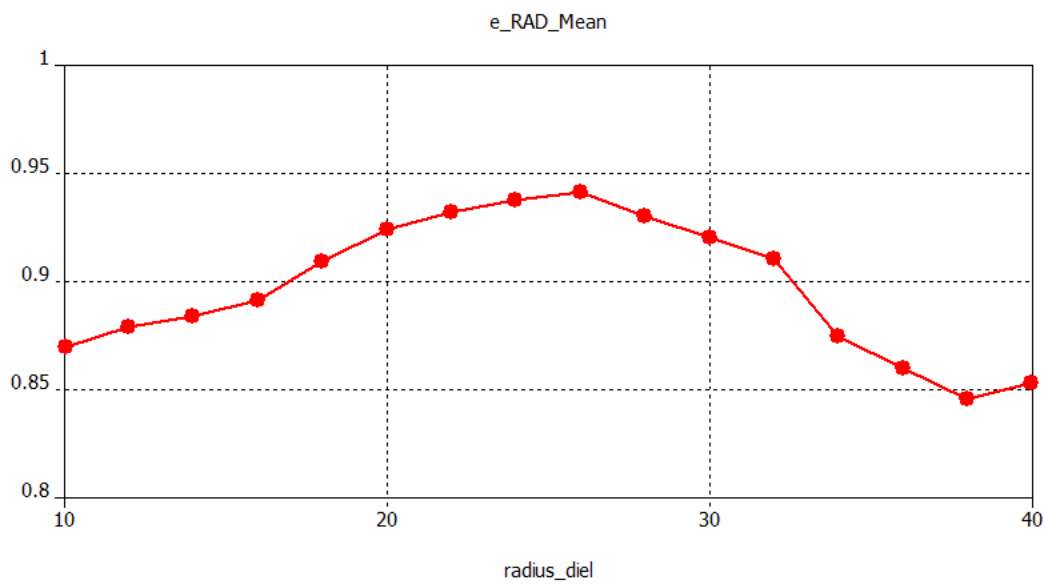


Σχήμα 6-11 Μεταβολή των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης

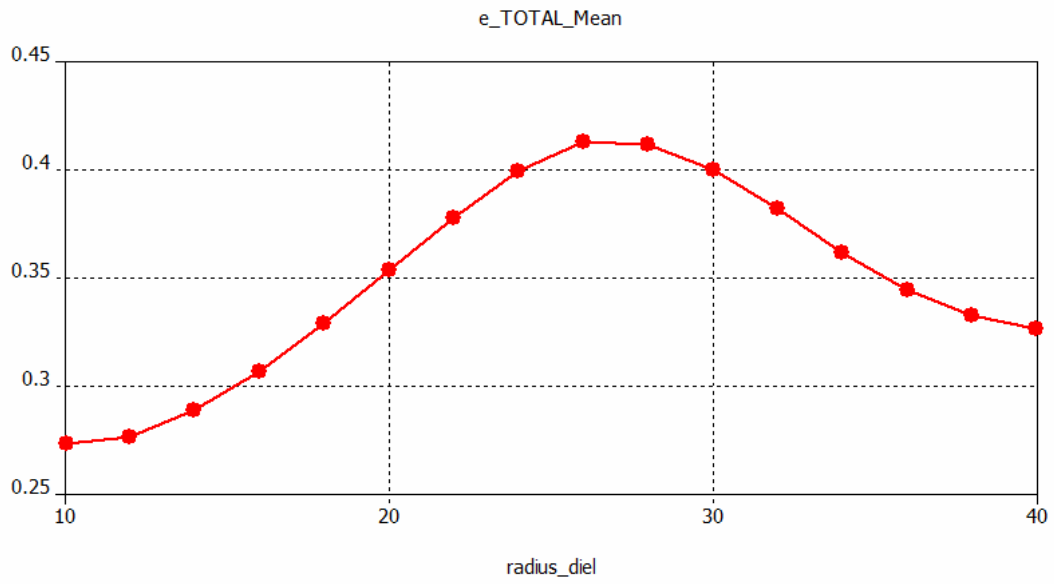
Παρατηρούμε ότι με την αύξησή του η συχνότητα συντονισμού μετατοπίζεται σε μικρότερες τιμές, ενώ χειροτερεύει κατά πολύ η προσαρμογή της κεραίας. Άλλη μία απόδειξη του γεγονότος ότι το μεγάλο επίπεδο δε σημαίνει ότι οδηγεί πάντα σε καλύτερη συμπεριφορά της κεραίας. Παρατηρούμε ότι για τιμές μεγαλύτερες των 24mm ο συντελεστής ανάκλασης δεν φτάνει τα -10dB.



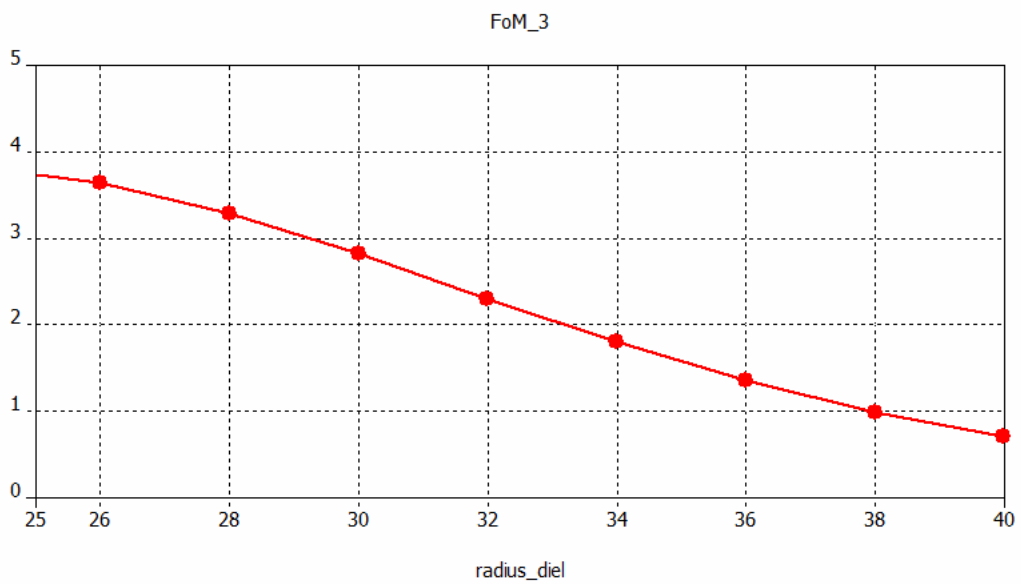
Σχήμα 6-12 Μεταβολή του ka συναρτήσει του επιπέδου γείωσης



Σχήμα 6-13 Μεταβολή της απόδοσης ακτινοβολίας συναρτήσει του επιπέδου γείωσης



Σχήμα 6-14 Μεταβολή της συνολικής απόδοσης συναρτήσει του επιπέδου γείωσης



Σχήμα 6-15 Μεταβολή του παράγοντα απόδοσης συναρτήσει του επιπέδου γείωσης

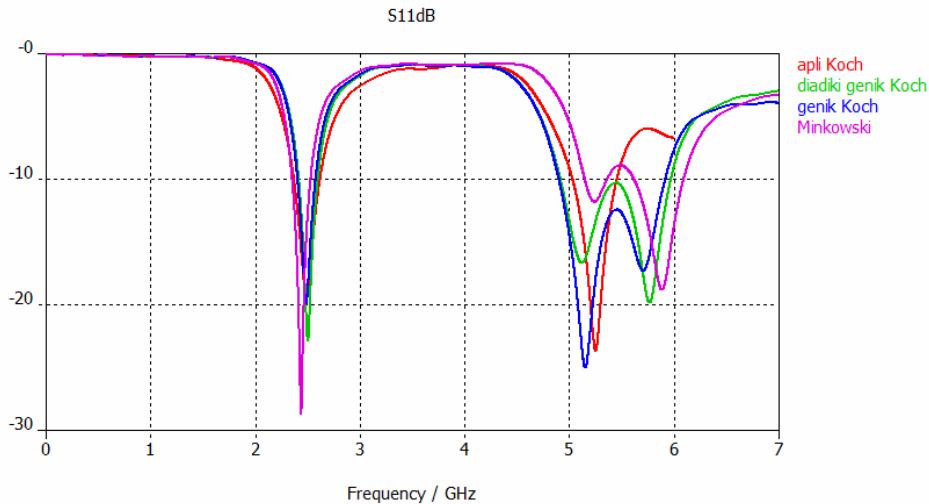
7. Συμπεράσματα από τη μελέτη τυπωμένων κεραιών και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των τυπωμένων κεραιών ανεστραμμένης F γεωμετρίας με χρήση σχισμών τύπου fractal και Euclidean δομής. Έγινε σύγκριση μεταξύ των κεραιών dual-band PIFA για τους τέσσερις διαφορετικούς τύπους σχισμών, ομοίως για τις single-band PIFA για τους τρεις τύπους σχισμών. Τέλος, έγινε σύγκριση μεταξύ των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης ώστε να εξαχθεί το συμπέρασμα για ποιες διαστάσεις η συμπεριφορά της κεραιάς είναι η βέλτιστη. Αυτό βοηθά ώστε να σταλούν κάποια μοντέλα για κατασκευή και στη συνέχεια να γίνουν μετρήσεις τους, για να δούμε κατά πόσο αποκλίνουν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

7.2 Σύγκριση μεταξύ των Dual-band κεραιών PIFA

Αρχικά παραθέσαμε ένα συγκριτικό διάγραμμα για τους συντελεστές ανάκλασης και των τεσσάρων μοντέλων βάσει των τεσσάρων διαφορετικών δομών των σχισμών τους, τα οποία μελετήσαμε.



Σχήμα 7-1 Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης για τα 4 είδη dual-band PIFA μοντέλα κεραιών

Παρατηρούμε ότι για τον πρώτο συντονισμό οι διαφορές είναι πολύ μικρές. Ωστόσο στη ζώνη 5-6 GHz παρατηρείται ότι τα μοντέλα με σχισμές τύπου γενικευμένης Koch (μπλε καμπύλη) καθώς και η δυαδική της (πράσινη καμπύλη) έχουν καλύψει όλη τη ζώνη, δηλαδή το εύρος ζώνης είναι στα 1GHz, σε αντίθεση με την κεραία με σχισμή τύπου απλής Koch (κόκκινη καμπύλη). Ομοίως αρκετά μεγαλύτερο είναι το εύρος της σχισμής Minkowski (μωβ καμπύλη), ωστόσο δεν έχει επιτευχθεί τόσο καλή προσαρμογή της κεραίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των τεσσάρων κεραιών για τις δύο ζώνες συχνοτήτων.

	Koch fres_1=2.53 GHz	Genik Koch fres_1=2.5 GHz	Diadiki genik Koch fres_1=2.5 GHz	Minkowski fres_1=2.5 GHz
f_center (GHz)	2.53	2.5	2.5	2.45
$\overline{e_{rad}}$ (%)	94.3	93.46	93.6	94
$\overline{e_{total}}$ (%)	86.7	82.9	83.6	83.4
e_totalmax (%)	94.7	92.1	92.8	93.2
Gmax (dBi)	2	2	1.98	2.1
BW (MHz)	231	182	191	182

FBW_v (%)	9.13	7.3	7.6	7.4
Ka (rad)	1.6	1.56	1.57	1.5
FoM (dB)	-3	-4.1	-3.9	-3.8

Πίνακας 7-1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις Dual-band PIFA στα 2.5 GHz

	Koch	Genik	Diadiki	Minkowski
	fres_2=5.3	Koch	genik Koch	
	GHz	Ζώνη	Ζώνη	Ζώνη
		συχνοτήτων	συχνοτήτων	συχνοτήτων
		5-6GHz	5-6GHz	5-6GHz
f_center (GHz)	5.31	5.41	5.41	5.45
e_{rad} (%)	96.6	96.76	96.7	96.6
e_{total} (%)	82.2	86.13	87.3	84
e_{totalmax} (%)	97.4	97.0	95.5	95.2
Gmax (dBi)	4.2	4.3	4.4	4.6
BW (GHz)	0.598	1	1.05	0.950
FBW_v (%)	11.3	18.5	19.26	17.4
ka (rad)	3.35	3.38	3.41	3.2
FoM (dB)	-5.6	-3.3	-3.9	-3.0

Πίνακας 7-2 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις Dual-band PIFA στη ζώνη 5-6 GHz

Παρατηρούμε τη διαφορά στο εύρος ζώνης μεταξύ της κεραίας ανεστραμμένης F γεωμετρίας με σχισμή τύπου Koch και των υπολοίπων κεραίων με τις άλλες τύπου σχισμές.

7.3 Επιλογή καλύτερων τιμών διαστάσεων επιπέδου γείωσης για τις dual-band PIFA

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε ένα πίνακα με τις καλύτερες τιμές για τις διαστάσεις του επιπέδου γείωσης, οι οποίες οδηγούν την κάθε κεραία στη βέλτιστη συμπεριφορά.

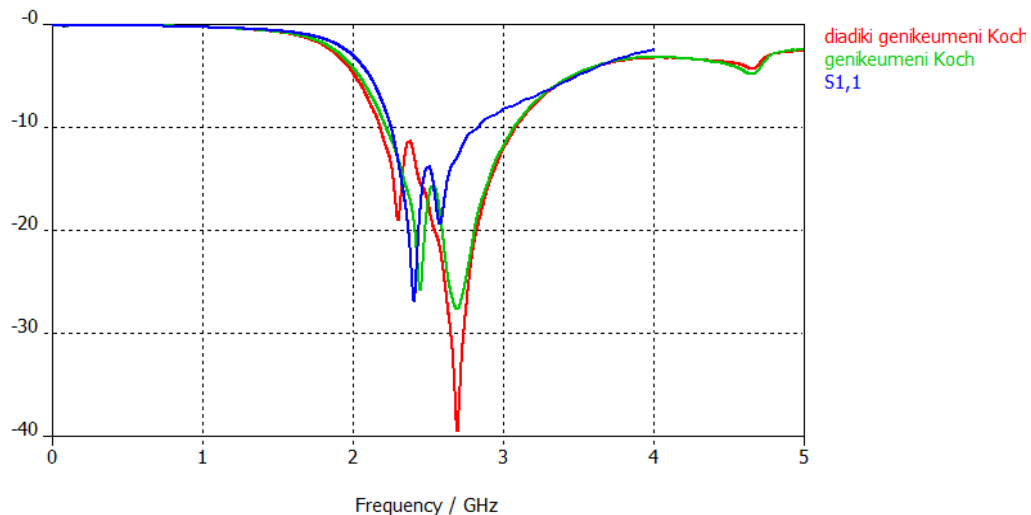
Τύπος σχισμής	Lgnd (mm)
Koch	32 – 36 – 40
Γενικευμένη Koch	28 – 32
Διαδική γενικευμένη Koch	40 – 44
Minkowski	42

Πίνακας 7-3 Πίνακας με τις βέλτιστες τιμές του μήκους του επιπέδου γείωσης

Βάσει των παραπάνω τιμών, ο σχεδιαστής των κεραιών έχει την ευκαιρία να στείλει για κατασκευή περισσότερα του ενός μοντέλα με διαφορετικές διαστάσεις. Οι κεραιές στη συνέχεια θα μπορούν να μετρηθούν σε ανηχοϊκό θάλαμο και τα αποτελέσματα να συγκριθούν με τα αντίστοιχα των προσομοιώσεων και να παρατηρηθούν οι αποκλίσεις του ρεαλιστικού μοντέλου σε σχέση με τις προσομοιώσεις.

7.4 Σύγκριση μεταξύ των single-band κεραιών PIFA

Ομοίως, θα παρουσιάσουμε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις single-band PIFA.



Σχήμα 7-2 Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης για τα 3 είδη single-band PIFA μοντέλα κεραιών

Η μπλε καμπύλη είναι η κεραία με τη σχισμή τύπου Koch, η πράσινη καμπύλη είναι η κεραία με τη σχισμή τύπου γενικευμένης Koch και η κόκκινη

γραμμή είναι η κεραία με τη δυαδική σχισμή τύπου γενικευμένης Koch. Όπως και στην περίπτωση των dual-band PIFA οι κεραίες με τις σχισμές τύπου γενικευμένης Koch, τόσο η απλή όσο και η δυαδική της επιτυγχάνουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με τη σχισμή Koch. Η κεραία με τη σχισμή τύπου γενικευμένης Koch έχει επιτύχει καλύτερη προσαρμογή της κεραίας.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών μεγεθών για τις τρεις κεραίες.

	Koch	Genik	Diadiki
		Koch	genik Koch
	Ζώνη	Ζώνη	Ζώνη
	συχνοτήτων	συχνοτήτων	συχνοτήτων
	2-3GHz	2-3GHz	2-3GHz
f_center	2.54	2.65	2.64
(GHz)			
$\overline{e_{rad}}$ (%)	91.87	89.34	90.37
$\overline{e_{total}}$ (%)	80.7	81.65	83.62
$e_{totalmax}$ (%)	94.06	91.39	92.1
Gmax (dBi)	2.3	2.6	2.6
BW (MHz)	571	845	897
FBWv (%)	22.4	31.9	34
ka (rad)	1.28	1.4	1.39
FoM (dB)	1.48	2.7	3.12

Πίνακας 7-4 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις single-band PIFA στη ζώνη 2-3 GHz

Πράγματι, διαπιστώνεται μία διαφορά τάξης 300 MHz στο εύρος ζώνης μεταξύ των κεραιών με απλή σχισμή Koch και σε αυτές με γενικευμένη Koch. Στα υπόλοιπα μεγέθη δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές. Από τις τιμές του μεγέθους ka παρατηρούμε ότι δε μπορούν να θεωρηθούν ηλεκτρικά μικρές κεραίες.

7.5 Επιλογή καλύτερων τιμών διαστάσεων επιπέδου γείωσης για τις dual-band PIFA

Οι διαστάσεις του επιπέδου γείωσης που επιλέχθηκαν ως οι καταλληλότερες, βάσει την επίδρασή τους στη συμπεριφορά της κεραίας είναι οι εξής.

Τύπος σχισμής	Lgnd (mm)	Wgnd (mm)
Koch	20	34
Γενικευμένη Koch	30	28
Διαδική γενικευμένη Koch	30	28

Πίνακας 7-5 Πίνακας με τις βέλτιστες τιμές των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης

7.6 Συμπεράσματα για την κυκλική PIFA

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα για αυτή την κεραία ήταν η επίτευξη του μικρού ηλεκτρικού της μεγέθους, $ka = 0.5$, έτσι ώστε να θεωρείται ηλεκτρικά μικρή κεραία. Το γεγονός ότι το μικρό της ηλεκτρικό της μέγεθος, σχετιζόταν με πολύ μικρό φυσικό μέγεθος, συγκεκριμένα για συχνότητα $f_{res} = 2.5$ GHz για να ισχύει $ka = 0.5$ έπρεπε η ακτίνα του υποστρώματος πάνω στο οποίο ήταν τυπωμένο το μονόπολο να ισούται με 9.6mm. Βάσει αυτού του αποτελέσματος, κάναμε μία αναγωγή της ακτίνας για άλλες συχνότητες στις οποίες λειτουργούν άλλα συστήματα.

Σύστημα	fres (GHz)	radius C-PIFA (mm)
TETRA	0.4	57.9
GSM	0.9	26
GPS	1.575	15
DCS/DECT	1.8	13.2
PCS	1.9	12.5
UMTS	2.1	11.4

Πίνακας 7-6 Υπολογισμός της ακτίνας του κυκλικού υποστρώματος για διάφορες συχνότητες

Παρατηρούμε ότι ακόμη και στα συστήματα TETRA το μέγεθος αυτής της κεραίας δε θα ξεπερνά τα 116mm που αντιστοιχούν στη διάμετρο του υποστρώματος, δηλαδή το μέγεθός της θα είναι περίπου όσο μία παλάμη.

7.7 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Βάσει των θεμάτων που μελετήσαμε σε αυτή τη διπλωματική εργασία μπορούν να προκύψουν νέες ιδέες για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών μεγεθών της κεραίας.

Κάποια από αυτά μπορεί να είναι τα εξής.

- Για την κυκλική PIFA, αντικατάσταση του απλού τόξου με τόξο μαιανδρικής δομής ή δομής fractal, όπως Koch, γενικευμένη Koch κ.α.
- Σχεδιασμός και μελέτη κεραίων με πολλαπλά στοιχεία τύπου τυπωμένων κεραίων ανεστραμμένης F γεωμετρίας με χρήση σχισμών ή κυκλικών PIFA