



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

**Σχεδίαση και Προσομοίωση Ημιτονοειδών, Chebyshev και
Chirp τυπωμένων μονοπόλων για κινητά τερματικά με
χρήση τρισδιάστατου Ηλεκτρομαγνητικού προσομοιωτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκίκα Πηνελόπη

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2008



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

**Σχεδίαση και Προσομοίωση Ημιτονοειδών, Chebyshev και
Chirp τυπωμένων μονοπόλων για κινητά τερματικά με
χρήση τρισδιάστατου Ηλεκτρομαγνητικού προσομοιωτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκίκα Πηνελόπη

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου

Καθηγητής ΕΜΠ

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

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2008

.....

Πηνελόπη Γκίκα

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

Copyright © Γκίκα Πηνελόπη, 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 ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή ΕΜΠ Φίλιππο Κωνσταντίνου για την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την διπλωματική εργασία σε ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο της επιστήμης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού. Επίσης ευχαριστώ πολύ 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.

Γκίκα Πηγελόπη

Ιούλιος 2008

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη των ηλεκτρικά μικρών επίπεδων κεραιών που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 2-3GHz. Πρόκειται για ευρυζωνικές κεραίες 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.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκαν και προσομοιώθηκαν τρία είδη κεραιών, τα τυπωμένα μονόπολα Ημιτονοειδούς, Chebyshev και Chirp γεωμετρίας, με τη βοήθεια τρισδιάστατου ηλεκτρομαγνητικού προσομοιωτή. Στόχος μας κατά την υπολογιστική σχεδίαση ήταν η επίτευξη της λειτουργίας τους στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων, 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.

Abstract

The aim of this thesis is the study of electrically small planar antennas in the 2-3GHz band. 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).

In the present thesis we have modeled and simulated three kinds of antennas, the printed monopoles of Sinusoidal, Chebyshev and Chirp geometries using a 3D electromagnetic simulator. During the design stage we have opted for operation in the 2-3GHz band, 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.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	13
1.1 Γενικά	13
1.2 Βιβλιογραφία	17
2. Θεωρητική Μελέτη Ηλεκτρικά Μικρών Κεραίων	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.1.1 Ηλεκτρικά μικρές κεραίες	19
2.1.2 Βασικοί περιορισμοί στη σχεδίαση ηλεκτρικά μικρών κεραίων.....	20
2.2 Μεγέθη	22
2.2.1 Κατευθυντικότητα	22
2.2.2 Απολαβή.....	22
2.2.3 Απόδοση	23
2.2.4 Εύρος ζώνης	23
2.2.5 Ηλεκτρικό μέγεθος	23
2.2.6 Συντελεστής αξίας FOM	24
2.3 Το τυπωμένο μονόπολο	25
2.4 Βιβλιογραφία	26
3. Περιβάλλον προσομοιώσεων και μελέτη ομοαξονικού συνδετήρα	27
3.1 Υπολογιστικές μέθοδοι προσομοιώσεων	27
3.1.1 Επίλυση	28
3.1.2 Διακριτοποίηση	29
3.1.3 Οριακές συνθήκες.....	29
3.2 Λογισμικό προσομοιώσεων.....	30
3.2.1 Η μέθοδος πεπερασμένης ολοκλήρωσης.....	30
3.2.2 Ο επιλύτης στο πεδίο του χρόνου.....	33
3.2.3 Χαρακτηριστικά του προγράμματος	34
3.3 Τεχνικές τροφοδοσίας	36
3.3.1 Μικροταινία.....	36
3.3.2 Ομοαξονική γραμμή.....	37
3.4 Σχεδίαση τετραγωνικού ομοαξονικού συνδετήρα.....	38
3.4.1 Εισαγωγή	38
3.4.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση	39
3.4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	42
3.5 Βιβλιογραφία	46
4. Τρισδιάστατες Κεραίες Ημιτονοειδούς Γεωμετρίας	47
4.1 Εισαγωγή	47
4.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση	49
4.3 Ρύθμιση των παραμέτρων προσομοίωσης.....	51
4.3.1 Τροφοδότηση της διάταξης	51
4.3.2 Διακριτοποίηση	51
4.3.3 Λοιπές ρυθμίσεις	51
4.4 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων.....	51
4.5 Μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης.....	54
4.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	62
4.7 Βιβλιογραφία	67
5. Τρισδιάστατες Κεραίες Γεωμετρίας Chebyshev	69
5.1 Εισαγωγή	69
5.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση	70
5.3 Ρύθμιση των παραμέτρων της σχεδίασης.....	71
5.3.1 Τροφοδότηση της διάταξης	71

5.3.2	Διακριτοποίηση	72
5.3.3	Λοιπές ρυθμίσεις	72
5.4	Διαδικασία και αποτελέσματα προσομοιώσεων	72
5.5	Μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης.....	75
5.6	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	80
5.7	Βιβλιογραφία	82
6.	Τρισδιάστατη Κεραία Γεωμετρίας Chirp.....	83
6.1	Εισαγωγή	83
6.2	Σχεδίαση-μοντελοποίηση	84
6.3	Ρύθμιση των παραμέτρων της σχεδίασης.....	85
6.3.1	Τροφοδότηση της διάταξης	85
6.3.2	Διακριτοποίηση	85
6.3.3	Λοιπές ρυθμίσεις	85
6.4	Διαδικασία και αποτελέσματα προσομοιώσεων	85
6.5	Βιβλιογραφία	93
7.	Μελέτη της συμπεριφοράς της κεραίας παρουσία μπαταριών	95
7.1	Εισαγωγή	95
7.2	Διαδικασία και αποτελέσματα προσομοιώσεων	96
7.2.1	Μπαταρίες μεγέθους AA	96
7.2.2	Μπαταρίες μεγέθους AAA	99
7.2.3	Μπαταρίες τύπου coin cell	100
8.	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία	103
8.1	Εισαγωγή	103
8.2	Σύγκριση μεταξύ Ημιτονοειδούς τυπωμένου μονοπόλου δύο περιόδων και τυπωμένου μονοπόλου Chebyshev ενάτου βαθμού	103
8.3	Συμπεράσματα για την Chirp κεραία	104
8.4	Συμπεράσματα από την μελέτη της Ημιτονοειδούς κεραίας παρουσία μπαταριών	104
8.5	Προτάσεις για μελλοντική εργασία	104

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί ραγδαία εξέλιξη στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών με αποτέλεσμα την ολοένα αυξανόμενη χρήση φορητών συσκευών επικοινωνίας. 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 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.



Σχήμα 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.



Σχήμα 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.

Οι τεχνικές με τις οποίες επιτυγχάνεται σμίκρυνση της κεραίας είναι σε γενικές γραμμές:

- Η σχεδίαση και βελτιστοποίηση της γεωμετρικής δομής της κεραίας, συγκεκριμένα το σχήμα και ο προσανατολισμός των ακτινοβολούντων στοιχείων.
- Η χρήση μη αγώγιμων υλικών. Κεραίες που κατασκευάζονται από φερρίτη ή υψηλής επιτρεπτότητας διηλεκτρικά υλικά είναι παραδείγματα αυτής της τεχνικής.

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].

Στην εργασία μας, στόχος ήταν η σχεδίαση ηλεκτρικά μικρών κεραιών για λειτουργία στις ζώνες συχνοτήτων 2-3GHz και χρήση σε κινητά τερματικά. Ο λόγος είναι ότι σε αυτή τη ζώνη (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].

Στη συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή του περιεχομένου των κεφαλαίων της διπλωματικής μου εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 αρχικά δίνεται ο ορισμός της ηλεκτρικά μικρής κεραίας καθώς και οι βασικοί περιορισμοί κατά τη σχεδίασή της. Εν συνεχεία, ακολουθεί ο ορισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών των κεραιών και παρουσιάζεται το τυπωμένο μονόπολο.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι κυριότερες υπολογιστικές μέθοδοι προσομοιώσεων και ακολουθεί η περιγραφή του λογισμικού που έχει χρησιμοποιηθεί για τις σχεδιάσεις και προσομοιώσεις. Επίσης, παρουσιάζεται η πρώτη σχεδίαση και προσομοίωση που πραγματοποιήσα και αφορά στον τετραγωνικό ομοαξονικό συνδετήρα που χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση των κεραιών που σχεδίασα.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται την πρώτη κατηγορία κεραιών που σχεδίασα και προσομοίωσα, αυτήν των Ημιτονοειδών τυπωμένων μονοπόλων. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα μοντέλα σχεδίασης και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αυτά περιλαμβάνουν τον συντελεστή ανάκλασης, την επιφανειακή κατανομή της πυκνότητας ρεύματος της κεραίας και οι τομές του διαγράμματος ακτινοβολίας στα επίπεδα XZ, ZY και XY. Επίσης πραγματοποιείται η μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης στην ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά της κεραίας.

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τη μελέτη τυπωμένων κεραιών γεωμετρίας Chebyshev. Όμοια και εδώ παρουσιάζονται τα μοντέλα σχεδίασης και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Στο κεφάλαιο 6 σχεδιάζεται το τυπωμένο μονόπολο γεωμετρίας Chirp και εξετάζεται η λειτουργία του στο εύρος συχνοτήτων 0 έως 6GHz. Η κεραία αυτή παρουσιάζει πολυζωνική (multiband) συμπεριφορά.

Στο κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται η μελέτη της συμπεριφοράς της κεραίας παρουσία μπαταριών.

Στο κεφάλαιο 8 συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα και γίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

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>
- [6] (2007) The Wikipedia website. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wimax>

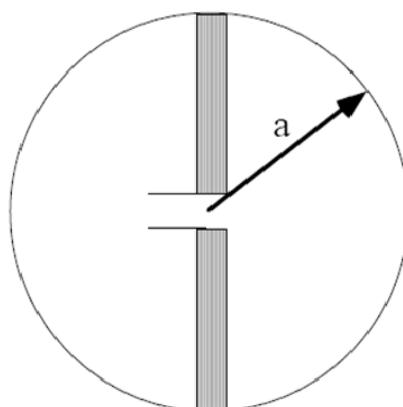
2. Θεωρητική Μελέτη Ηλεκτρικά Μικρών Κεραιών

2.1 Εισαγωγή

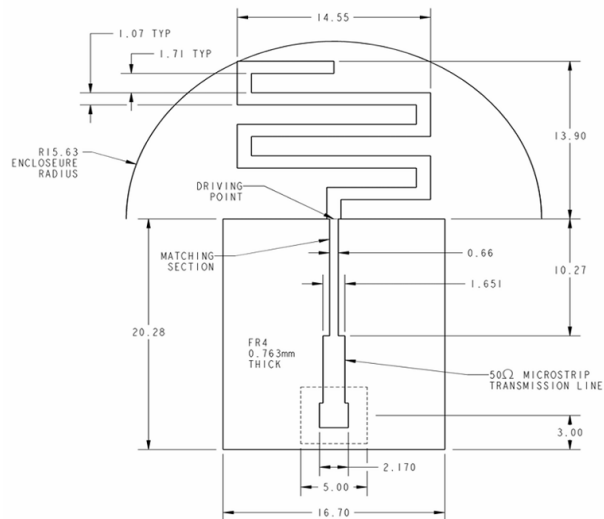
2.1.1 Ηλεκτρικά μικρές κεραιές

Ο ορισμός της ηλεκτρικά μικρής κεραιάς είναι κάτι αμφιλεγόμενο. Συχνά ο ορισμός αυτός περιγράφει την κεραιά της οποίας το συνολικό μέγεθος (συμπεριλαμβανομένης της γείωσης ή του ειδώλου της) είναι μικρότερο του ενός τετάρτου του μήκους κύματος (συντονισμού) ή ενός ογδόου ή ενός δέκατου του μήκους κύματος. Σύμφωνα με τον Wheeler ηλεκτρικά μικρή κεραιά είναι αυτή της οποίας ο συνολικός όγκος καταλαμβάνει ένα μικρό κλάσμα του λόγου $1/2\pi$ (ακτίνα της radiansphere) επί το μήκος κύματος συντονισμού. Η σημασία της διάστασης $1/2\pi$ είναι ότι χαρακτηρίζει προσεγγιστικά την περιοχή που περιβάλλει την κεραιά και καταλαμβάνεται από την αποθηκευμένη ή άεργο ισχύ των κοντινών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων[1].

Το ηλεκτρικό μέγεθος της μικρής κεραιάς ορίζεται από την τιμή $ka=2\pi a/\lambda$, όπου a η ακτίνα της σφαίρας στην οποία είναι περιγεγραμμένη η κεραιά. Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με τον Wheeler, μια κεραιά θεωρείται ηλεκτρικά μικρή όταν ισχύει η σχέση $ka \ll 1$. Όσον αφορά στο επίπεδο γείωσης μίας κεραιάς (μονοπόλου), όταν αυτό είναι αρκετά μεγάλο ώστε η χαρακτηριστική αντίσταση του μονοπόλου να προσεγγίζει αυτήν μονοπόλου με άπειρο επίπεδο γείωσης, τότε δεν χρειάζεται να συμπεριληφθεί στον ορισμό του a . Στην αντίθετη περίπτωση πρέπει να συμπεριληφθεί στον ορισμό του a .



Σχήμα 2.1 Περιγεγραμμένη σφαίρα διπόλου $\lambda/2$



Σχήμα 2.2 Περιγεγραμμένη σφαίρα τυπωμένης κεραίας

2.1.2 Βασικοί περιορισμοί στη σχεδίαση ηλεκτρικά μικρών κεραιών

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μεγέθη μιας ηλεκτρικά μικρής κεραίας είναι η αποδοτικότητα ϵ , ο συντελεστής ποιότητας Q , το εύρος ζώνης BW και το κέρδος G . Η σμίκρυνση μίας κεραίας επηρεάζει τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της. Καθώς η κεραία αποτελεί το μέσο μετατροπής ενός κυματοδηγούμενου κύματος σε ένα ακτινοβολούμενο κύμα, αυτή η διαδικασία συνδέεται με το μήκος κύματος και κατ' επέκτασιν με το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας. Η σχέση του ηλεκτρικού μεγέθους της κεραίας με την ηλεκτρική της συμπεριφορά έχει μελετηθεί εκτενώς.

Η ανάλυση των ηλεκτρικά μικρών κεραιών και η μελέτη της επιρροής της σμίκρυνσης τους στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας ξεκίνησε με τον Wheeler ο οποίος χρησιμοποίησε τον συντελεστή ποιότητας Q για να ποσοτικοποιήσει την ακτινοβολία μιας κεραίας. Χρησιμοποιώντας ένα απλό ισοδύναμο συγκεντρωμένο κύκλωμα συμπέρανε ότι συντελεστής ποιότητας είναι ισοδύναμος με το γινόμενο του εύρους ζώνης με την αποδοτικότητα, στις περιπτώσεις όπου η κεραία είναι προσαρμοσμένη με ένα απλό κύκλωμα. Τα παραπάνω αποτέλεσαν την πρώτη προσπάθεια επιβεβαίωσης μαθηματικά της υπόθεσης ότι το μέγεθος (αποδοτικότητα \times εύρος ζώνης) συνδέεται άμεσα με τον όγκο που καταλαμβάνει η κεραία[2].

Η δουλειά του Wheeler γενικεύθηκε από τον Chu, ο οποίος χρησιμοποίησε ένα ισοδύναμο συγκεντρωμένο κύκλωμα για να περιγράψει τα σφαιρικά κύματα (τρόπους) που ακτινοβολούνται από μία σφαίρα η οποία περιλαμβάνει την κεραία. Τα σφαιρικά κύματα εκφράζουν τα πεδία που ακτινοβολούνται έξω από την σφαίρα η οποία περιλαμβάνει ολόκληρη την κεραία μαζί με τη γραμμή μεταφοράς και τον ταλαντωτή. Έτσι λοιπόν επαληθεύτηκε η σχέση μεταξύ της ελάχιστης

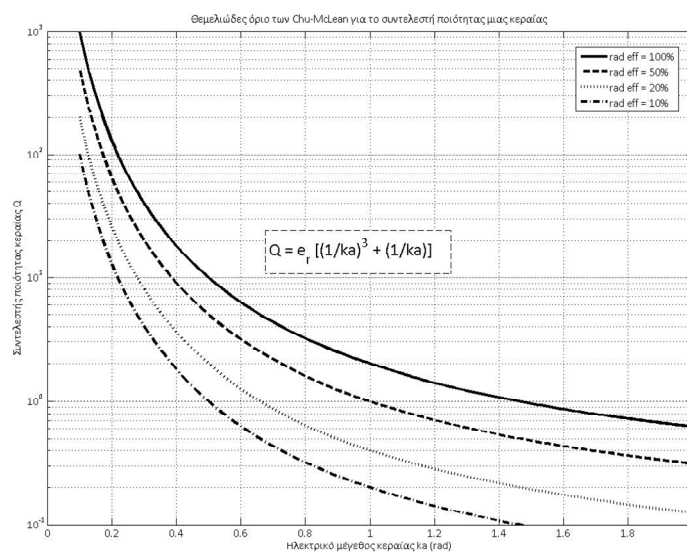
τιμής του συντελεστή ακτινοβολίας, Q , μίας ομοιοκατευθυντικής κεραιάς και του όγκου της. Η σχέση που πρότεινε ο Chu για γραμμικά πολωμένες κεραιές είναι:

$$Q = \frac{1 + 2(ka)^2}{(ka)^3 [1 + (ka)^2]}$$

η οποία διορθώθηκε έπειτα από τον McLean στην σχέση:

$$Q = \left(\frac{1}{ka}\right)^3 + \left(\frac{1}{ka}\right)$$

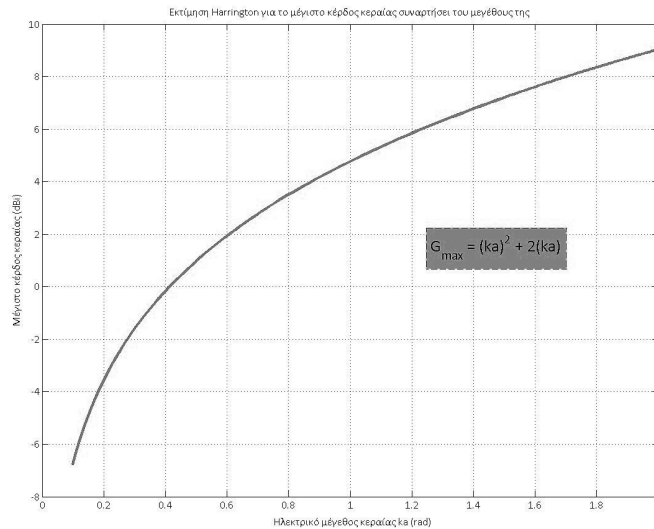
Οι δύο αυτές σχέσεις συγκλίνουν για πολύ μικρές κεραιές ($ka \ll 1$).



Σχήμα 2.3 Κάτω φράγμα του Q συναρτήσει του ka

Η μελέτη του Wheeler και του Chu πάνω στους θεμελιώδεις περιορισμούς των ηλεκτρικά μικρών κεραιών επεκτάθηκε από τον Harrington οποίος συμπεριέλαβε την επιρροή των απωλειών. Καθώς μία ηλεκτρικά μικρή κεραιά εκδηλώνει μεγαλύτερη συγκέντρωση επιφανειακών κυμάτων, εκδηλώνει και περισσότερες ωμικές απώλειες. Ο Harrington λοιπόν πρότεινε μία σχέση για το μέγιστο όριο του κέρδους, G , μιας μικρής κεραιάς με δεδομένο εύρος ζώνης:

$$G = (ka)^2 + 2(ka)$$



Σχήμα 2.4 Άνω φράγμα του G συναρτήσει του ka

2.2 Μεγέθη

2.2.1 Κατευθυντικότητα

Κατευθυντικότητα (directivity) μίας κεραιάς ορίζεται ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας μίας κεραιάς σε δεδομένη διεύθυνση προς τη μέση ένταση που εκπέμπεται συνολικά σε όλες τις κατευθύνσεις (ένταση ισοτροπικής πηγής)[3].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

Εάν η διεύθυνση δεν προσδιορίζεται τότε εκλαμβάνεται η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας (μέγιστη κατευθυντικότητα).

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4 * \pi * U_{max}}{P_{rad}}$$

2.2.2 Απολαβή

Η απολαβή (gain) λαμβάνει υπ' όψιν τόσο την απόδοση μιας κεραιάς όσο και τις κατευθυντικές της ικανότητες. Η απόλυτη απολαβή μιας κεραιάς ορίζεται ως ο λόγος της έντασης σε δεδομένη διεύθυνση προς την ένταση που θα προέκυπτε αν η κεραιά ακτινοβολούσε ισοτροπικά την ισχύ που δέχεται. Η ένταση της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην ισοτροπική ακτινοβολία της ισχύος ισούται με την ισχύ που δέχεται η κεραιά (ισχύ εισόδου) δια 4π.

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}}$$

2.2.3 Απόδοση

Η ολική απόδοση (efficiency) μιας κεραίας, e_0 , είναι ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται για να συνυπολογισθούν οι απώλειες στους ακροδέκτες εισόδου αλλά και μέσα στην ίδια τη δομή της κεραίας. Η συνολική απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$e_{total} = e_r e_c e_d e_{rad} = e_c e_d$$

όπου e_r είναι η απόδοση ανακλάσεων e_c είναι η απόδοση αγωγιμότητας και e_d είναι η διηλεκτρική απόδοση, και $e_{rad} = e_c e_d$ είναι η απόδοση ακτινοβολίας.

2.2.4 Εύρος ζώνης

Το εύρος ζώνης (bandwidth) ορίζεται ως η περιοχή εκείνη των συχνοτήτων όπου οι επιδόσεις της κεραίας, ως προς ορισμένα χαρακτηριστικά, ικανοποιούν κάποιες ειδικές προδιαγραφές.

Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το BW at -10dB το οποίο προκύπτει από τη σχέση $BW = f_2 - f_1$, όπου f_1 και f_2 η ανώτερη και η κατώτερη συχνότητα όπου ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} λαμβάνει τιμές κάτω από -10dB.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε το κλασματικό εύρος ζώνης

$$FBW = \frac{BW \text{ at } -10dB}{freq_center},$$

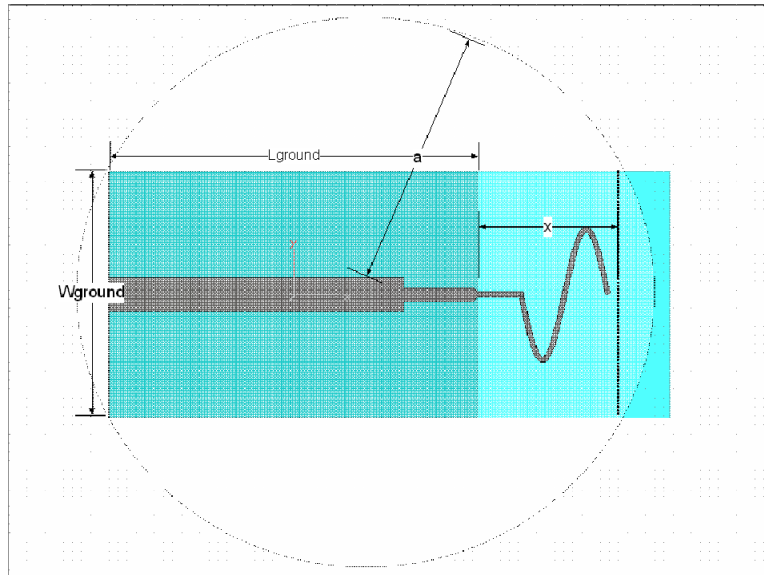
$$\text{όπου } freq_center = \frac{f_2 - f_1}{2}.$$

2.2.5 Ηλεκτρικό μέγεθος

Το ηλεκτρικό μέγεθος (ka) μιας κεραίας δίνεται από τη σχέση:

$$ka = \frac{2\pi}{\lambda} a = 2\pi \frac{f_{res}}{c} a$$

όπου a είναι η ακτίνα της “radiansphere”. Η radiansphere στην περίπτωση των τυπωμένων κεραιών που σχεδιαστήκαν περικλείει την κεραία και το επίπεδο γείωσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.5 Περιγεγραμμένη σφαίρα στο τυπωμένο μονόπολο

και δίνεται από τον τύπο

$$a = \sqrt{(L_{ground} + x)^2 + (W_{ground})^2}$$

Ο λόγος που περιλαμβάνεται το επίπεδο γείωσης στον όγκο της radiansphere είναι ότι η ύπαρξή του καθώς και το μέγεθός του επηρεάζουν ουσιαστικά την συμπεριφορά της κεραίας. Αυτό συμβαίνει διότι πάνω στο επίπεδο γείωσης επάγονται ισχυρά ρεύματα τα οποία διαμορφώνονται ανάλογα με το μέγεθός του, με αποτέλεσμα το επίπεδο γείωσης να δρα ως ακτινοβολητής. Μπορεί μάλιστα να θεωρηθεί ότι ο κύριος ακτινοβολητής είναι το επίπεδο γείωσης ενώ η κεραία παίρνει το ρόλο του στοιχείου προσαρμογής[5].

2.2.6 Συντελεστής αξίας FOM

Η σμίκρυνση της κεραίας προκαλεί τον υποβιβασμό των κυριότερων μεγεθών της. Στην προσπάθεια σχεδίασης ενός αποδοτικού μοντέλου κεραίας γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ των θεμελιωδών παραμέτρων της, δηλαδή του κέρδους (ή εναλλακτικά της αποδοτικότητας), του εύρους ζώνης και του όγκου της, τα οποία συνδέονται με τη σχέση:

$$\frac{Gain \times Bandwidth}{Volume} = const$$

Η περιγραφή μίας κεραίας γίνεται αποδοτικά μέσω του κέρδους και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της, σε ζεύξεις οπτικής επαφής (line of sight-LOS propagation conditions). Στην περίπτωση των τερατικών κεραιών, όπου το περιβάλλον της κεραίας είναι δυναμικό, ένας καλύτερος τρόπος περιγραφής της συμπεριφοράς μιας κεραίας είναι μέσω της συνολικής αποδοτικότητας ϵ_{total} , η οποία περιλαμβάνει συνεισφορές των απωλειών (αγωγιμότητας και διηλεκτρικών) καθώς και της αποπροσαρμογής της αντίστασης εισόδου της κεραίας.

Στην παρούσα διπλωματική, χρησιμοποιήθηκε ένα μέγεθος για την αποτίμηση της συνολικής συμπεριφοράς της κεραίας, το οποίο δίνεται από τη σχέση

$$FOM = \frac{10 \times \overline{e_{total}} \times FBW\nu}{ka}$$

όπου το $\overline{e_{total}}$ είναι η μέση συνολική αποδοτικότητα υπολογισμένη στο διάστημα ενδιαφέροντος, $FBW\nu$ είναι το κλασματικό εύρος ζώνης όπως περιγράφεται παραπάνω και ka είναι το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας, όπου k είναι ο κυματαριθμός υπολογισμένος στην κεντρική συχνότητα. Ο αριθμός 10 χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν μικρές τιμές του λόγου.

Ο συντελεστής αξίας FOM (Figure of Merit) είναι ένας καθαρός αριθμός που εκφράζεται σε decibels και προορίζεται για την σύγκριση και σχετική αξιολόγηση διαφορετικών κεραίων, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην ίδια εφαρμογή, και δεν μπορεί να αποτελέσει ένα απόλυτο μέγεθος[4].

2.3 Το τυπωμένο μονόπολο

Η κεραία μονόπολο αποτελεί έναν ελκυστικό τύπο κεραίας στο χώρο των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, εξαιτίας της απλότητας κατασκευής της, της ευρυζωνικότητάς της και της σχεδόν ομοιοκατευθυντικής συμπεριφοράς της. Το οριζόντια τοποθετημένο μονόπολο πάνω από επίπεδο γείωσης έχει σημαντικά αυξημένο εύρος ζώνης σε σχέση με το απλό μονόπολο, κάνοντάς το ιδανικό για χρήση σε ευρυζωνικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά, το μέγεθος και ο προσανατολισμός του επιπέδου γείωσης σε σχέση με το ακτινοβολούν στοιχείο θέτουν φυσικούς περιορισμούς στη χρήση τέτοιων κεραίων. Το τυπωμένο μονόπολο (printed monopole) με το επίπεδο γείωσης τυπωμένο στο ίδιο διηλεκτρικό υπόστρωμα και παράλληλα προς το ακτινοβολούν στοιχείο αποτελεί μία κεραία με χαμηλό προφίλ, μικρό όγκο, ευκολότερη στην κατασκευή και κατάλληλη για ενσωμάτωση σε τυπωμένα κυκλώματα ως τερματική κεραία.

Η ύπαρξη του διηλεκτρικού υποστρώματος με $\epsilon_r > 1$ αποτελεί μια τεχνική σμίκρυνσης του μήκους του μονοπόλου καθώς το μονόπολο συντονίζεται σε μια συχνότητα f_0 , παίρνοντας τιμές μήκους $L < \lambda_0/4$ όπου λ_0 το μήκος κύματος στο κενό στη συχνότητα συντονισμού.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν κεραίες του τύπου αυτού με σκοπό την σμίκρυνση του ακτινοβολητή και την διατήρηση του εύρους ζώνης και της απόδοσης ακτινοβολίας σε ικανοποιητικά επίπεδα[6].

2.4 Βιβλιογραφία

- [1] Steven R. Best, “Small antennas”, Volakis, Antenna Engineering Handbook- Fourth Edition
- [2] A. K. Skrivervik, J. –F. Zurcher, O. Staub, J. R. Mosig, “PCS Antenna Design”
- [3] C. A. Balanis, “Antenna theory, Analysis and design”, Second Edition, , John Wiley & Sons, Inc, 1992
- [4] C. G. Kakoyiannis, P. Constantinou, “Co-design of Antenna Element and Ground Plane for Printed Monopoles Embedded in Wireless Sensors”
- [5] Frank Gustrau and Dirk Manteuffel, “EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication Systems”, Springer, Germany 2006.
- [6] M. J. Ammann, M. Jonh, “Optimum Design of the Printed Strip Monopole”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 47, No. 6, December 2005*

3. Περιβάλλον προσομοιώσεων και μελέτη ομοαξονικού συνδετήρα

3.1 Υπολογιστικές μέθοδοι προσομοιώσεων

Τις τελευταίες δεκαετίες το πρωταρχικό στάδιο μελέτης και σχεδίασης κεραιών καθώς και γενικά μικροκυματικών διατάξεων υλοποιείται μέσω των υπολογιστικών προσομοιώσεων. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι τόσο των αναλυτικών μεθόδων επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε απλές διατάξεις, όσο και έναντι της πειραματικής διαδικασίας, καθώς οι υπολογιστικές προσομοιώσεις υπερέρχονται της πειραματικής διαδικασίας στο χρόνο, στην ευκολία και φυσικά στο κόστος υλοποίησης. Τα τελευταία χρόνια λοιπόν έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη αλγορίθμων επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων καθώς και ενός μεγάλου αριθμού εμπορικών λογισμικών.

Οι κυριότερες υπολογιστικές μέθοδοι στις οποίες βασίζονται τα εμπορικά λογισμικά προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD), η μέθοδος των ροπών (MOM) και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Επίσης χρησιμοποιούνται και άλλες μέθοδοι όπως η μέθοδος πεπερασμένης ολοκλήρωσης (FIT), η μέθοδος πεπερασμένου όγκου στο πεδίο του χρόνου (FVTD), η μέθοδος οριακού στοιχείου (BEM) καθώς και άλλες υβριδικές μέθοδοι οι οποίες αποτελούν συνδυασμούς οι παραλλαγές των τριών πρώτων μεθόδων.

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μεθόδων αποτελεί η διακριτοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πλέγματος και η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς σε κάθε κελί του πλέγματος που έχει προκύψει. Υπάρχουν δύο τρόποι κατηγοριοποίησης των υπολογιστικών μεθόδων: σύμφωνα με την περιοχή επίλυσης και σύμφωνα με τη διαδικασία επίλυσης.

Σύμφωνα με την περιοχή επίλυσης, οι υπολογιστικές μέθοδοι χωρίζονται σ' αυτές που βασίζονται στον όγκο, όπως η FEM και FDTD και σ' αυτές της ολοκλήρωσης επιφάνειας όπως η MOM. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται διακριτοποίηση ολόκληρου του όγκου της διάταξης καθώς και του όγκου αέρα που περιβάλλει τη διάταξη ενώ στη δεύτερη γίνεται διακριτοποίηση της επιφάνειας της διάταξης.

Στις μεθόδους που βασίζονται στον όγκο, η περιοχή που περιβάλλει τη διάταξη καθορίζεται σε έναν κατάλληλο όγκο, στις εξωτερικές επιφάνειες του οποίου ορίζονται οριακές συνθήκες οι οποίες προσομοιώνουν τη συνεχή μετάβαση στο κενό[1].

Μέσα στον υπολογιστικό όγκο ορίζονται θύρες οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διέγερση των παθητικών διατάξεων και τον υπολογισμό των κυκλωματικών μεγεθών όπως οι παράμετροι σκέδασης, η αντίσταση εισόδου και άλλα.

Στη συνέχεια καταστρώνονται οι εξισώσεις Maxwell για κάθε σημείο του πλέγματος και ακολουθεί η επίλυσή τους.

Σύμφωνα με τη διαδικασία επίλυσης οι υπολογιστικές μέθοδοι χωρίζονται στις μεθόδους στο πεδίο της συχνότητας όπως η FEM και η MOM και στο πεδίο του χρόνου όπως η FDTD. Στην πρώτη περίπτωση υπολογίζεται η λύση χωριστά για κάθε συχνότητα ενώ στη δεύτερη περίπτωση υπολογίζεται η χρονική απόκριση της διάταξης βήμα-βήμα μέχρι να επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση κι έπειτα υπολογίζεται η απόκριση συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στις μεθόδους στο πεδίο της συχνότητας η ανάπτυξη του συστήματος εξισώσεων σε κάθε συχνότητα απαιτεί σχετικά μεγάλη μνήμη καθώς και υπολογιστικό χρόνο. Γι' αυτό το λόγο το σύστημα των εξισώσεων λύνεται μόνο για λίγες συχνότητες και χρησιμοποιούνται τεχνικές παρεμβολής για την εύρεση των ενδιάμεσων σημείων. Το πλεονέκτημα των μεθόδων στο πεδίο του χρόνου είναι ότι μπορούν να υπολογίσουν αποτελέσματα για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων σε μόνο μία προσομοίωση. Στις τυπικές προσομοιώσεις αναλογικών διατάξεων, η αύξηση του εύρους συχνοτήτων της προσομοίωσης (η οποία οδηγεί σε στενότερους χρονικά παλμούς) όχι μόνο δεν δρα αρνητικά στον χρόνο προσομοίωσης αλλά είναι πιθανόν να προκύψουν και μικρότεροι χρόνοι προσομοίωσης.

3.1.1 Επίλυση

Η FDTD χρησιμοποιεί τις διαφορικές εξισώσεις του Maxwell στο πεδίο του χρόνου τις οποίες διακριτοποιεί στο χώρο με χωρικά βήματα $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ και σχηματίζει δύο διπλά διακριτά πλέγματα (dual grids- Yee). Ακολουθεί διακριτοποίηση στο χρόνο και η επαναληπτική επίλυση των εξισώσεων Maxwell για τις έξι παραμέτρους του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου με τη χρήση του αλγορίθμου leap-frog. Το χρονικό βήμα ικανοποιεί το κριτήριο Courant. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του μακρινού πεδίου χρησιμοποιεί την “αρχή του Huygens” σύμφωνα με την οποία κάθε κλειστή επιφάνεια γύρω από την πηγή μπορεί να θεωρηθεί σαν δευτερεύουσα πηγή.

Η MoM χρησιμοποιεί την εξίσωση Helmholtz για να περιγράψει την σύζευξη μεταξύ των στοιχείων ρεύματος. Θέτει μία ολοκληρωτική εξίσωση για την πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια των αγωγών της διάταξης, τη μετασχηματίζει σε εξίσωση πίνακα, και λύνει την τελευταία ως προς την άγνωστη πυκνότητα ρεύματος. Από την πυκνότητα ρεύματος μπορούν να υπολογισθούν το διάγραμμα ακτινοβολίας, η κατευθυντικότητα και το κέρδος μέσω του μετασχηματισμού από το κοντινό στο μακρινό πεδίο.

Η FEM λύνει τις μερικές χωρικά διαφορικές εξισώσεις στο πεδίο της συχνότητας. Αρχικά διακριτοποιεί τον υπολογιστικό χώρο σε πεπερασμένα στοιχεία “Finite elements” και σχηματίζει

πεδιακές εξισώσεις στην επιφάνεια και στο εσωτερικό κάθε στοιχείου. Τέλος συναρμολογεί όλα τα στοιχεία σε εξισώσεις πίνακα και λύνει το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει[3].

3.1.2 Διακριτοποίηση

Στη περίπτωση της FDTD μεθόδου γίνεται διακριτοποίηση στο χώρο του πεδίου εφαρμογής καθώς και στο μέγεθος του χρόνου. Όσον αφορά στη χωρική διακριτοποίηση η FDTD χρησιμοποιεί κυρίως ορθογώνια διακριτά πλέγματα με αποτέλεσμα να μην προσεγγίζει με ακρίβεια τις καμπύλες επιφάνειες. Η FEM η οποία επίσης εφαρμόζει διακριτοποίηση όγκου χρησιμοποιεί τετράεδρα τα οποία προσεγγίζουν καλύτερα καμπύλες επιφάνειες και μπορούν να δημιουργήσουν οποιοδήποτε άλλο πολύεδρο. Η MoM διακριτοποιεί την επιφάνεια της διάταξης με τη χρήση τριγώνων και τετράπλευρων.

3.1.3 Οριακές συνθήκες

Η FDTD και η FEM απαιτούν τον ορισμό οριακών συνθηκών στις εξωτερικές επιφάνειες του υπολογιστικού όγκου. Οι οριακές συνθήκες χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των διανυσμάτων του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Οι πιο σημαντικές οριακές συνθήκες είναι το ηλεκτρικό τείχος, το μαγνητικό τείχος και οι οριακές συνθήκες απορρόφησης.

Το ηλεκτρικό τείχος προσομοιώνει ένα τέλεια αγωγίμο τείχος, όπως για παράδειγμα το επίπεδο γείωσης. Τα ηλεκτρικά τείχη χρησιμοποιούνται σαν επίπεδα συμμετρίας στα οποία το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια και το μαγνητικό πεδίο είναι εφαπτόμενο. Με τα επίπεδα συμμετρίας μειώνεται σημαντικά ο χρόνος υπολογισμού εφόσον μόνο ένα μέρος της δομής χρειάζεται να προσομοιωθεί.

Αντίστοιχα, το μαγνητικό τείχος προσομοιώνει ένα επίπεδο συμμετρίας στο οποίο το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο και το ηλεκτρικό πεδίο είναι εφαπτόμενο στην επιφάνεια.

Οι οριακές συνθήκες απορρόφησης (Absorbing Boundary Conditions-ABC) προσομοιώνουν τη συμπεριφορά ελεύθερου χώρου ελαχιστοποιώντας τις ανακλάσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ένας τύπος οριακών συνθηκών απορρόφησης αποτελούν οι οριακές συνθήκες τέλεια προσαρμοσμένου στρώματος (Perfectly Matched Layer-PML) οι οποίες τερματίζουν τον υπολογιστικό χώρο με ειδικών υλικών στρώματα που απορροφούν τα κύματα με ελάχιστη ανάκλαση. Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων στρωμάτων μπορεί να αυξηθεί με σκοπό την ελάττωση των ανακλάσεων.

Στην περίπτωση της MoM δεν απαιτούνται οριακές συνθήκες απορρόφησης καθώς η συμπεριφορά του κενού υπονοείται από την ολοκληρωτική εξίσωση και την συνάρτηση Green.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΛΥΤΕΡΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

	MoM	FEM	FDTD
<i>Κατάλληλη για:</i>	Σύρματα, Μεταλλικές επιφάνειες, Σύζευξη ανάμεσα στα στοιχεία στοιχειοκεραίας, Αυθαίρετα σχήματα, Μία ή λίγες συχνότητες	Αυθαίρετα σχήματα, Αυθαίρετα υλικά, Μία ή λίγες συχνότητες, Η δομή δεν πρέπει να είναι ούτε μεγάλη ούτε πολύ πολύπλοκη	Ορθογώνια σχήματα, Αυθαίρετη κατανομή υλικού, Μελέτες ευρείας ζώνης συχνοτήτων
<i>Λιγότερο κατάλληλη για:</i>	Διηλεκτρικά υλικά (πιθανό να γίνει με προηγμένες MoM), Ανομοιογενείς κατανομές υλικών Μελέτες ευρείας ζώνης συχνοτήτων	Σύζευξη ανάμεσα στα στοιχεία στοιχειοκεραίας, Μελέτες ευρείας ζώνης συχνοτήτων	Σύζευξη ανάμεσα στα στοιχεία στοιχειοκεραίας, Αντικείμενα μη ορθογωνίου σχήματος θα προσεγγίζονται από κλιμακούμενη παράσταση, Δομές υψηλού Q (πιθανό να γίνει με επέκταση πρόβλεψης)

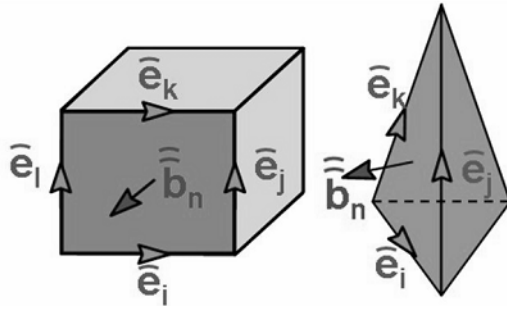
3.2 Λογισμικό προσομοιώσεων

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση και προσομοίωση των κεραιών είναι το CST MICROWAVE STUDIO. Το CST αποτελεί ένα εργαλείο σχεδίασης και προσομοίωσης κεραιών υψηλών συχνοτήτων καθώς και άλλων μικροκυματικών διατάξεων όπως φίλτρα, συζεύκτες και συνδετήρες.

Το εργαλείο αυτό έχει τη δυνατότητα να λύνει τα προβλήματα είτε στο πεδίο της συχνότητας, είτε στο πεδίο του χρόνου, είτε μέσω ολοκληρωτικών εξισώσεων. Εφαρμόζει την υπολογιστική μέθοδο της Πεπερασμένης Ολοκλήρωσης (Finite Integration Technique, FIT).

3.2.1 Η μέθοδος πεπερασμένης ολοκλήρωσης

Η FIT μπορεί να θεωρηθεί σαν μία γενίκευση της FDTD μεθόδου αλλά συνδέεται και με την μέθοδο FEM. Αντίθετα με τις περισσότερες υπολογιστικές μεθόδους η FIT διακρίτοποιεί την ολοκληρωτική μορφή των εξισώσεων Maxwell. Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση του προβλήματος σε κυβικά ή τετραεδρικά πλέγματα.



Σχήμα 3.1 Κατανομή τάσεων και ροών στις ακμές και τις επιφάνειες των πολυέδρων στην FIT

Το επόμενο βήμα είναι η γραφή των εξισώσεων Maxwell σε όλες τις επιφάνειες των στοιχειωδών κελιών

$$\int_{\partial A} E \cdot dS = - \int_A \frac{\partial}{\partial t} B \cdot dA$$

Οι ηλεκτρικές τάσεις και οι μαγνητικές ροές ορίζονται στις ακμές και τις όψεις του πρωταρχικού πλέγματος και οι μαγνητικές τάσεις και οι ηλεκτρικές ροές ορίζονται στις ακμές και τις όψεις του δευτερεύοντος πλέγματος.

Το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης της παραπάνω σχέσης πάνω στο κελί του κύβου σύμφωνα με το Σχήμα 3.1 δίνει τη σχέση:

$$e_i + e_k - e_j - e_i = - \frac{d}{dt} b_n$$

Ενώ στο τετραεδρικό κελί δίνει

$$e_k - e_j - e_i = - \frac{d}{dt} b_n$$

Αφού συλλεχθούν όλα τα διανύσματα ηλεκτρικών και μαγνητικών αγνώστων γράφεται το διακριτό ανάλογο των εξισώσεων Maxwell σε σχέση διάταξης πίνακα:

$$\mathbf{C}\mathbf{e} = - \frac{d}{dt} \mathbf{b}$$

Όπου ο C είναι ο τοπολογικός πίνακας που περιγράφει τον πίνακα μήτρας στο πρωταρχικό πλέγμα. Όμοια γράφεται και η δεύτερη εξίσωση Maxwell στο δευτερεύον πλέγμα. Όλες οι εξισώσεις Maxwell μετασχηματίζονται σε ένα σετ εξισώσεων που είναι γνωστό ως Εξισώσεις Πλέγματος (Maxwell Grid Equations).

$$\int_{\partial A} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = - \int_A \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \leftrightarrow \mathbf{C}\mathbf{e} = - \frac{d}{dt} \mathbf{b}$$

$$\int_{\partial A} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} = - \int_A \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) \cdot d\mathbf{A} \leftrightarrow \mathbf{C}\mathbf{h} = \mathbf{j} + \frac{d}{dt} \mathbf{d}$$

$$\int_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \leftrightarrow \mathbf{S}\mathbf{b} = 0$$

$$\int_{\partial V} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = 0 \leftrightarrow \mathbf{S}\mathbf{d} = \mathbf{q}$$

Οι σχέσεις των ιδιοτήτων των υλικών γίνονται μετά τη διακριτοποίηση:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P} \leftrightarrow \mathbf{d} = \mathbf{M}_\varepsilon \mathbf{e} + \boldsymbol{\varphi}$$

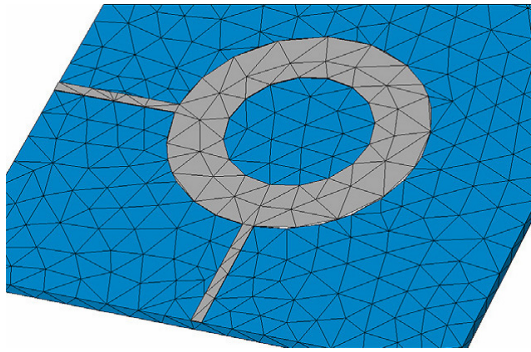
$$\mathbf{M} = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{M} \leftrightarrow \mathbf{b} = \mathbf{M}_\mu \mathbf{h} + \mathbf{m}$$

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{E} \leftrightarrow \mathbf{j} = \mathbf{M}_\sigma \mathbf{e}$$

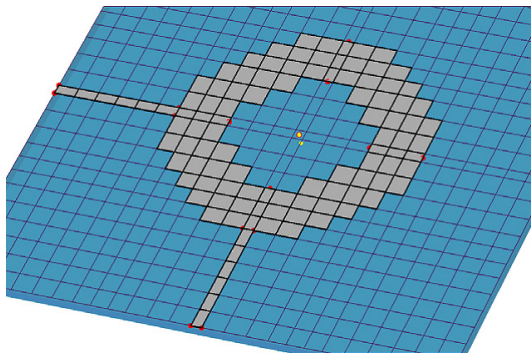
Η FIT μπορεί να εφαρμόσει τετραεδρική αλλά και εξαεδρική διακριτοποίηση. Τα τετραεδρικά πλέγματα χρησιμοποιούνται στο πεδίο της συχνότητας και έχουν το πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν καλή προσέγγιση των καμπύλων επιφανειών. Τα κλασικά εξαεδρικά πλέγματα (Cartesian grids) έχουν το πλεονέκτημα εφαρμογής στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας. Στο πεδίο του χρόνου οδηγούν σε αποδοτικούς αλγορίθμους σε επίπεδο μνήμης και υπολογιστικού χρόνου. Όμως παρουσιάζουν το μειονέκτημα της κλιμακωτής προσέγγισης των καμπύλων επιφανειών, με σημαντικές συνέπειες στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς η επέκταση του λεπτομερούς πλέγματος το οποίο χρειάζεται μόνο σε μία μικρή περιοχή της διάταξης γίνεται σε ολόκληρο τον υπολογιστικό χώρο.

Η τεχνική της τέλει οριακής προσέγγισης (Perfect Boundary Approximation-PBA) που εφαρμόζει η FIT συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του εξαεδρικού πλέγματος με την ακριβή μοντελοποίηση των καμπύλων επιφανειών. Η PBA επιτρέπει τη χρήση ενός πιο αραιού πλέγματος σε σχέση με το απλό εξαεδρικό πλέγμα καταλήγοντας στην ίδια ακρίβεια[4].

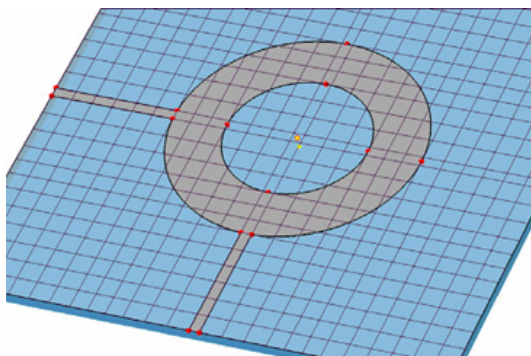
Παρακάτω φαίνονται τα τρία είδη διακριτοποίησης:



Σχήμα 3.2 Τετραεδρικό πλέγμα



Σχήμα 3.3 Εξαεδρικό κλιμακωτό πλέγμα



Σχήμα 3.4 PBA πλέγμα

Το CST MICROWAVE STUDIO περιλαμβάνει τρεις επιλύτες: Τον επιλύτη στο πεδίο του χρόνου (transient solver), τον επιλύτη στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain solver) και τον επιλύτη ιδιορυθμού (eigenmode solver).

3.2.2 Ο επιλύτης στο πεδίο του χρόνου

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο transient solver[5]. Ο transient solver επιτρέπει την προσομοίωση της συμπεριφοράς της διάταξης σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων μόνο με ένα υπολογιστικό τρέξιμο. Ο transient solver βασίζεται στην επίλυση των Εξισώσεων Πλέγματος. Έπειτα από τη διακριτοποίηση στον χώρο ακολουθεί η διακριτοποίηση στο χρόνο κατά Yee, μέσω του αλγορίθμου leap frog. Θεωρώντας το στοιχειώδες βήμα προσομοίωσης Δt , εφαρμόζονται οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό των πεδιακών τιμών σε κάθε χρονικό βήμα.

$$\mathbf{e}^{n+1/2} = \mathbf{e}^{n-1/2} + \Delta t \mathbf{M}_\varepsilon^{-1} [\mathbf{C} \mathbf{M}_\mu^{-1} \mathbf{b}^n + \mathbf{j}_S^n]$$

$$\mathbf{b}^{n+1} = \mathbf{b}^n - \Delta t \mathbf{C} \mathbf{e}^{n+1/2}$$

Το όριο ευστάθειας για το χρονικό βήμα Δt σύμφωνα με το κριτήριο Courant δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\Delta t \leq \frac{\sqrt{\varepsilon \mu}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}}$$

Το οποίο πρέπει να ισχύει για κάθε κελί.

3.2.3 Χαρακτηριστικά του προγράμματος

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του προγράμματος ξεκινώντας από την μοντελοποίηση και καταλήγοντας στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης.

3.2.3.1 Μοντελοποίηση

Το περιβάλλον του CST περιέχει τα βασικά γεωμετρικά σχήματα για το σχεδιασμό τρισδιάστατων δομών καθώς και τη δυνατότητα χρήσης ακανόνιστων σχημάτων τα οποία μπορούν να εξαχθούν ως επιφάνεια (extrude) ή μπορούν να σχηματιστούν από το ίχνος μίας καμπύλης (trace from curve). Έτσι μπορεί εύκολα να σχεδιαστεί κάθε τρισδιάστατο γεωμετρικό σχήμα και να πραγματοποιηθούν συνενώσεις, αφαιρέσεις, τομές μεταξύ δύο ή περισσότερων σχημάτων (Boolean add, subtract, insert, intersect κ.ά.). Οι ιδιότητες του κάθε υλικού (μαγνητική-ηλεκτρική επιτρεπτότητα, αγωγιμότητα, απώλειες) μπορούν να ορισθούν από τον σχεδιαστή ή να επιλεχθούν από την βιβλιοθήκη υλικών. Επίσης ορίζονται οι μονάδες μέτρησης και η περιοχή συχνοτήτων μελέτης της διάταξης.

Έχοντας ορίσει τη γεωμετρία της διάταξης και τα τυπικά μεγέθη (περιοχή συχνοτήτων, μονάδες μέτρησης, περιβάλλον υλικό), ορίζεται το boundary box, ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που περιβάλλει τη διάταξη και καθορίζει τα όρια μέσα στα οποία γίνονται υπολογισμοί που αφορούν στο κοντινό πεδίο. Κάθε πληροφορία μακρινού πεδίου υπολογίζεται με βάση τους υπολογισμούς στο boundary box. Στις όψεις του boundary box καθορίζονται οι κατάλληλες οριακές συνθήκες. Επίσης δίνεται η δυνατότητα καθορισμού συμμετριών (ηλεκτρικής, μαγνητικής συμμετρίας) αν υπάρχουν οι οποίες βελτιώνουν σημαντικά το χρόνο προσομοίωσης.

Η διέγερση της διάταξης γίνεται από θύρες κυματοδηγών, οι οποίες μοντελοποιούν κυματοδηγούς άπειρου μήκους προς την αρνητική κατεύθυνση διάδοσης. Τα σήματα εισόδου

παράγονται αυτόματα από το πρόγραμμα και είναι συνήθως Γκαουσιανοί παλμοί πεπερασμένης διάρκειας, παράγοντας μια κρουστική διέγερση.

3.2.3.2 Διακριτοποίηση (meshing)

Ο καθορισμός του πλέγματος (των σημείων του μοντέλου στα οποία θα υπολογιστούν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία) μπορεί να καθοριστεί από τον σχεδιαστή, ο οποίος μπορεί να επιλέξει την πυκνότητα του πλέγματος είτε για ολόκληρη την υπολογιστική περιοχή (global meshing) είτε για συγκεκριμένα στελέχη της διάταξης (local meshing). Το πρόγραμμα εμπεριέχει και κάποια τυποποιημένα σχήματα διακριτοποίησης όπως είναι η αυτόματη πύκνωση σε συγκεκριμένα υλικά (per refinement) και σε σημεία με απότομες μεταβάσεις ή ασυνέχειες και η αραίωση σε περιοχές με μεγάλη ομοιογένεια.

Ένα ακόμη σημαντικό εργαλείο είναι η επιλογή της προσαρμόσιμης βελτίωσης διακριτοποίησης (adaptive mesh refinement), το οποίο δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της ακρίβειας της διακριτοποίησης μέσω της διαδοχικής βελτίωσης της διακριτοποίησης, της επανεκτέλεσης της προσομοίωσης και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων σε κάθε βήμα.

3.2.3.3 Παραμετροποίηση

Το CST δίνει τη δυνατότητα της πλήρους παραμετροποίησης των πιο σημαντικών μεγεθών του μοντέλου (διαστάσεων, συχνοτήτων). Έτσι δίνεται η δυνατότητα επέμβασης στην γεωμετρία της σχεδίασης πολύ εύκολα, η δημιουργία σχέσεων μεταξύ παραμέτρων καθώς και η παραμετρική μελέτη της διάταξης μέσω κάποιων εργαλείων του CST. Δύο από τα πιο αξιοσημείωτα εργαλεία που διαθέτει το CST Microwave Studio και βοηθούν σημαντικά την παραμετρική μελέτη είναι η παραμετρική σάρωση (parametric sweep) και το εργαλείο βελτιστοποίησης (optimizer).

Η παραμετρική σάρωση είναι ένα είδος διαδοχικών προσομοιώσεων στις οποίες έχει οριστεί η μεταβολή μίας ή και περισσότερων παραμέτρων σε ένα διάστημα τιμών και με συγκεκριμένο βήμα. Δίνεται έτσι η δυνατότητα καταγραφής μίας ενιαίας εικόνας αποτελεσμάτων στο διάστημα μεταβολής της παραμέτρου συναρτήσει της τελευταίας και κατ' επέκταση η παρατήρηση και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την συμπεριφορά των καταγραφόντων αποτελεσμάτων σε σχέση με την μεταβαλλόμενη παράμετρο.

Ο optimizer είναι ένα εργαλείο βελτιστοποίησης το οποίο με τη δυνατότητα χρήσης δύο αλγορίθμων βελτιστοποίησης βρίσκει την βέλτιστη τιμή της υπό μελέτη παραμέτρου, μέσα σε ένα προκαθορισμένο διάστημα, η οποία ικανοποιεί τον στόχο που έχει τεθεί.

Η σχεδίαση ενός μοντέλου αποτελεί ένα σύνθετο, μεγάλης πολυπλοκότητας πρόβλημα. Το CST προσφέρει τεράστιες διευκολύνσεις στη σχεδίαση και τη μελέτη της συμπεριφοράς του μοντέλου που σχεδιάζεται. Παρόλα αυτά χρειάζεται η εμπειρία και η

θεωρητική γνώση του σχεδιαστή για να εκμεταλλευτεί όλα τα προσφερόμενα υπολογιστικά οφέλη του λογισμικού και να σχεδιάσει ένα αποδοτικό μοντέλο.

3.2.3.4 Προσομοιώσεις

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης στο πεδίο του χρόνου (transient solver). Ο χρόνος προσομοίωσης μπορεί να είναι από λίγα λεπτά έως και πολλές ώρες/ημέρες, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια και την πυκνότητα του πλέγματος καθώς και τους υπολογιστικούς πόρους. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης δίνονται πληροφορίες για την πορεία της, εμφανίζονται προειδοποιητικά μηνύματα για τυχόν προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της.

3.2.3.5 Απεικόνιση

Μετά το τέλος της προσομοίωσης γίνεται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Έχουμε ήδη επισημάνει την σημασία του πλέγματος· το πρόγραμμα μας επιτρέπει να βλέπουμε την πυκνότητα του σε όλα τα σημεία. Πολλές δυνατότητες απεικόνισης δίνονται φυσικά μετά το τέλος της προσομοίωσης όπως τρισδιάστατα, δισδιάστατα, πολικά διαγράμματα ακτινοβολίας, χάρτες Smith επιφανειακές πυκνότητες ρευμάτων συναρτήσεως του χρόνου (animation), κοντινό ηλεκτρικό/μαγνητικό πεδίο κ.ά. Το πρόγραμμα, επίσης, εκτός από το συντελεστή ανάκλασης υπολογίζει το λόγο στάσιμων κυμάτων (VSWR), την αντίσταση εισόδου της κεραίας, το κέρδος κ.ά.

3.3 Τεχνικές τροφοδοσίας

Οι τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία των διαφόρων κεραίων που έχουν σχεδιαστεί στην εργασία είναι α) η μικροταινία και β) το ομοαξονικό καλώδιο

3.3.1 Μικροταινία

Η μικροταινία αποτελεί έναν από τους πλέον δημοφιλείς τύπους επίπεδων γραμμών μεταφοράς. Αποτελείται από έναν αγωγό πλάτους W ο οποίος τυπώνεται σε ένα λεπτό γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα πάχους H [6],[7]. Λόγω της παρουσίας αέρα πάνω από τον αγωγό η μικροταινία δεν μπορεί να υποστηρίξει καθαρό ρυθμό TEM όπως θα συνέβαινε εάν το διηλεκτρικό είχε διηλεκτρική σταθερά ίση με 1. Αυτό συμβαίνει διότι η μικροταινία έχει τις περισσότερες πεδιακές γραμμές συγκεντρωμένες στο χώρο μεταξύ της ταινίας και της γείωσης και μερικές στην περιοχή του αέρα πάνω από το υπόστρωμα. Έτσι η μικροταινία δεν μπορεί να υποστηρίξει έναν καθαρό ρυθμό TEM αλλά υποστηρίζει υβριδικούς ρυθμούς οι οποίοι είναι ένας συνδυασμός TE-TM ρυθμών. Στην περίπτωση όπου το διηλεκτρικό έχει αρκετά μικρό πάχος $H \ll \lambda$ οι ρυθμοί που κυματοδηγούνται είναι ημι-TEM (quasi-TEM) είναι δηλαδή στατικά. Μπορούν να εξαχθούν λοιπόν καλές προσεγγίσεις για την φασική ταχύτητα, τη σταθερά διάδοσης και τη χαρακτηριστική αντίσταση από τις ημιστατικές λύσεις οι οποίες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$u_p = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_c}}$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_c}$$

Όπου ϵ_c η ενεργός διηλεκτρική σταθερά της μικροταινιακής γραμμής. Αφού μερικές πεδιακές γραμμές βρίσκονται μέσα στο διηλεκτρικό και μερικές στον αέρα, η ενεργός διηλεκτρική σταθερά θα ικανοποιεί τη σχέση

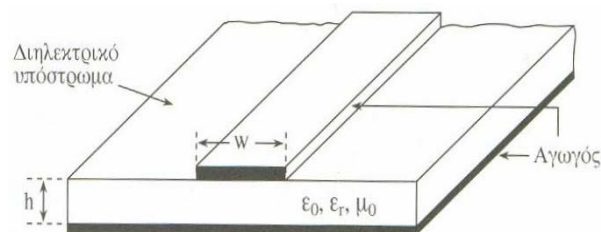
$$1 < \epsilon_c < \epsilon_r$$

Η ενεργός διηλεκτρική σταθερά μπορεί να ερμηνευθεί ως η διηλεκτρική σταθερά ενός ομογενούς μέσου που αντικαθιστά τις περιοχές αέρα και διηλεκτρικού της μικροταινίας και δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12H/W}}$$

Για υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών της γραμμής (ταχύτητα διάδοσης, χωρητικότητα, χαρακτηριστική αντίσταση) χρησιμοποιούνται η μέθοδος των μεταβολών ή η μέθοδος Galerkin .

Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η γεωμετρία της μικροταινίας



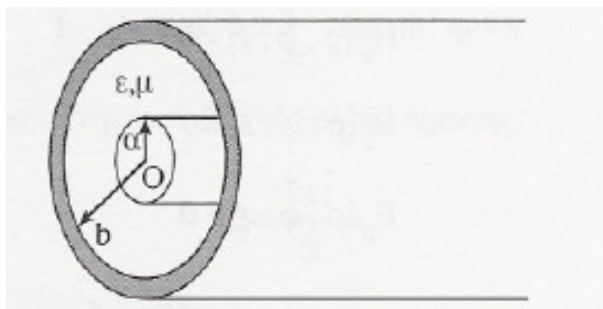
Σχήμα 3.5 Γεωμετρία μικροταινίας

Η τροφοδότηση των κεραιών της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έγινε με τη χρήση μικροταινίας.

3.3.2 Ομοαξονική γραμμή

Η ομοαξονική γραμμή αποτελείται από έναν εσωτερικό μεταλλικό κυλινδρικό αγωγό ακτίνας a . Τον αγωγό αυτό περιβάλλει διηλεκτρικό υλικό το οποίο περικλείεται εξωτερικά από μία κυλινδρική μεταλλική επιφάνεια . Ο βασικός ρυθμός κυματοδήγησης της ομοαξονικής γραμμής ο TEM αλλά μπορεί να υποστηρίξει και ρυθμούς ανώτερης τάξης TM και TE.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία η γεωμετρία της ομοαξονικής γραμμής χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ενός ομοαξονικού συνδετήρα ο οποίος τροφοδοτεί την κεραία με την παρεμβολή της μικροταινίας.



Σχήμα 3.6 Γεωμετρία ομοαξονικού καλωδίου

3.4 Σχεδίαση τετραγωνικού ομοαξονικού συνδετήρα

3.4.1 Εισαγωγή

Ο κυλινδρικός ομοαξονικός συνδετήρας SMA χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική μετάβαση των σημάτων από την ομοαξονική γραμμή μεταφοράς στην μικροταινία. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας SMA ο οποίος έχει σχεδιαστεί στο CST. Ο SMA αποτελείται από ένα κομμάτι ομοαξονικής γραμμής του οποίου ο κεντρικός αγωγός καταλήγει σε μία κυλινδρική ακίδα η οποία ακουμπά πάνω στην μικροταινία. Συνήθως έχει δύο βραχίονες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μηχανική στήριξη του συνδετήρα πάνω στην μικροταινία.

Στην παρούσα διπλωματική η τροφοδότηση των κεραιών που σχεδιάστηκαν έγινε με τη χρήση τετραγωνικού ομοαξονικού συνδετήρα ο οποίος είχε παρόμοιες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες με τον κυλινδρικό. Η χρήση μόνο των θυρών κυματοδότησης (waveguide ports) έγινε στις αρχικές προσομοιώσεις οι οποίες έδωσαν μία αρχική εκτίμηση για το μήκος του στελέχους της κεραίας το οποίο καθορίζει την περιοχή συντονισμού της κεραίας. Στη συνέχεια, όλες οι υπόλοιπες προσομοιώσεις έγιναν με την χρήση του SMA με σκοπό να αποδώσουμε ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο του οποίου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα είναι πιο κοντά σ' αυτά του μοντέλου που θα κατασκευαστεί και θα μετρηθεί. Η θύρα κυματοδότησης (ένα τετραγωνικό κομμάτι) τοποθετήθηκε στην είσοδο του SMA έτσι ώστε να δημιουργηθεί η σωστή κατανομή πεδίου που θα διεγείρει το μοντέλο.

Σύμφωνα με συγκρίσεις που έχουν γίνει στα αποτελέσματα προσομοιώσεων κεραιών με και χωρίς συνδετήρα, ο SMA ασκεί σημαντική επιρροή στα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά (παρουσίαση δεύτερου μη προβλεπόμενου συντονισμού) και θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο δεύτερος συντονισμός προέκυψε λόγω της ασυνέχειας μεταξύ του συνδετήρα και του ομοεπίπεδου κυματοδηγού.

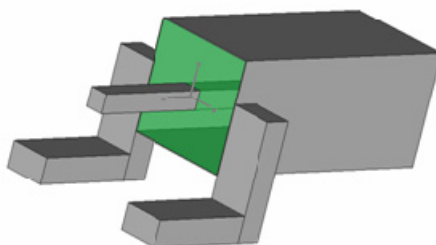
Η κατασκευή και χρήση του τετραγωνικού SMA αντί του κυλινδρικού, ο οποίος αντιπροσωπεύει τους συνδετήρες που κυκλοφορούν στο εμπόριο, έγινε για λόγους υπολογιστικού κόστους. Η διακριτοποίηση της διάταξης γίνεται με εξαεδρικά κελιά. Ο κυλινδρικός συνδετήρας χρειάζεται πολύ μεγαλύτερο αριθμό κελιών έτσι ώστε η διακριτοποίηση να πετυχαίνει υψηλή ακρίβεια καθώς το σχήμα προσεγγίζεται δυσκολότερα σε σχέση με τον τετραγωνικό.

3.4.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση

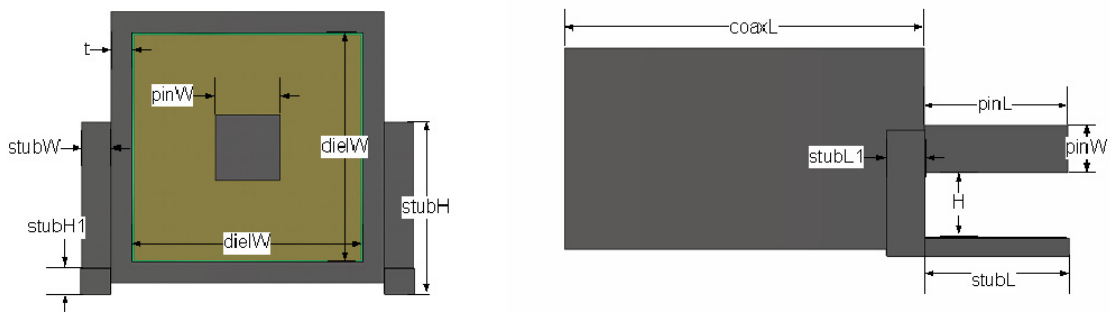
Η διαδικασία της σχεδίασης χωρίστηκε σε τρία μέρη: την σχεδίαση και προσομοίωση αρχικά μόνο του συνδετήρα με σκοπό τον καθορισμό των διαστάσεων του ώστε η χαρακτηριστική αντίστασή του να είναι 50Ω , έπειτα των 14 μικροταινιακών γραμμών με 14 διαφορετικά υποστρώματα με τη χρήση θυρών κυματοδότησης ώστε να δοθεί μία πρώτη προσέγγιση του πλάτους της γραμμής W που αντιστοιχεί σε αντίσταση εισόδου ίση με 50Ω και τέλος των 14 μοντέλων με δύο συνδετήρες οι οποίοι τροφοδοτούν την κάθε μικροταινιακή γραμμή.

3.4.2.1 Τετραγωνικός ομοαξονικός συνδετήρας

Ο τετραγωνικός ομοαξονικός συνδετήρας αποτελείται από τον κεντρικό τετραγωνικό αγωγό, τον τετραγωνικό εξωτερικό αγωγό ενώ ανάμεσα των δύο αγωγών υπάρχει διηλεκτρικό υπόστρωμα. Στα πλαίσια της σχεδίασης, χρειάστηκε η δημιουργία δύο συνδετήρων με διαφορετικές διαστάσεις, λόγω του μεγάλου αριθμού διηλεκτρικών υλικών στις μικροταινιακές γραμμές οι οποίες έχουν διαφορετικό πλάτος μικροταινιακού αγωγού. Οι δύο βραχίονες ενώνουν το επίπεδο γείωσης της μικροταινιακής με τον εξωτερικό αγωγό του συνδετήρα. Το διηλεκτρικό του συνδετήρα είναι το Teflon με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 3.3$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta=0.0003$.



Σχήμα 3.7 Τετραγωνικός ομοαξονικός συνδετήρας



Σχήμα 3.8 Πρόσωση και πλάγια όψη του τετραγωνικού ομοαξονικού συνδετήρα

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΤΗΡΩΝ

(mm)	pinW	dielW	t	coaxL	pinL	stubW	stubL	stubL1	stubH1
Sma 1	0.78	4.2	0.0356	9.5	4.5	1.7	4	1	1
Sma 2	1	5.2	0.0356	9.5	4.5	1.7	4	1	1

Ο παραπάνω πίνακας περιέχει τις διαστάσεις των δύο συνδετήρων. Οι διαστάσεις H και stubH υπολείπονται μεταβάλλονται ανάλογα με το πάχος της μικροταινίας που θα τροφοδοτήσει ο συνδετήρας.

Το μοντέλο του συνδετήρα διεγέρθηκε με θύρα κυματοδήγησης και οριακές συνθήκες ανοιχτού χώρου (open add space) ενώ αρχικά εφαρμόστηκε προσαρμόσιμη διακριτοποίηση (adaptive meshing) η οποία εμφάνιζε ικανοποιητική σύγκλιση αποτελεσμάτων στο επίπεδο 20/20/50 το οποίο και εφαρμόστηκε στις προσομοιώσεις. Οι μετρήσεις έγιναν στο εύρος συχνοτήτων 0 έως 6 GHz.

Καθώς ο λόγος των διαστάσεων του εξωτερικού και του εσωτερικού αγωγού καθορίζουν την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, κρατώντας σταθερό το πλάτος που αρχικά δόθηκε στον εσωτερικό αγωγό έγινε παραμετρική σάρωση (parametric sweep) με βήμα 0.1 ώστε να βρεθεί η κατάλληλη τιμή του πλάτους του εξωτερικού αγωγού που θα έχει ως αποτέλεσμα χαρακτηριστική αντίσταση ίση με 50Ω. Έτσι το τελικό πάχος του διηλεκτρικού καθορίστηκε ίσο με 4.2mm.

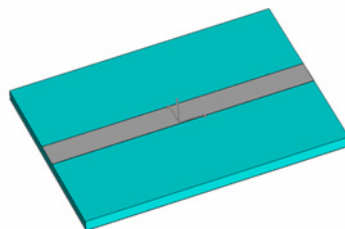
3.4.2.2 Μικροταινία

Σχεδιάστηκαν 14 μικροταινίες οι οποίες έχουν διαφορετικό διηλεκτρικό υλικό η καθεμία. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά των διηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σαν υποστρώματα στις μικροταινιακές γραμμές.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

	ϵ_r	$\tan\delta$	H (mill)
1. Rogers RT/duroid 5880	2.2	0.0009	60
2. Bungard FR-4	4.5	0.0150	63
3. Rogers Ro3006	6.15	0.0020	50
4. Rogers RO4003C	3.38	0.0027	60
5. Rogers RO4350B	3.66	0.0037	60
6. Rogers RT/duroid 6006	6.15	0.0027	100
7. Rogers TMM6	6	0.0023	100
8. Rogers TMM10i	9.80	0.0020	125
9. Taconic Cer-10	10	0.0035	125
10. Taconic RF-60A	6.15	0.0028	60
11. Taconic RF-45	4.5	0.0037	62
12. Taconic RF-35A	3.5	0.0016	60
13. Taconic RF-30	3	0.0014	60
14. Taconic TLX-8	2.55	0.0019	62

Η κάθε μικροταινία αποτελείται από το διηλεκτρικό υπόστρωμα διαστάσεων $40 \times 30\text{mm}$ και το πάχος H το οποίο διαφέρει στην κάθε περίπτωση, τον μικροταινιακό αγωγό με πλάτος W και το επίπεδο γείωσης.



Σχήμα 3.9 Μικροταινία

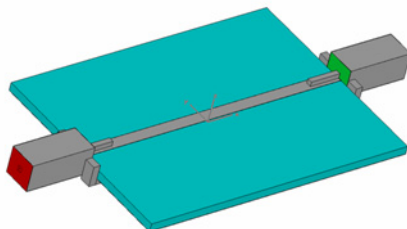
Το W επιλέχθηκε στην κάθε περίπτωση ώστε η αντίσταση εισόδου της γραμμής να είναι 50Ω . Λόγω διαφορετικού διηλεκτρικού υλικού και πάχους H, για την κάθε μικροταινία προέκυψε διαφορετικό πάχος W γραμμής. Και σ' αυτήν την περίπτωση εφαρμόστηκε "adaptive meshing" και συνέκλινε στο επίπεδο 20/20/50. Οι μετρήσεις έγιναν στο εύρος συχνοτήτων 0 έως 6 GHz. Για τη διέγερση της μικροταινίας εφαρμόστηκαν "waveguide ports". Εφαρμόστηκαν οριακές συνθήκες "open add space". Για την εύρεση μιας αρχικής εκτίμησης του πάχους της γραμμής W σε κάθε περίπτωση έγινε "parametric sweep" με βήμα 0.1 για κάποιες τιμές του W με στόχο την χαρακτηριστική αντίσταση των 50Ω .

3.4.2.3 Συνολικό μοντέλο

Στη συνέχεια υλοποιήθηκε το συνολικό μοντέλο το οποίο αποτελείται από την μικροταινία και δύο συνδετήρες οι οποίοι τροφοδοτούν την μικροταινία στα δύο άκρα της. Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο meshing και οριακές συνθήκες. Στο εύρος 0 έως 6 GHz έγινε η βελτιστοποίηση της παραμέτρου W μέσω του βελτιστοποιητή (optimizer) με τον αλγόριθμο

Newton-Raphson με στόχο την ελαχιστοποίηση της παραμέτρου S_{21} (συντελεστή μετάδοσης) έτσι ώστε να επιτευχθεί προσαρμογή μεταξύ του συνδετήρα και της μικροταινίας.

Τέλος για το κάθε μοντέλο μετρήθηκε η ενεργός διηλεκτρική σταθερά ϵ_{eff} .



Σχήμα 3.10 μοντέλο μικροταινίας διεγερόμενο μέσω δύο ομοαξονικών συνδετήρων

3.4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 3.4 ο οποίος περιέχει για το καθένα από τα 14 μοντέλα την αρχική εκτίμηση του W_1 που έγινε στο μοντέλο της μικροταινίας καθώς και του βέλτιστου W_2 που υπολογίστηκε στο τελικό μοντέλο. Επίσης ο πίνακας περιέχει τον αριθμό κελιών (meshing) του μοντέλου της μικροταινίας και του συνολικού μοντέλου ώστε να εκτιμηθεί ο αριθμός των κελιών που προστίθεται με την εισαγωγή των δύο συνδετήρων στο μοντέλο της μικροταινίας. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν μετρήσεις στις συχνότητες 0 έως 6 GHz.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4 ΠΛΑΤΗ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΙ ΚΕΛΙΩΝ

	W_1 (mm)	W_2 (mm)	microstrip	microstrip + 2 connectors
1. Rogers RT/duroid	4.3	4.6	60858	65622
2. Bungard FR-4	2.6	3.1	83160	59688
3. Rogers Ro3006	1.5	1.7	88816	68880
4. Rogers RO4003C	3	3.5	77168	55312
5. Rogers RO4350B	3	3.2	77168	55312
6. Rogers RT/duroid 6006	3.3	4.3	97350	68178
7. Rogers TMM6	3.3	4.3	95760	69768
8. Rogers TMM10i	2.4	3.7	127890	74410
9. Taconic Cer-10	2.4	3.8	129717	72583

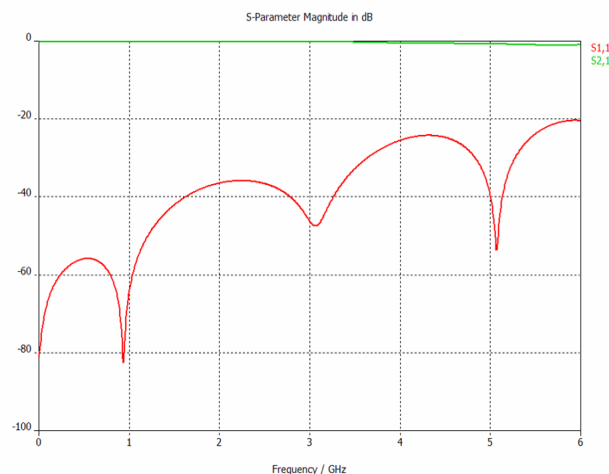
10.Taconic RF-60A	1.8	2.1	97356	60340
11.Taconic RF-45	2.6	3.1	84700	58148
12.Taconic RF-35A	2.9	3.5	55350	77130
13 Taconic RF-30	3.5	3.7	66300	62340
14.Taconic TLX-8	3.8	4.3	40248	80652

Κατά τη διάρκεια της εύρεσης του W1 παρατηρήθηκε όπως αναμενόταν ότι καθώς αυξάνονταν το W μειώνονταν η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής καθώς επίσης και ότι σε μεγαλύτερα πάχη διηλεκτρικού ή σε μεγαλύτερες τιμές του ϵ_r , το W έπρεπε να παίρνει μεγαλύτερες τιμές ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή χαρακτηριστική αντίσταση των 50Ω. Στο συνολικό μοντέλο κατά τον υπολογισμό του W παρατηρήθηκε ότι αυτό αυξήθηκε (λόγω της αυτεπαγωγής που εισάγει ο συνδετήρας που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χαρακτηριστικής αντίστασης).

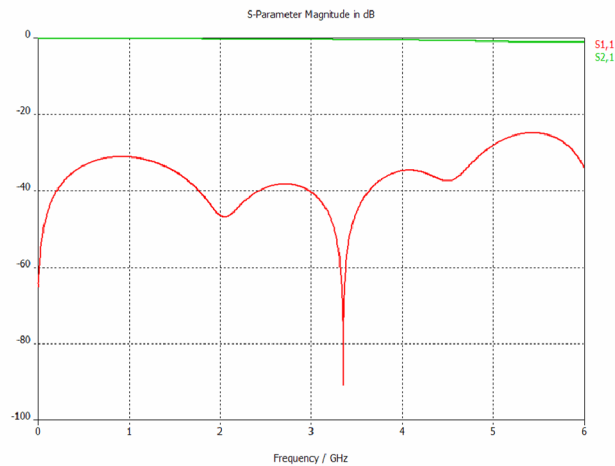
Σε κάποια μοντέλα τα οποία είχαν μεγάλο H καθώς και μεγάλο ϵ_r το W αυξανόταν αρκετά με αποτέλεσμα ο αγωγός να βραχυκυκλώνει με τον εξωτερικό αγωγό του συνδετήρα. Γι' αυτό το λόγο δοκιμάστηκαν μικρότερα πάχη διηλεκτρικών που είναι διαθέσιμα στα συγκεκριμένα υλικά τα οποία έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Επειδή στα μοντέλα Rogers RT/duroid 5880, Rogers TMM6, Rogers TMM10i, Taconic Cer-10 $\epsilon_r=10$, Taconic TLX-8, δεν επιτυγχάνονταν καλή προσαρμογή σε όλο το εύρος συχνοτήτων κατασκευάστηκε καινούριος συνδετήρας με πάχος εσωτερικού τετραγωνικού αγωγού ίσο με 1mm και πάχος διηλεκτρικού 5,2mm.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά οι γραφικές παραστάσεις των S παραμέτρων (παραμέτρων σκέδασης) δύο μοντέλων:



Σχήμα 3.11 Rogers RT/duroid 5880



Σχήμα 3.12 Bungard FR-4

Από τις γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι η παράμετρος S_{11} βρίσκεται κοντά στα 0 dB πράγμα που σημαίνει ότι έχει επιτευχθεί καλή προσαρμογή μεταξύ του συνδετήρα και της μικροταινίας, ενώ η παράμετρος S_{21} στις περισσότερες περιπτώσεις βρίσκεται κάτω από τα -30dB στις περιοχές 2 έως 3 GHz ενώ στις συχνότητες των 6 GHz φτάνει μέχρι τα 20 dB πράγμα που υποδεικνύει ότι δεν επιτυγχάνεται αρκετά καλή προσαρμογή σ' εκείνη την περιοχή.

Στη συνέχεια παρατίθεται ο Πίνακας 3.5 με τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την ενεργό διηλεκτρική σταθερά ϵ_{eff} και την αντίσταση εισόδου του τελικού μοντέλου. Οι μετρήσεις έγιναν στο εύρος των 0 έως 6 GHz.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5 ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ

	ϵ_{eff}	Port impedance (Ω)
1. Rogers RT/duroid 5880	2.171	48.94
2. Bungard FR-4	3.683	49.75
3. Rogers Ro3006	4.506	49.65
4. Rogers RO4003C	3.048	49.58
5. Rogers RO4350B	3.084	49.75
6. Rogers RT/duroid 6006	5.094	49.12
7. Rogers TMM6	4.985	49.12
8. Rogers TMM10i	7.692	49.02
9. Taconic Cer-10	7.876	48.98
10. Taconic RF-60A	4.603	49.90
11. Taconic RF-45	3.667	49.77
12. Taconic RF-35A	3.01	49.54
13. Taconic RF-30	2.667	50.59
14. Taconic TLX-8	2.38	49.13

Το ϵ_{eff} ορίζεται ως η διηλεκτρική σταθερά του ομοιόμορφου διηλεκτρικού υλικού (το οποίο θεωρείται ότι περικλείει τον μικροταινιακό αγωγό) το οποίο έχει ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά με την μικροταινιακή γραμμή με διηλεκτρική σταθερά υποστρώματος ϵ_r . Το ϵ_{eff}

λαμβάνει υπ' όψιν του τα φαινόμενα κροσσών που παρουσιάζει η μικροταινία λόγω της παρουσίας αέρα πάνω από αυτήν. Έτσι παίρνει τιμές στην περιοχή

$$\frac{\epsilon_r + 1}{2} < \epsilon_{eff} < \epsilon_r$$

το οποίο επαληθεύεται και στα παρακάτω αποτελέσματα. Ο υπολογισμός του έγινε βάση του τύπου

$$\epsilon_{eff} = \left[\frac{\arg(S_{21})}{360 * \frac{L_{strip}}{\lambda_0}} \right]^2$$

όπου L_{strip} είναι το μήκος της μικροταινίας και λ_0 είναι το μήκος κύματος στο

κενό το οποίο υπολογίστηκε από τον τύπο $\lambda_0 = \frac{c}{f_{zero}}$ όπου c ταχύτητα στο κενό και

f_{zero} επιλέχθηκε ίσο με 2GHz . Ο τύπος αυτός προκύπτει ως εξής: $\arg(S_{21}) = \beta * L_{strip}$, όπου

$\beta = \frac{360}{\lambda_g}$ και $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$ είναι το μήκος κύματος στο ομοιόμορφο διηλεκτρικό υλικό.

3.5 Βιβλιογραφία

- [1] Frank Gustrau and Dirk Manteuffel, “EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication Systems”, Springer, Germany 2006.
- [2] Dirk Manteuffel, “Numerical Techniques for Antenna Design”, UPC Short Course Compact Antennas, June 2007.
- [3] A. Hoorfar, V. Jamnejad, “Electromagnetic Modeling and Analysis of Wireless Communication Antennas”, IEEE Microwave Magazine, March 2003
- [4] I. Muntenanu, T. Weiland, “RF & Microwave Simulation with the Finite Integration Technique – From Component To System Design”, Invited Paper at SCEE-2006
- [5] CST Microwave Studio Getting Started, CST Studio Suite, 2006
- [6] Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου, “Εισαγωγή στα Μικροκύματα”, Β΄ Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1994.
- [7] David M, Pozar, “Μικροκυματική Τεχνολογία”, Α΄ Έκδοση, Εκδόσεις Ίων, 2004

4. Τρισδιάστατες Κεραίες Ημιτονοειδούς Γεωμετρίας

4.1 Εισαγωγή

Μία ηλεκτρικά μικρή κεραία, στη συχνότητα λειτουργίας της, είναι αρκετά πιο μικρή σε ύψος από ένα μονόπολο $\lambda/4$. Τα χαρακτηριστικά μιας ηλεκτρικά μικρής κεραίας είναι η χαμηλή αντίσταση ακτινοβολίας και η μεγάλη αντίδραση. Η απόδοση ακτινοβολίας και το εύρος ζώνης συνεπώς μειώνονται με το μέγεθος της κεραίας, με αποτέλεσμα οι ηλεκτρικά μικρές κεραίες να είναι μη αποδοτικές, και αυτό συνοδεύεται από μεγάλα ρεύματα στους αγωγούς, μεγάλες ωμικές απώλειες και μεγάλες ποσότητες αποθηκευμένης ενέργειας στο κοντινό πεδίο της κεραίας. Η μη αποδοτικότητα της κεραίας συνοψίζεται από τις μεγάλες τιμές του συντελεστή ποιότητας Q , γεγονός το οποίο προβλέπεται από τους βασικούς περιορισμούς του Chu οι οποίοι επανεξετάστηκαν από τον McLean[1].

Η σμίκρυνση των κεραίων σύρματος και κατ' επέκταση και των τυπωμένων κεραίων βασίζεται στην συσκευασία μίας μεγάλης μήκους κεραίας σε έναν μικρό όγκο. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν μικρότερης κεραίας με δεδομένη την συχνότητα συντονισμού ή, ισοδύναμα, η επίτευξη της χαμηλότερης δυνατής συχνότητας συντονισμού με δεδομένο το μέγεθος της κεραίας. Έχουν μελετηθεί διάφορες τεχνικές σμίκρυνσης κεραίων οι οποίες είναι: (α) η διηλεκτρική φόρτιση, (β) ο καθρεφτισμός στο επίπεδο γείωσης (γ) η χωρητική φόρτιση και (δ) η αναδίπλωση. Μερικές κεραίες που έχουν προκύψει με τη μέθοδο της αναδίπλωσης είναι οι μαιανδρικές, οι μορφοκλασματικές και οι σπειροειδείς κεραίες.

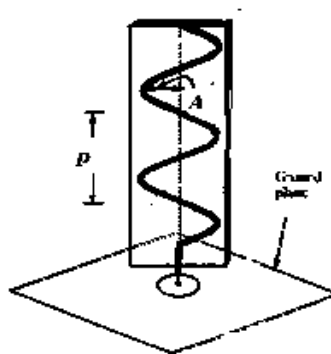
Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η ημιτονοειδής κεραία η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει την μαιανδρική κεραία. Η μαιανδρική κεραία χρησιμοποιεί την τεχνική της αναδίπλωσης ως τεχνική σμίκρυνσης, η οποία προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα στην συμπεριφορά της.

Κατά την αναδίπλωση ενός μονοπόλου παρατηρούνται κάποια φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την συμπεριφορά της κεραίας. Αρχικά λόγω της αντίθετης πολικότητας ρευμάτων που ρέουν στην αναδιπλωμένη δομή παρατηρείται ακύρωση των γειτονικών ρευμάτων, η οποία εξαρτάται από την απόσταση των γειτονικών τμημάτων. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί μείωση του ενεργού μήκους της κεραίας και αύξηση της συχνότητας συντονισμού με αποτέλεσμα να χρειάζεται μία μικρή αύξηση του πραγματικού μήκους της αναδιπλωμένης δομής έτσι ώστε να

επιτευχθεί συντονισμός στην ίδια συχνότητα με το απλό μονόπολο. Η ακύρωση επίσης των ρευμάτων προκαλεί την αύξηση της αντίστασης ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την αντιστάθμιση της μείωσης της αντίστασης ακτινοβολίας λόγω της μείωσης του μεγέθους της κεραίας[2].

Ένα ακόμη ενδιαφέρον φαινόμενο το οποίο προκαλεί μείωση του ενεργού μήκους της κεραίας είναι η σύζευξη μεταξύ των γωνιών της δομής της. Οι γωνίες αυτές λοιπόν ακτινοβολούν σφαιρικά κύματα και ταυτόχρονα λαμβάνουν τα σήματα που ακτινοβολούν οι υπόλοιπες. Σαν συνέπεια, μέρος του σήματος δεν ακολουθεί το μαιανδρικό μονοπάτι αλλά μικρότερα μονοπάτια που προκύπτουν από τα βραχυκυκλώματα που σχηματίζονται μεταξύ των γωνιών.

Το ημιτονοειδές σχήμα στην σχεδίαση κεραίων έχει υιοθετηθεί μέχρι σήμερα σε λίγες περιπτώσεις. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ένα τυπωμένο μονόπολο ημιτονοειδούς σχήματος.



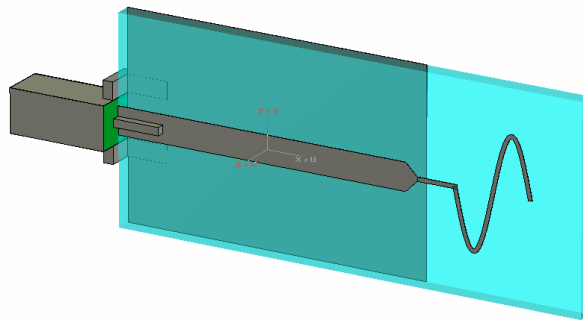
Σχήμα 4.1 Τυπωμένο μονόπολο ημιτονοειδούς σχήματος

Από τα στοιχεία που υπάρχουν η τυπωμένη ημιτονοειδής κεραία επιτυγχάνει αρκετή μείωση του μεγέθους της αλλά μικρότερο εύρος ζώνης και μικρότερο κέρδος σε σχέση με το αντίστοιχο τυπωμένο μονόπολο. Το μικρότερο εύρος ζώνης οφείλεται στην μείωση του ηλεκτρικού μεγέθους της κεραίας. Η μείωση του κέρδους οφείλεται σε δύο παράγοντες: (α) στην μείωση της κατευθυντικότητας και (β) στην οριζόντια ακτινοβολία. Αν θεωρήσουμε ένα τέταρτο της περιόδου της ημιτονοειδούς κεραίας παρατηρούμε ότι το πεδίο που ακτινοβολείται από το κομμάτι αυτό μπορεί να χωριστεί σε δύο συνιστώσες, μία οριζόντια και μία κάθετη. Έτσι μπορούμε να υποθέσουμε ισοδύναμα ότι οι δύο συνιστώσες αυτές ακτινοβολούνται από δύο αντίστοιχα τμήματα, ένα οριζόντιο και ένα κάθετο. Αυτό ισχύει για κάθε τέταρτο της περιόδου του ημιτονοειδούς μονοπόλου. Η οριζόντιες συνιστώσες των ακτινοβολουμένων πεδίων, παρόλο που στο μεγαλύτερο βαθμό ακυρώνονται στο μακρινό πεδίο λόγω της αντίθετης πολικότητας, ωστόσο προκαλούν ορθογώνια πόλωση (cross polarization) και ο λόγος μεταξύ της ολικής ισχύος εισόδου προς την ακτινοβολούμενη κάθετη συνιστώσα μειώνεται[3][4].

Δύο ακόμη τεχνικές σμίκρυνσης που χρησιμοποιούνται στην σχεδίαση των κεραίων είναι η διηλεκτρική φόρτιση και ο κατοπτρισμός μέσω του επιπέδου γείωσης. Κατά την διηλεκτρική φόρτιση η σμίκρυνση επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης του μήκους κύματος συντονισμού λόγω της κυματοδήγησης μέσα στο διηλεκτρικό.

4.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση και η μελέτη κεραιών τύπου ημιτονοειδούς τυπωμένου μονοπόλου. Συγκεκριμένα σχεδιάστηκαν έξι ημιτονοειδείς κεραιές με διαφορετικό αριθμό περιόδων του ημιτόνου ξεκινώντας από μισή περίοδο μέχρι τρεις περιόδους. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται μία ημιτονοειδής κεραία μίας περιόδου. Η κεραία είναι τυπωμένη πάνω σε διηλεκτρικό υπόστρωμα και τροφοδοτείται από ένα τμήμα μικροταινιακής γραμμής. Στο κάτω μέρος του διηλεκτρικού υποστρώματος είναι τυπωμένο το επίπεδο γείωσης του οποίου το πλάτος συμπίπτει με το πλάτος του υποστρώματος ενώ το μήκος συμπίπτει με το μήκος της μικροταινίας. Στην είσοδο της μικροταινίας έχει εφαρμοστεί ο τετραγωνικός ομοαξονικός συνδετήρας (SMA 2).



Σχήμα 4.2 Ημιτονοειδής κεραία μίας περιόδου

Η ημιτονοειδής κεραία χαρακτηρίζεται από τρεις παραμέτρους: το πλάτος A του ημιτόνου και την χωρική περίοδο P και τον αριθμό περιόδων $numperiods$. Το Σχήμα 4.3 περιλαμβάνει όλες τις κεραιές που σχεδιάστηκαν ξεκινώντας από μισή περίοδο μέχρι τρεις περιόδους. Συγκεκριμένα φαίνεται μόνο το τμήμα τις κεραιάς.

4.3 Ρύθμιση των παραμέτρων προσομοίωσης

4.3.1 Τροφοδότηση της διάταξης

Η τροφοδότηση της διάταξης έγινε με θύρα κυματοδήγησης η οποία εφαρμόστηκε στην επιφάνεια της εισόδου του τετραγωνικού ομοαξονικού συνδετήρα SMA.

4.3.2 Διακριτοποίηση

Στο κάθε μοντέλο εφαρμόστηκε τοπική διακριτοποίηση (local meshing) στην περιοχή του υποστρώματος της κεραίας με ελάχιστο βήμα $H/6$ κατά μήκος του πάχους του, στην περιοχή της επιφάνειας της κεραίας με βήμα $2 \cdot A/25$ και στην περιοχή του διηλεκτρικού του SMA με βήμα 1 κατά μήκος του και $H/6$ κατά τις δύο διαστάσεις του πλάτους.

Έπειτα από την εφαρμογή του εργαλείου “adaptive meshing” του transient solver επιλέχθηκε ολική διακριτοποίηση (global meshing) 20/20/50. Ο συνολικός αριθμός κελιών για την κάθε κεραία παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΘΕ ΚΕΡΑΙΑΣ

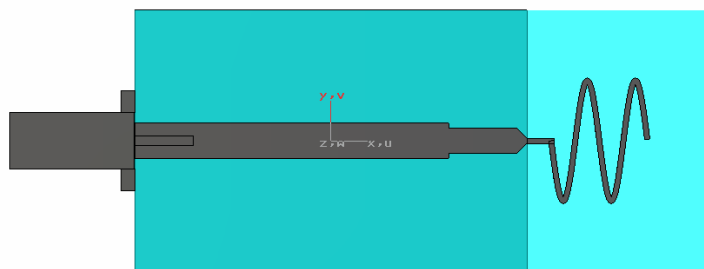
Αριθμός περιόδων	Αριθμός κελιών
0,5	358.400
1	378.000
1,5	391.160
2	411.400
2,5	428.028
3	456.002

4.3.3 Λοιπές ρυθμίσεις

Οι προσομοιώσεις έγιναν για το διάστημα συχνοτήτων 0 έως 4 GHz και ορίστηκαν οριακές συνθήκες ABC.

4.4 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων

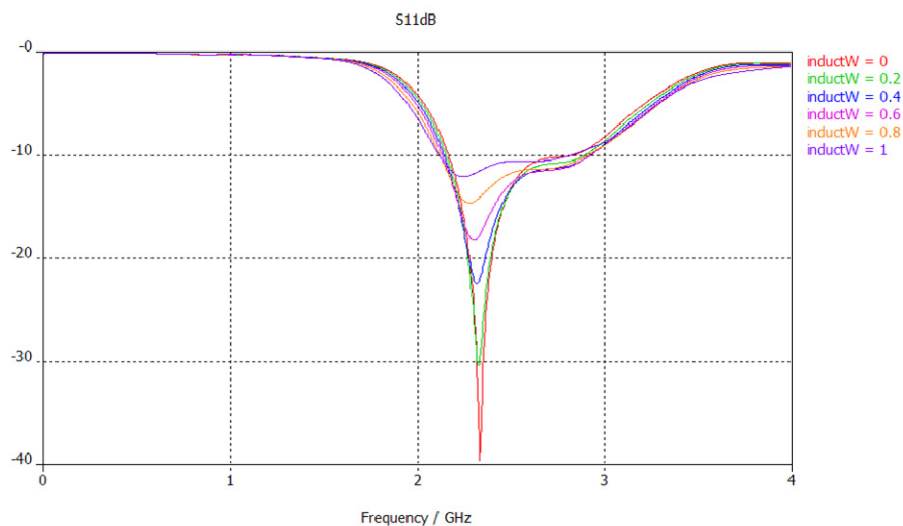
Επειδή ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία μελέτης και βελτιστοποίησης της κάθε κεραίας και οι έξι κεραίες απέδειξαν παρόμοια συμπεριφορά, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μίας από τις έξι κεραίες, συγκεκριμένα της κεραίας με δύο περιόδους.



Σχήμα 4.5 Ημιτονοειδής κεραία δύο περιόδων

Στόχος της συγκεκριμένης σχεδίασης ήταν ο συντονισμός στις κεραίες στην περιοχή των 2 με 3GHz (η κεντρική συχνότητα του εύρους ζώνης να βρίσκεται κοντά στα 2,5GHz) δίνοντας στην παράμετρο A την κατάλληλη τιμή η οποία καθορίζει το πραγματικό μήκος (unfolded) για κάθε κεραία. Στην συγκεκριμένη κεραία δόθηκε η τιμή $A=4.6\text{mm}$ και το πραγματικό μήκος της κεραίας μαζί με το στέλεχος μήκους $P/2$ είναι 39.8158mm. Έτσι καθορίστηκε η τιμή της παραμέτρου A για την κάθε κεραία. Στις αρχικές προσομοιώσεις της κεραίας παρατηρήθηκε ότι αντίσταση εισόδου της κεραίας είχε έντονο χωρητικό χαρακτήρα. Αυτό οφείλεται στην χωρητικότητα που αναπτύσσεται λόγω των σχεδόν οριζόντιων τμημάτων της ημιτονοειδούς κεραίας τα οποία βρίσκονται παράλληλα με το επίπεδο γείωσης. Ένας τρόπος να μειώσουμε την χωρητικότητα αυτή είναι να προσθέσουμε επαγωγικό μέρος στην αντίσταση εισόδου με στόχο τελικά το φανταστικό μέρος να πλησιάσει στο μηδέν και έτσι να επιτευχθεί προσαρμογή. Η πρόσθεση της επαγωγής έγινε με τη μείωση του πλάτους ενός κομματιού της μικροταινίας λίγο πριν την τροφοδότηση της κεραίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4 η μικροταινία λίγο πριν το σημείο τροφοδότησης της κεραίας έχει στενευθεί κατά πάχος $\text{induct}W$ και από τις δύο μεριές και το κομμάτι αυτό έχει μήκος $\text{induct}L$. Επίσης το πλάτος του τελευταίου κομματιού της μικροταινίας πριν την τροφοδότηση μειώνεται βαθμιαία έτσι ώστε να γίνει ομαλή και χωρίς ασυνέχειες η μετάβαση του ρεύματος από τη μικροταινία στην κεραία.

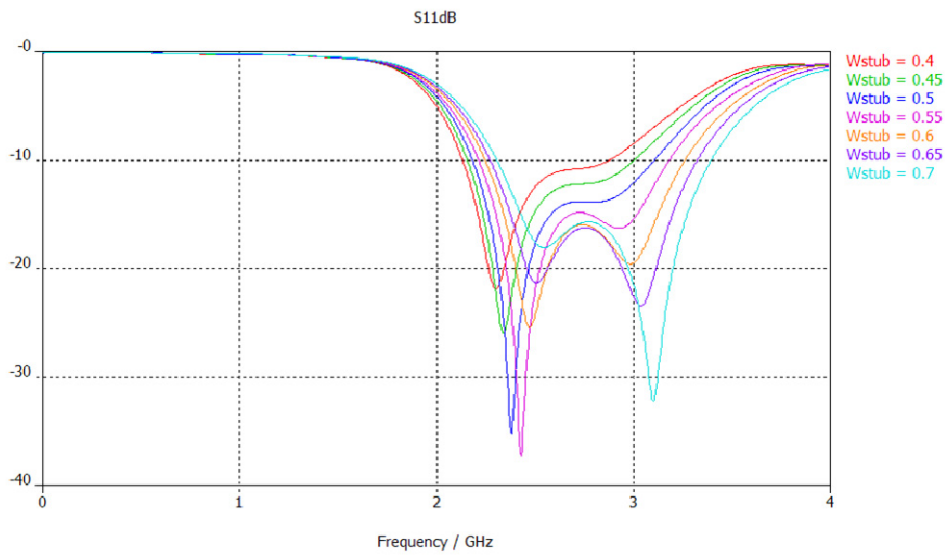
Αρχικά λοιπόν πραγματοποιήθηκε παραμετρική σάρωση ως προς την παράμετρο $\text{induct}W$ έτσι ώστε να βρεθεί για το κάθε μοντέλο η τιμή της παραμέτρου που θα επιτύχει καλύτερη προσαρμογή. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται το διάγραμμα των συντελεστών ανάκλασης για κάθε τιμή της $\text{induct}W$. Μπορούμε να παρατηρήσουμε στο διάγραμμα ότι καθώς αυξάνεται η παράμετρος $\text{induct}W$ βαθιάει ο συντονισμός κι αυτό εξηγείται αφού το φανταστικό μέρος πλησιάζει στο μηδέν και πετυχαίνουμε καλύτερη προσαρμογή.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης για διαφορετικά πλάτη της παραμέτρου *inductW* της κεραίας 2 περιόδων

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραμετρική σάρωση της παραμέτρου *Wstub* δηλαδή του πάχους της κεραίας και του στελέχους που την τροφοδοτεί. Με την αύξηση του πάχους της κεραίας παρατηρήσαμε αύξηση του εύρους ζώνης της και καλύτερη προσαρμογή. Σε κάποια μοντέλα η αύξηση του πάχους της κεραίας έπειτα από ένα σημείο ευνοούσε την εμφάνιση δεύτερου συντονισμού ο οποίος μάλιστα ξεπερνούσε τον πρώτο. Σ' αυτές τις περιπτώσεις επιλέχθηκε η κατάλληλη τιμή του πάχους της κεραίας με κριτήριο ο δεύτερος συντονισμός να μην ξεπερνάει τον πρώτο.

Η αύξηση του εύρους ζώνης λόγω της αύξησης του πάχους της κεραίας ερμηνεύεται από το γεγονός ότι το ρεύμα μπορεί να ακολουθήσει περισσότερα μονοπάτια πάνω στο πάχος της με αποτέλεσμα να ευνοούνται περισσότερες συχνότητες συντονισμού. Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται το διάγραμμα των συντελεστών ανάκλασης για κάθε τιμή του *Wstub*.



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα συντελεστήν ανάκλασης για διαφορετικά πλάτη της παραμέτρου Wstub της κεραίας 2 περιόδων

Ο Πίνακας 4.2 περιλαμβάνει τις τιμές των διαστάσεων που προέκυψαν για την κάθε κεραία.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΚΕΡΑΙΑΣ

numperiods	A (mm)	inductW (mm)	Wstub (mm)	P (mm)	Lstub (mm)
0,5	7,2	1	0,7	14,4	7,2
1	5,6	1	0,7	7,5	3,73
1,5	5	0,6	0,65	5	2,5
2	4,6	0,6	0,6	3,68	1,84
2,5	4,4	0,4	0,55	2,93	1,465
3	4,3	0,4	0,5	2,46	1,23

Ο Πίνακας 4.3 περιλαμβάνει τις τιμές των διαστάσεων που είναι κοινές για κάθε κεραία.

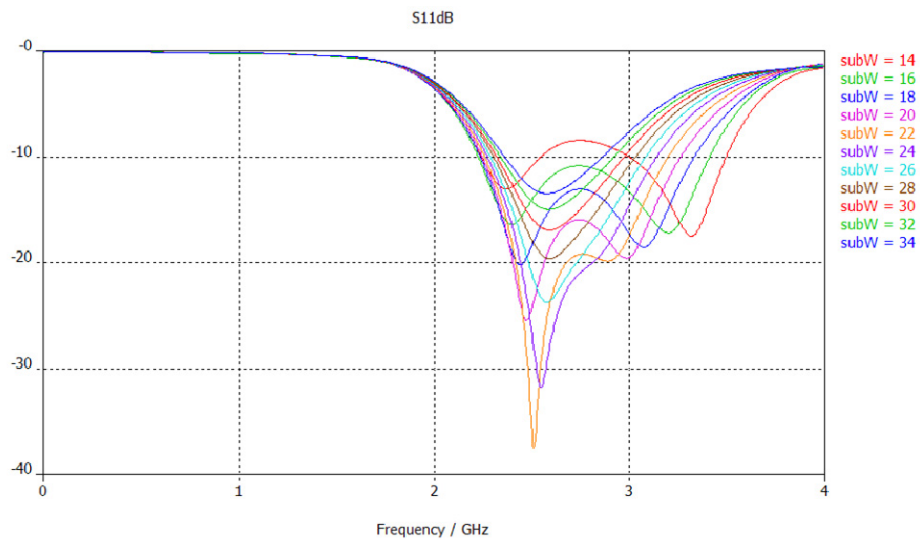
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 ΚΟΙΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Wstrip (mm)	inductL (mm)	subW (mm)	subH (mm)	t (mm)
2,7	6	20	30	0.0356

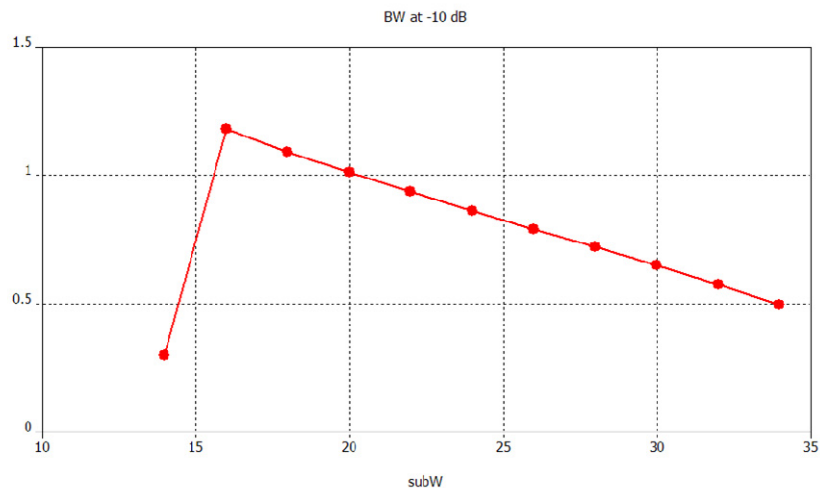
4.5 Μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης

Επόμενο στάδιο της σχεδίασης αποτέλεσε η επίδραση των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης στην συμπεριφορά της κεραίας. Αρχικά πραγματοποιήθηκε παραμετρική σάρωση του πλάτους του επιπέδου γείωσης κρατώντας σταθερό το μήκος του. Η ελάχιστη τιμή καθορίστηκε έτσι ώστε το διηλεκτρικό υπόστρωμα να εκτείνεται περίπου κατά 3mm πέρα από την κεραία κατά πλάτος ενώ η μέγιστη τιμή καθορίστηκε μέχρι το σημείο όπου υπάρχει αποδεκτό εύρος ζώνης.

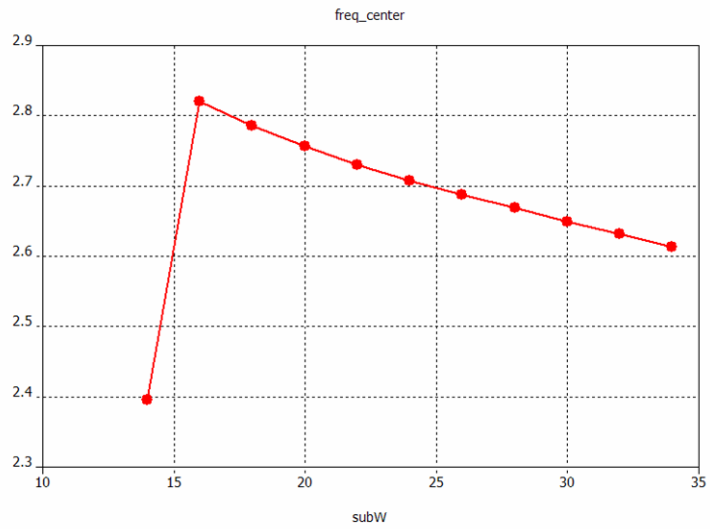
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συντελεστών ανάκλασης, του εύρους ζώνης, της κεντρικής συχνότητας, του ηλεκτρικού μεγέθους της κεραίας, της μέσης απόδοσης ακτινοβολίας, της μέσης συνολικής απόδοσης και του συντελεστή ακτινοβολίας συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης.



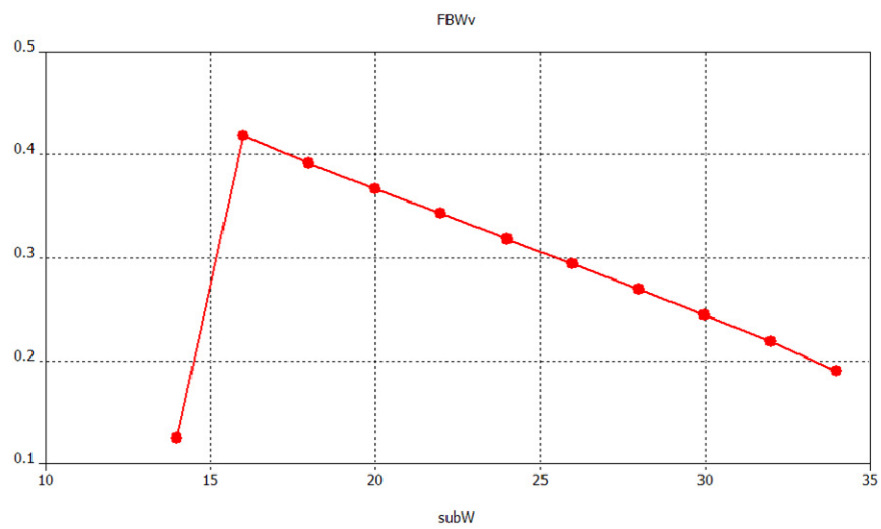
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων



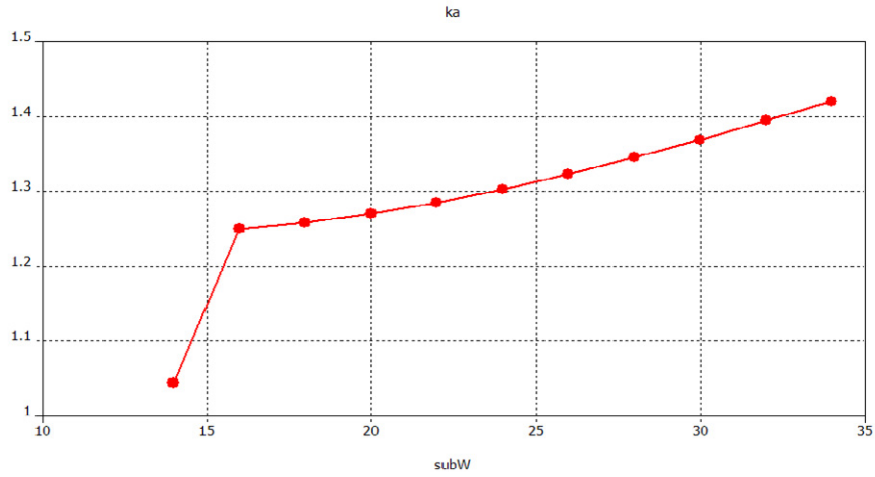
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα του εύρους ζώνης συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων



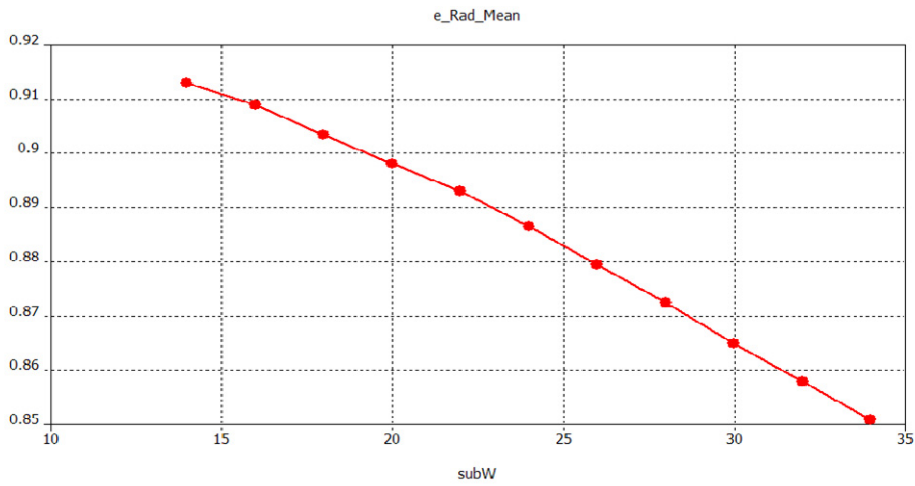
Σχήμα 4.10 Κεντρική συχνότητα συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων



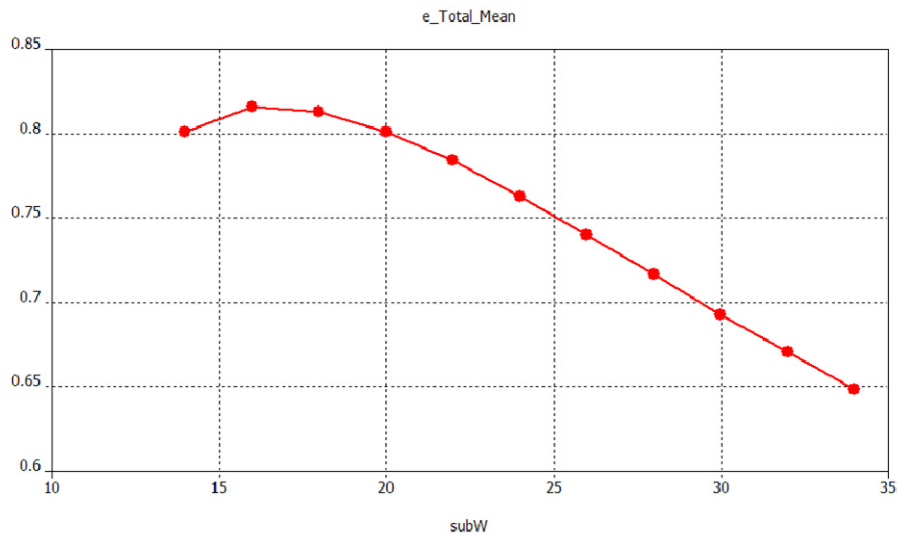
Σχήμα 4.11 Διάγραμμα του κλασματικού εύρους ζώνης συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων



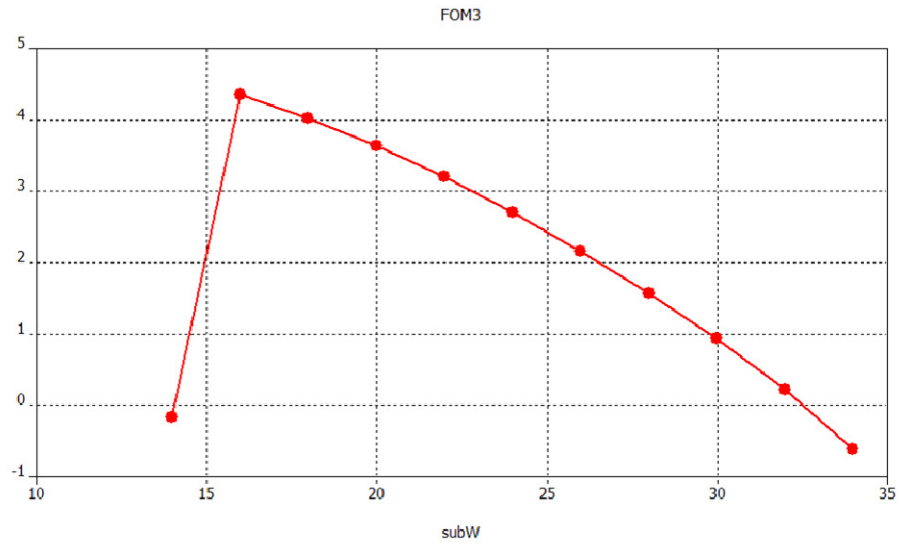
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα του ηλεκτρικού μεγέθους της κεραίας συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα της μέσης απόδοσης ακτινοβολίας συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων

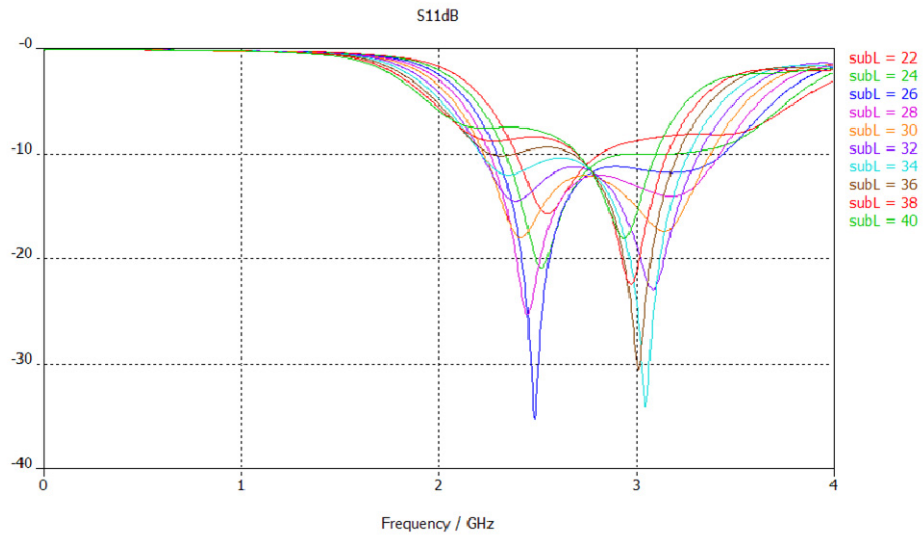


Σχήμα 4.14 Διάγραμμα της συνολικής απόδοσης ακτινοβολίας συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων

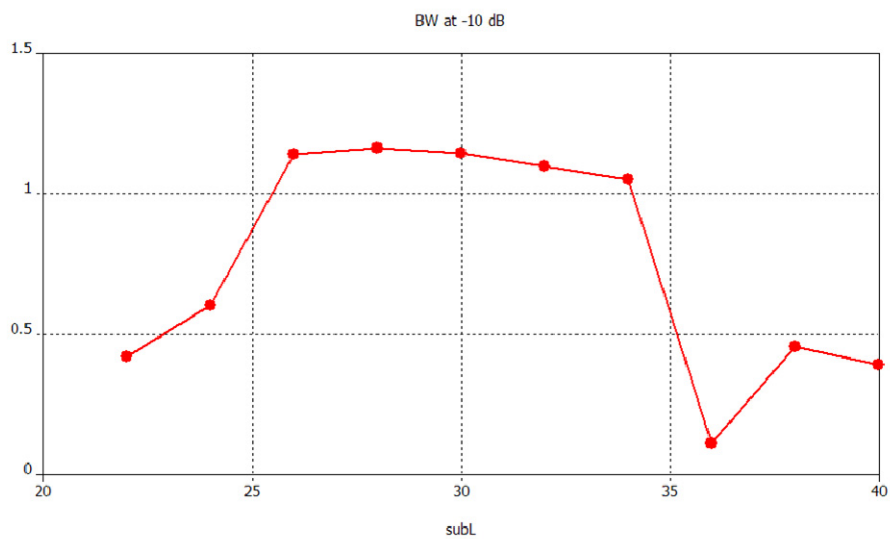


Σχήμα 4.15 Διάγραμμα του συντελεστή αξίας συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων

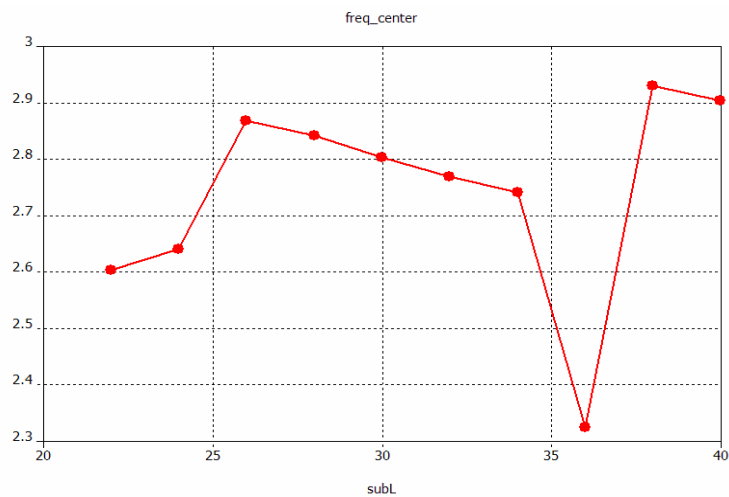
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραμετρική σάρωση του μήκους του επιπέδου γείωσης.



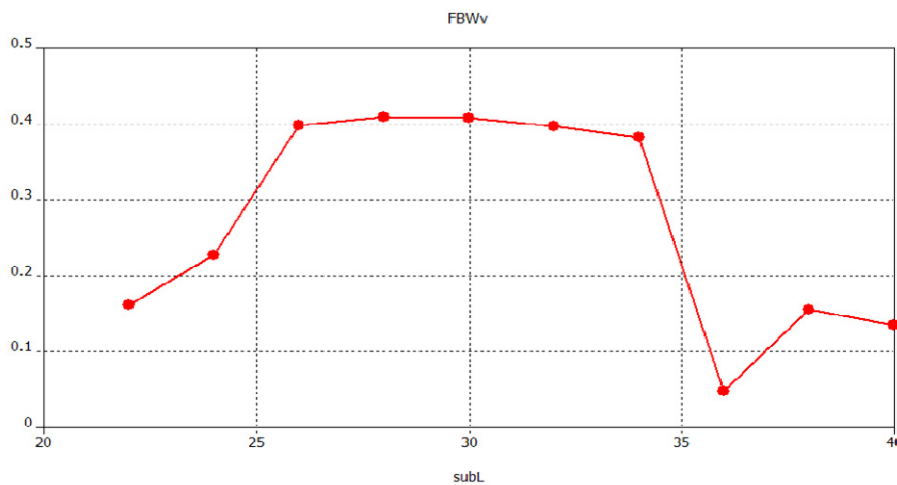
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης



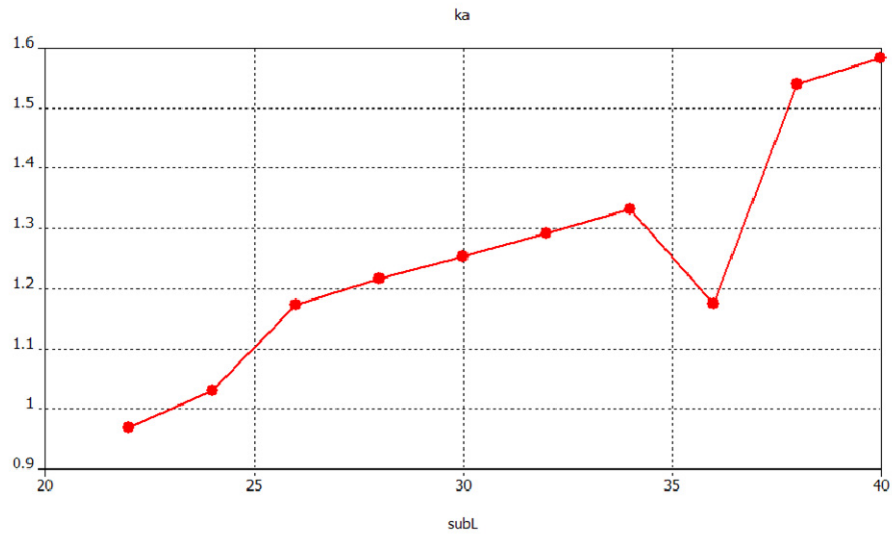
Σχήμα 4.17 Διάγραμμα του εύρους ζώνης συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης



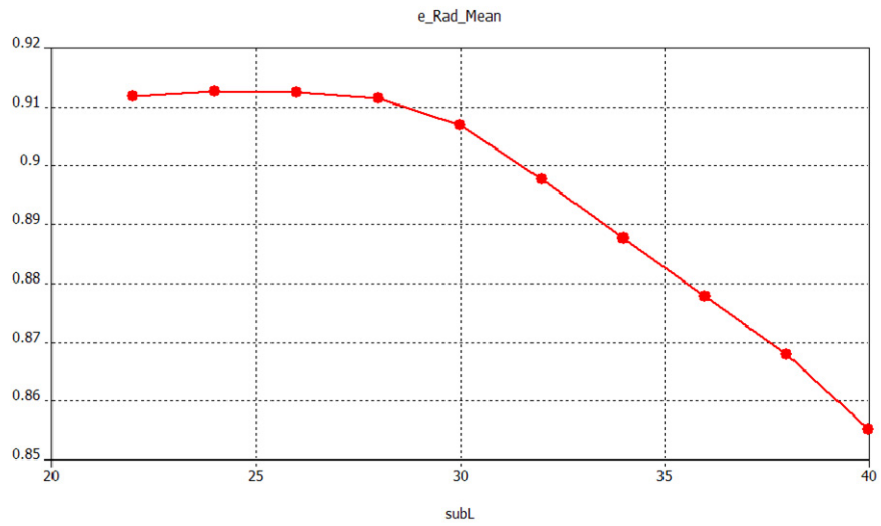
Σχήμα 4.18 Κεντρική συχνότητα συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης της κεραίας 2 περιόδων



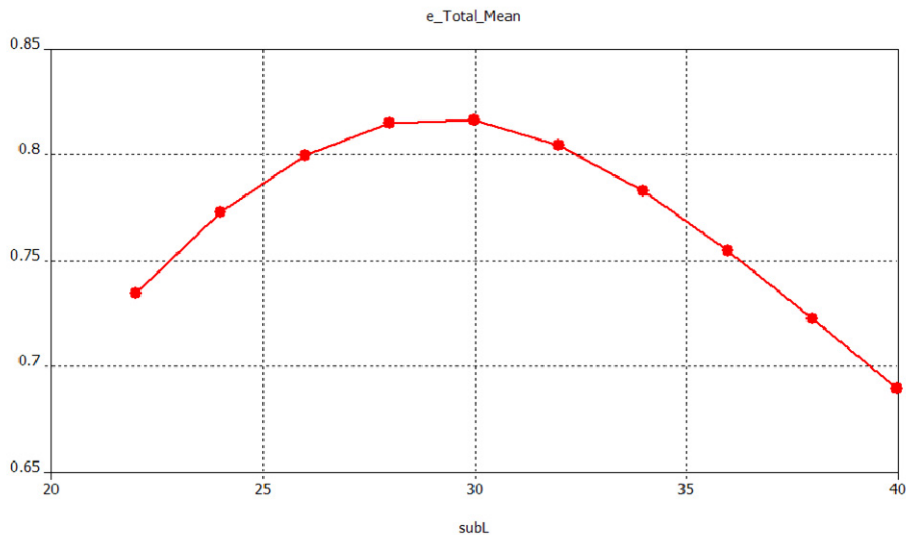
Σχήμα 4.19 Διάγραμμα κλασματικού εύρους ζώνης συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης



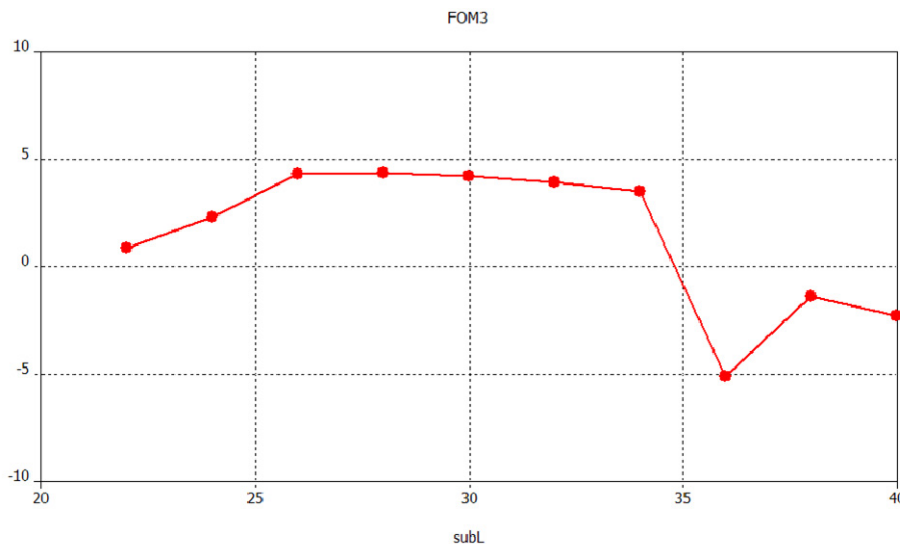
Σχήμα 4.20 Διάγραμμα ηλεκτρικού μεγέθους της κεραίας συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα της μέσης απόδοσης ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα μέσης συνολικής απόδοσης συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα συντελεστή αξίας συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης

Αρχικά μπορούμε να δούμε την μεγάλη επιρροή των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης σε όλα τα μεγέθη της κεραίας. Είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη κεραία παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά όταν το επίπεδο γείωσης έχει μικρό πλάτος και μεγάλο σχετικά μήκος. Επίσης μπορούμε να δούμε ότι η μεταβολή των διαστάσεων δεν επηρεάζει σημαντικά τη συχνότητα συντονισμού. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε για όλα τα μοντέλα. Η ημιτονοειδής κεραία λοιπόν οφελείται από στενά επίπεδα γείωσης. Έγινε λοιπόν μία επιλογή για κάθε μοντέλο των διαστάσεων γείωσης λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω διαγράμματα και κυρίως το διάγραμμα του συντελεστή αξίας.

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές των διαστάσεων της γείωσης που επιλέχθηκαν για το κάθε μοντέλο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΓΕΙΩΣΗΣ

numperiods	subW (mm)	subL (mm)
0.5	20	30
1	16	28
1.5	18	26
2	17	28
2.5	17	28
3	16	28

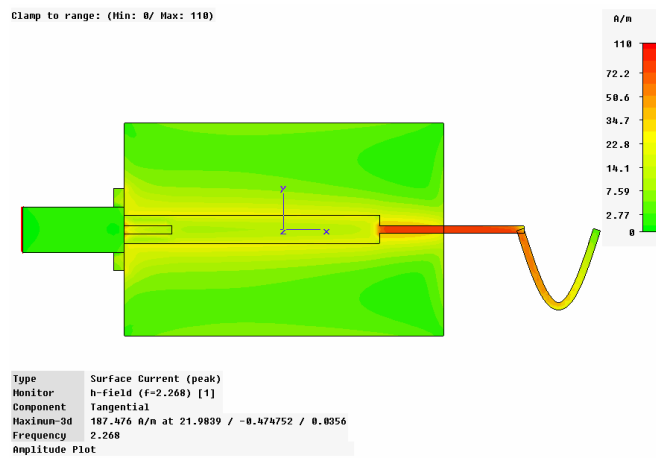
4.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι τιμές του εύρους ζώνης, της κεντρικής συχνότητας, του κλασματικού εύρους ζώνης, του ηλεκτρικού μεγέθους, της μέσης απόδοσης ακτινοβολίας, της μέσης συνολικής απόδοσης και του συντελεστή αξίας, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή των παραπάνω διαστάσεων του επιπέδου γείωσης για το κάθε μοντέλο.

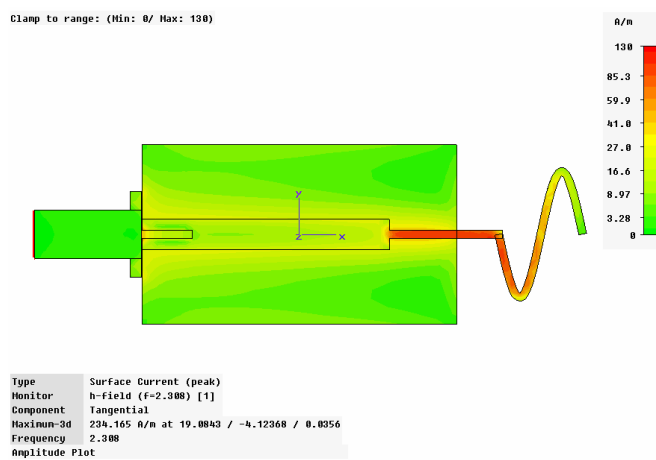
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

numperiods	BW (GHz)	f_{center} (GHz)	FBWv (%)	ka (radians)	\bar{e}_{rad}	\bar{e}_{total}	FOM (dB)
0.5	1.367	2.728	0.5013	1.391	0.9308	0.8844	5.034
1	1.429	2.837	0.5038	1.258	0.9322	0.8806	5.474
1.5	1.248	2.906	0.4293	1.225	0.9189	0.8257	4.615
2	1.164	2.844	0.4093	1.218	0.9115	0.8153	4.378
2.5	1.132	2.85	0.3971	1.21	0.9079	0.8088	4.241
3	1.173	2.823	0.4155	1.181	0.9102	0.821	4.607

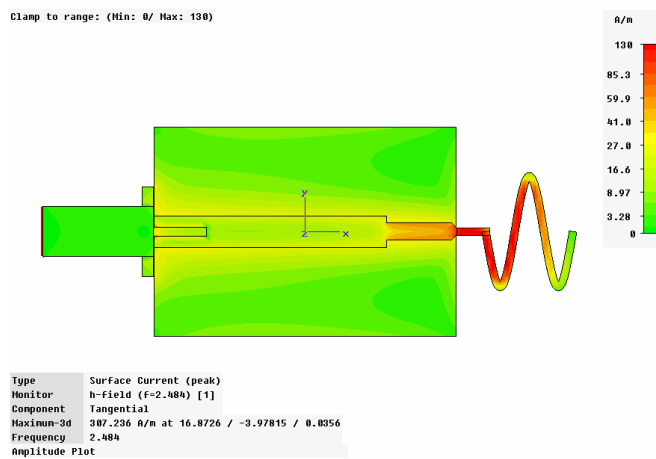
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα εφαπτομενικά επιφανειακά ρεύματα και τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κάθε κεραίας στην συχνότητα συντονισμού.



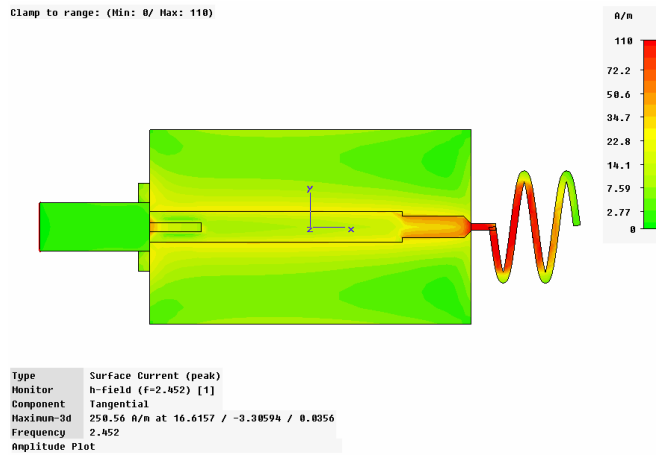
Σχήμα 4.24 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της ημιτονοειδούς κεραίας 0.5 περιόδου στην συχνότητα συντονισμού $f_{res}= 2.236\text{GHz}$



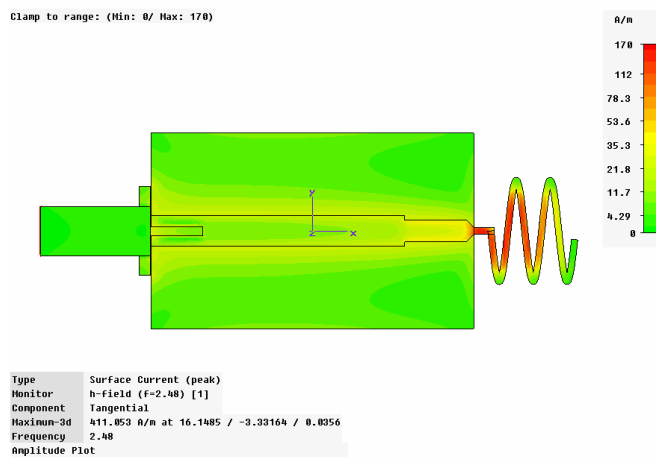
Σχήμα 4.25 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της ημιτονοειδούς κεραίας 1 περιόδου στην συχνότητα συντονισμού $f_{res}= 2.2308\text{GHz}$



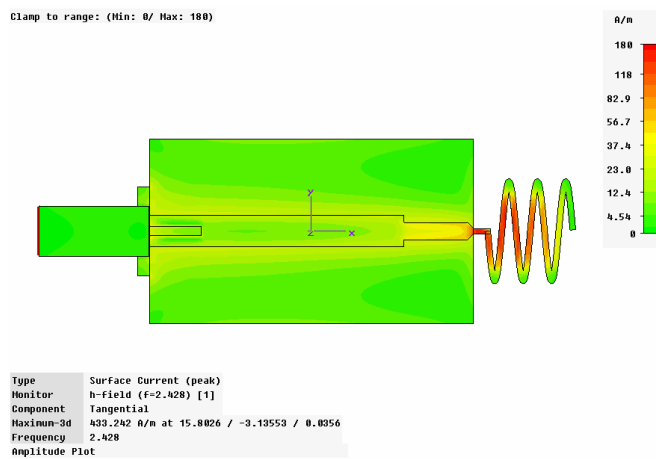
Σχήμα 4.26 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της ημιτονοειδούς κεραίας 1.5 περιόδου στην συχνότητα συντονισμού $f_{res}= 2.484\text{GHz}$



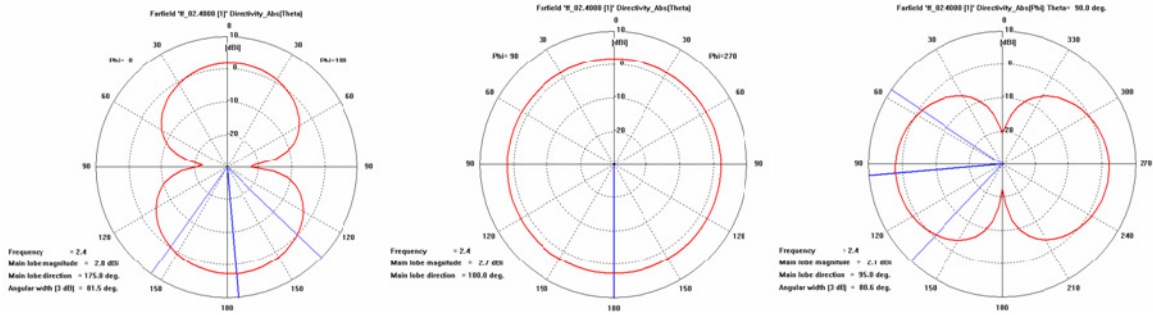
Σχήμα 4.27 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων στην συχνότητα συντονισμού $f_{res}=2.452\text{GHz}$



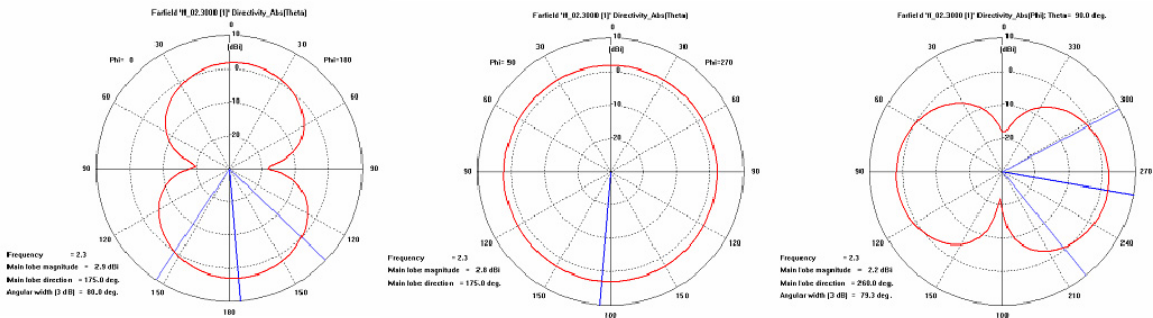
Σχήμα 4.28 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της ημιτονοειδούς κεραίας 2.5 περιόδων στην συχνότητα συντονισμού $f_{res}=2.48\text{GHz}$



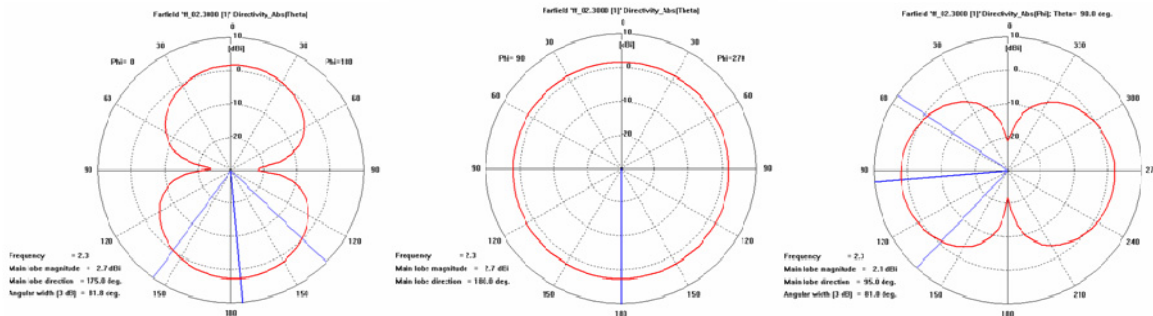
Σχήμα 4.29 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της ημιτονοειδούς κεραίας 3 περιόδων στην συχνότητα συντονισμού $f_{res}=2.428\text{GHz}$



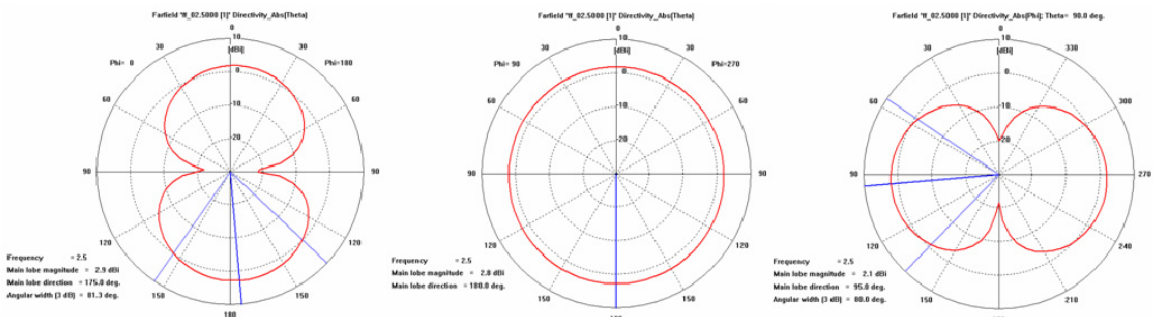
Σχήμα 4.30 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα επίπεδα XZ (θ για $\phi = 0^\circ$), ZY (θ για $\phi = 90^\circ$) και XY (ϕ για $\theta = 90^\circ$) της ημιτονοειδούς κεραίας 0.5 περιόδου στη συχνότητα συντονισμού 2.236GHz



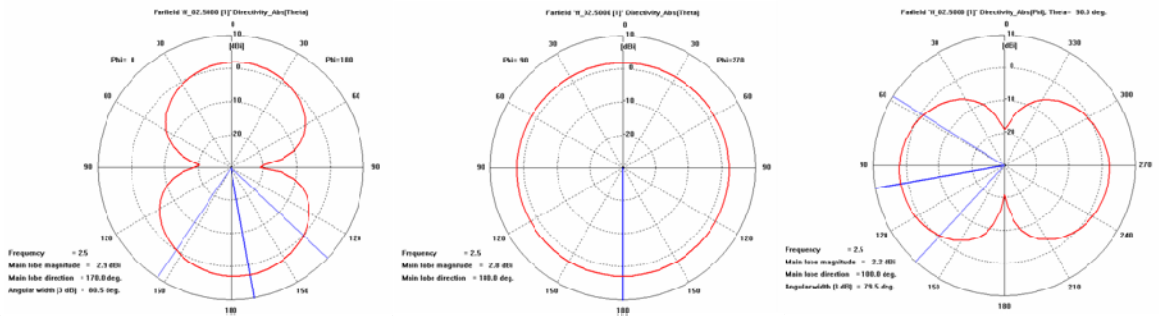
Σχήμα 4.31 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα επίπεδα XZ (θ για $\phi = 0^\circ$), ZY (θ για $\phi = 90^\circ$) και XY (ϕ για $\theta = 90^\circ$) της ημιτονοειδούς κεραίας 1 περιόδου στη συχνότητα συντονισμού 2.308GHz



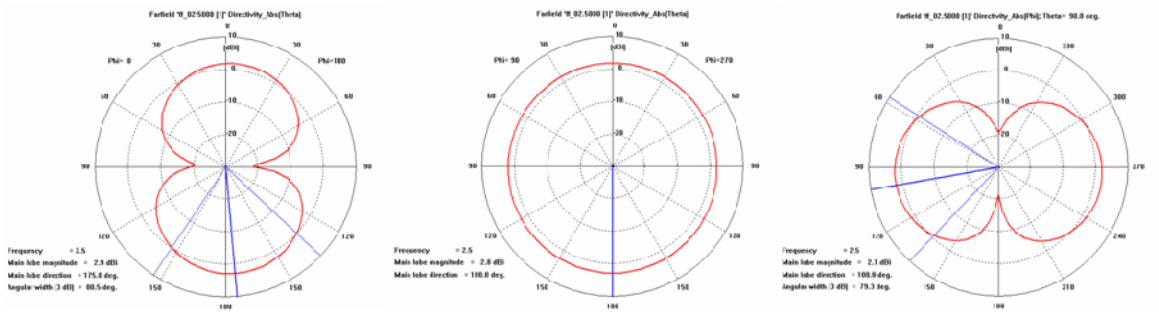
Σχήμα 4.32 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα επίπεδα XZ (θ για $\phi = 0^\circ$), ZY (θ για $\phi = 90^\circ$) και XY (ϕ για $\theta = 90^\circ$) της ημιτονοειδούς κεραίας 1.5 περιόδου στη συχνότητα συντονισμού 2.484GHz



Σχήμα 4.33 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα επίπεδα XZ (θ για $\phi = 0^\circ$), ZY (θ για $\phi = 90^\circ$) και XY (ϕ για $\theta = 90^\circ$) της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων στη συχνότητα συντονισμού 2.452GHz



Σχήμα 4.34 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα επίπεδα XZ (θ για $\phi = 0^\circ$), ZY (θ για $\phi = 90^\circ$) και XY (ϕ για $\theta = 90^\circ$) της ημιτονοειδούς κεραίας 2.5 περιόδων στη συχνότητα συντονισμού 2.48GHz



Σχήμα 4.35 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα επίπεδα XZ (θ για $\phi = 0^\circ$), ZY (θ για $\phi = 90^\circ$) και XY (ϕ για $\theta = 90^\circ$) της ημιτονοειδούς κεραίας 3 περιόδων στη συχνότητα συντονισμού 2.428GHz

Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα ακτινοβολίας έχουν την ίδια μορφή για όλες τις κεραίες και παρουσιάζουν ομοιοκατευθυντικότητα, χαρακτηριστικό των ηλεκτρικά μικρών κεραίων.

4.7 Βιβλιογραφία

- [1] A. Cardama, “Small Antennas”, Conference-UPC-ICONIC 2003.
- [2] T. J. Warnargiris, T. J. Minardo, “Performance of a Meandered Line as an Electrically Small Transmitting Antenna”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 46, No. 12, December 1998.
- [3] M. Ali, S. S. Stuchly, K. Caputa, “An Experimental Study of Small Self-Resonant Antennas for Wireless Applications”, Microwave and Optical Technology Letters, Vol.35, No 2, October 20 2002.
- [4] M. Ali, S. S. Stuchly, “Short Sinusoidal Antennas for Wireless Communications”, IEEE 1995.

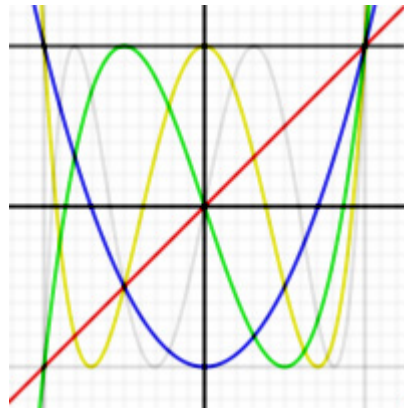
5. Τρισδιάστατες Κεραίες Γεωμετρίας Chebyshev

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση και η μελέτη τυπωμένων κεραιών μονοπόλων γεωμετρίας Chebyshev. Τα πολυώνυμα Chebyshev περιγράφονται από τη σχέση:

$$T_n(x) = \cos(n \arccos x) \quad \text{όπου } -1 \leq x \leq 1$$

όπου n είναι ο βαθμός του πολυωνύμου Chebyshev. Το Σχήμα 5.1 απεικονίζει τα πολυώνυμα Chebyshev των έξι πρώτων βαθμών:

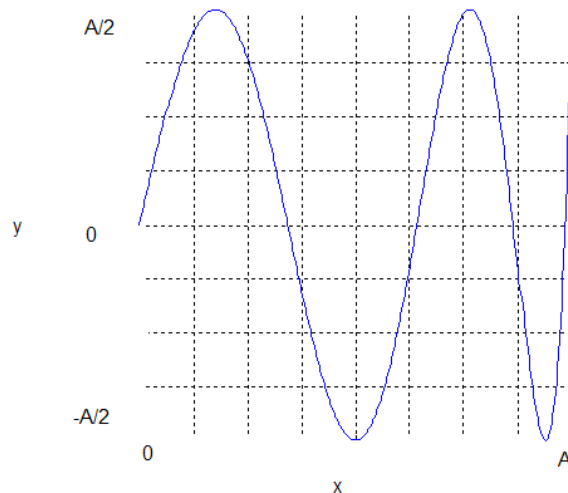


Σχήμα 5.1 Πολυώνυμα Chebyshev για $n=0..5$

Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της γεωμετρίας των κεραιών που σχεδιάστηκαν είναι ελαφρώς τροποποιημένη και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$y = \frac{1}{2} A \cos(n \arccos(x / A)) \quad \text{όπου } 0 \leq x \leq A$$

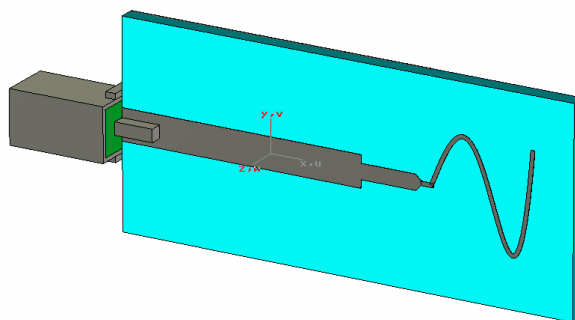
Το Σχήμα 5.2 απεικονίζει το διάγραμμα της παραπάνω συνάρτησης ενάτου βαθμού ($n=9$):



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα συνάρτησης Chebyshev 9 βαθμού

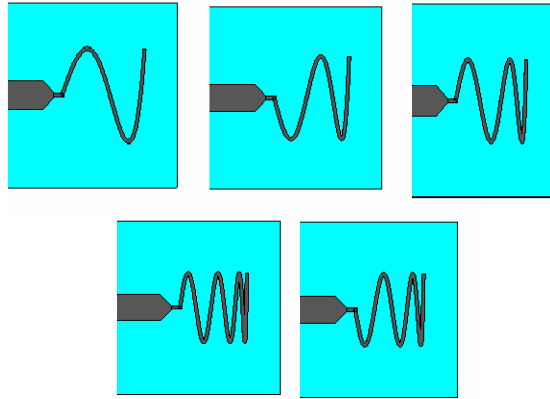
5.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση

Βάση της τροποποιημένης συνάρτησης Chebyshev σχεδιάστηκαν πέντε μοντέλα κεραιών τα οποία διαφέρουν ως προς το βαθμό n του πολυωνύμου. Οι βαθμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι $n=5,7,9,11,13$. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται μια κεραία Chebyshev πέμπτου βαθμού. Η κεραία είναι τυπωμένη πάνω σε διηλεκτρικό υποστρώμα και τροφοδοτείται από ένα τμήμα μικροταινιακής γραμμής. Στο κάτω μέρος του διηλεκτρικού υποστρώματος είναι τυπωμένο το επίπεδο γείωσης του οποίου το πλάτος συμπίπτει με το πλάτος του υποστρώματος ενώ το μήκος συμπίπτει με το μήκος της μικροταινιας. Στην είσοδο της μικροταινιας έχει εφαρμοστεί ο τετραγωνικός ομοαξονικός συνδετήρας.



Σχήμα 5.3 Κεραία Chebyshev πέμπτου βαθμού

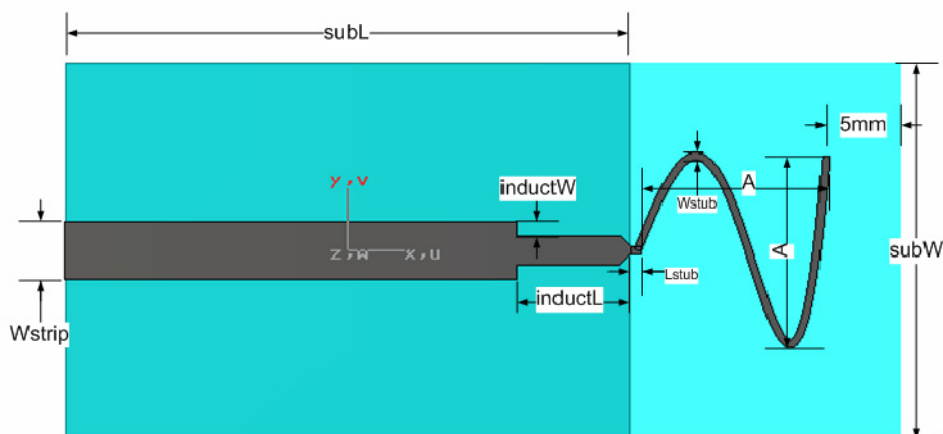
Η κεραία Chebyshev χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους το πλάτος A (peak to peak) και το βαθμό της συνάρτησης n . Το Σχήμα 5.4 περιλαμβάνει όλες τις κεραιές που σχεδιάστηκαν βαθμών $n=5,7,9,11,13$.



Σχήμα 5.4 Κεραίες Chebyshev

Το διηλεκτρικό του υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε είναι το tfr-45 με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=4.38$, με εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta=0,00284$ και πάχος $H=1.63\text{mm}$.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η κεραία Chebyshev με τις παραμέτρους των διαστάσεών της.



Σχήμα 5.5 Κεραία Chebyshev με τις παραμέτρους των διαστάσεων

Η κεραία είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να είναι εγγεγραμμένη σε ένα τετράγωνο $A \times A$.

Στόχος της συγκεκριμένης σχεδίασης είναι ο συντονισμός της κεραίας στο διάστημα μεταξύ 2-3 GHz.

5.3 Ρύθμιση των παραμέτρων της σχεδίασης

5.3.1 Τροφοδότηση της διάταξης

Η τροφοδότηση της διάταξης έγινε με θύρα κυματοδότησης η οποία εφαρμόστηκε στην επιφάνεια της εισόδου του τετραγωνικού ομοαξονικού συνδετήρα SMA. Στον συγκεκριμένο τύπο κεραίας χρησιμοποιήθηκε νέος τετραγωνικός συνδετήρας SMA. Ο Πίνακας 5.1 περιέχει τις διαστάσεις του νέου τετραγωνικού ομοαξονικού συνδετήρα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΤΗΡΑ

(mm)	pinW (mm)	dielW (mm)	t (mm)	coaxL (mm)	pinL (mm)	stubW (mm)	stubL (mm)	stubL1 (mm)	stubH1 (mm)
SMA	1.25	4.46	0.4	9.5	3.8	0.57	3.8	1	0.5

Το διηλεκτρικό υλικό του συνδετήρα είναι το Teflon με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=2$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta=0.003$.

5.3.2 Διακριτοποίηση

Στο κάθε μοντέλο εφαρμόστηκε τοπική διακριτοποίηση (local meshing) στην περιοχή του υποστρώματος της κεραίας με ελάχιστο βήμα $H/6$ κατά μήκος του πάχους του, στην περιοχή της επιφάνειας της κεραίας με βήμα $A/25$ και στην περιοχή του διηλεκτρικού του SMA με βήμα 1 κατά μήκος του και $H/6$ κατά τις δύο διαστάσεις του πλάτους.

Έπειτα από την εφαρμογή του εργαλείου “adaptive meshing” του transient solver επιλέχθηκε ολική διακριτοποίηση (global meshing) 20/20/50. Ο συνολικός αριθμός κελιών για την κάθε κεραία παρουσιάζεται.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΘΕ ΚΕΡΑΙΑΣ

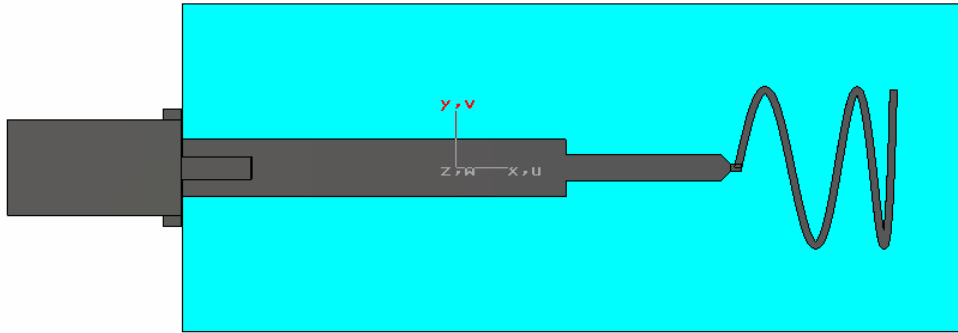
n	Αριθμός κελιών
5	408.240
7	359.136
9	404.055
11	409.590
13	423.765

5.3.3 Λοιπές ρυθμίσεις

Οι προσομοιώσεις έγιναν για το διάστημα συχνοτήτων 0 έως 6 GHz και ορίστηκαν οριακές συνθήκες ABC.

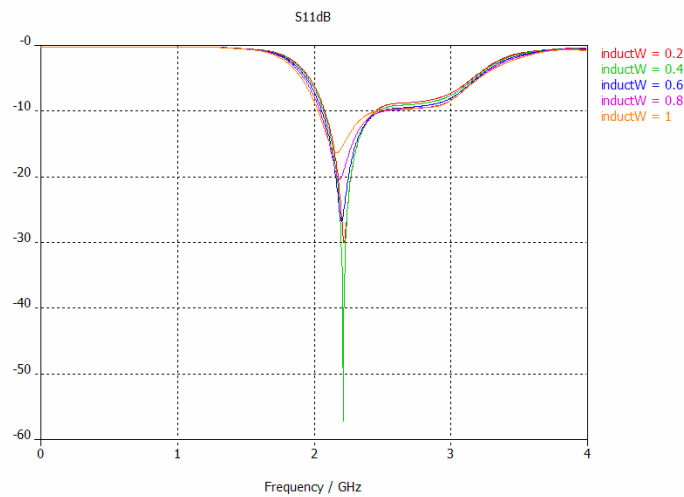
5.4 Διαδικασία και αποτελέσματα προσομοιώσεων

Όπως και στις ημιτονοειδείς κεραίες ακολουθείται η ίδια διαδικασία παρουσίασης της διαδικασίας σχεδίασης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται λοιπόν τα αποτελέσματα της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



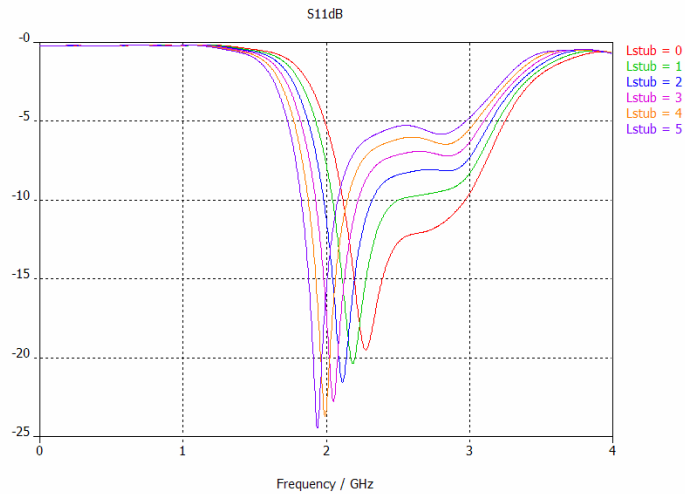
Σχήμα 5.6 Κεραία Chebyshev ενάτου βαθμού

Στόχος της σχεδίασης ήταν ο συντονισμός της κεραίας στην περιοχή των 2 έως 3 GHz δίνοντας στην παράμετρο A την τιμή των 8,5mm. Αρχικά έγινε παραμετρική σάρωση της παραμέτρου inductW και επιλέχθηκε η βέλτιστη τιμή.



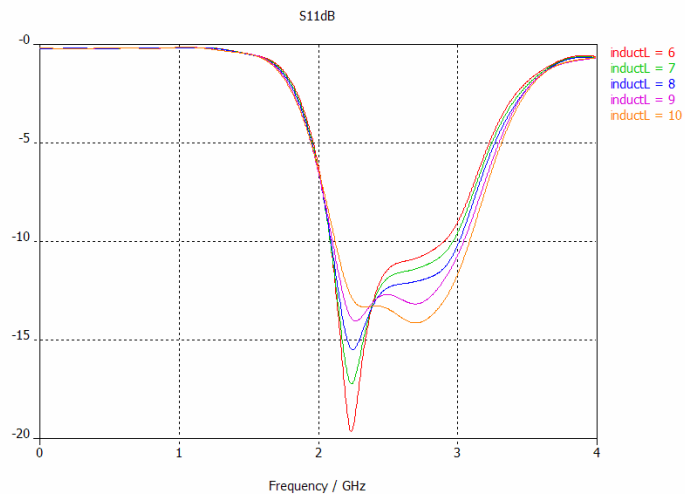
Σχήμα 5.7 Διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης για διαφορετικά πλάτη της παραμέτρου inductW

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση του μήκους του στελέχους τροφοδότησης της κεραίας. Παρατηρήθηκε ότι η κεραία έδινε καλύτερα αποτελέσματα (αύξηση του εύρους ζώνης) καθώς το μήκος μειωνόταν και γι' αυτόν το λόγο επιλέχθηκε μία ελάχιστη δυνατή τιμή του μήκους.



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης για διαφορετικά πλάτη της παραμέτρου Lstub

Τέλος καθώς παρατηρήσαμε ότι η αντίσταση εισόδου συνέχιζε να έχει χωρητικό χαρακτήρα αυξήθηκε το μήκος της παραμέτρου inductL έτσι ώστε να μειώσουμε το χωρητικό μέρος της αντίστασης εισόδου.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης για διαφορετικά πλάτη της παραμέτρου inductL

Ο Πίνακας 5.3 περιέχει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των διαστάσεων της κάθε κεραίας που προέκυψαν κατά τη σχεδίαση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΚΕΡΑΙΑΣ

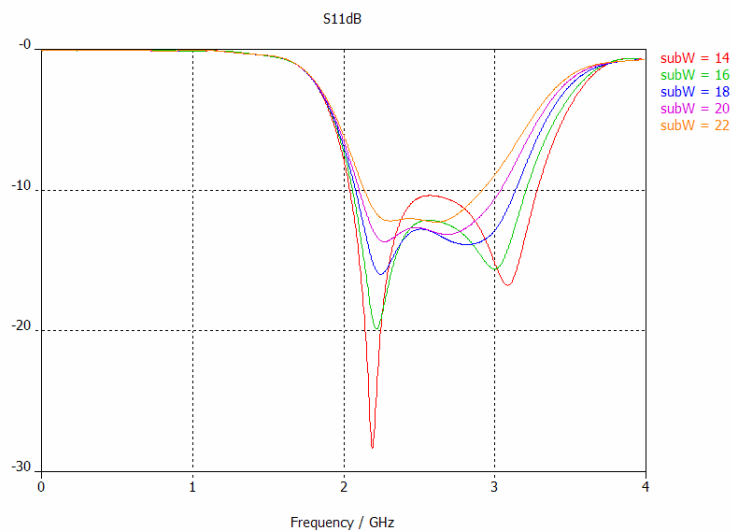
n	A (mm)	inductW (mm)	inductL (mm)	Lstub (mm)
5	10	0.8	9	0.4
7	9.1	0.8	9	0.4
9	8.5	0.8	9	0.4
11	8.2	0.8	9	0.4
13	8	0.8	9	0.4

Ο Πίνακας 5.4 περιλαμβάνει τις τιμές των διαστάσεων που είναι κοινές για κάθε κεραία.

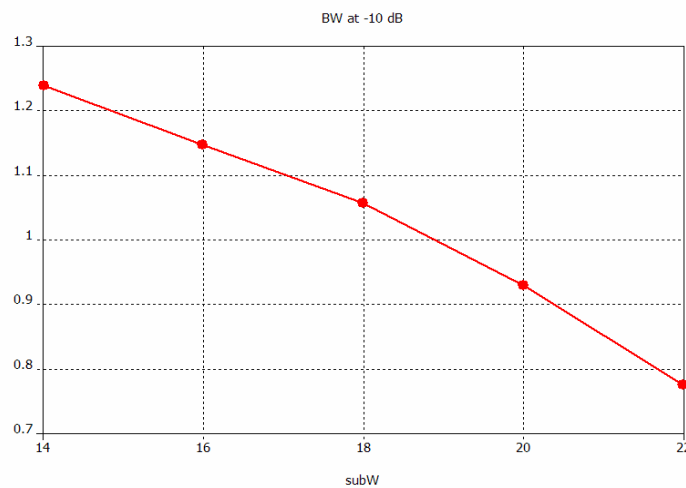
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 ΚΟΙΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Wstrip (mm)	Wstub (mm)	t (mm)
3.1	0.4	0.0356

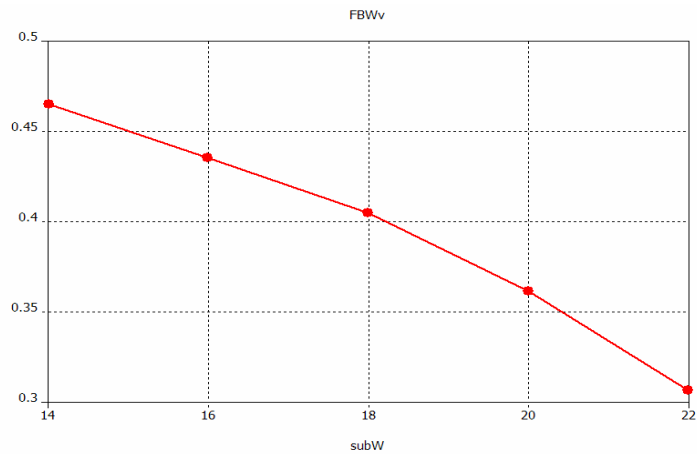
5.5 Μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης



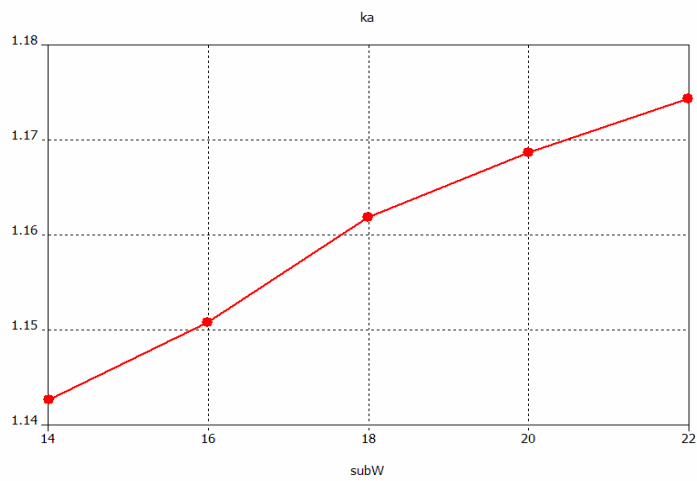
Σχήμα 5.10 Διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



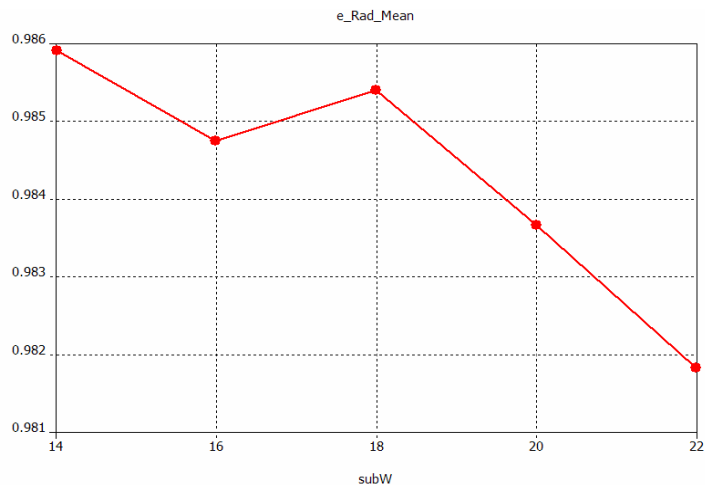
Σχήμα 5.11 Διάγραμμα του εύρους ζώνης συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



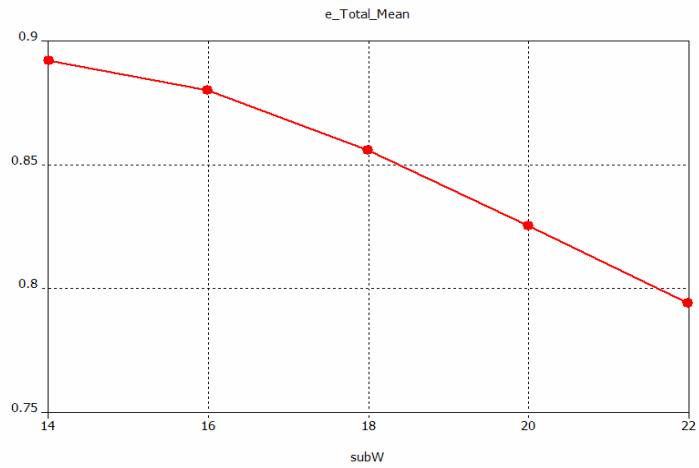
Σχήμα 5.12 Διάγραμμα του κλασματικού εύρους ζώνης συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



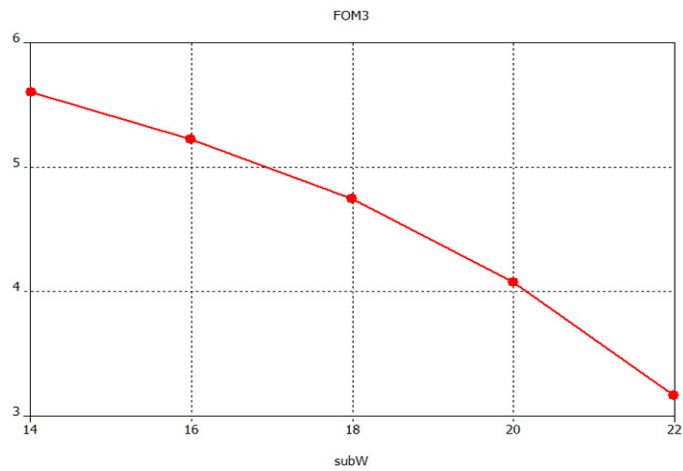
Σχήμα 5.13 Διάγραμμα του ηλεκτρικού μεγέθους συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



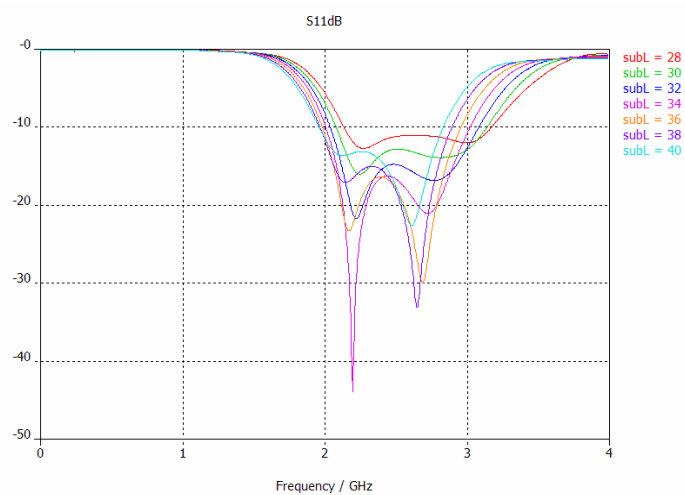
Σχήμα 5.14 Διάγραμμα της μέσης απόδοσης ακτινοβολίας συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



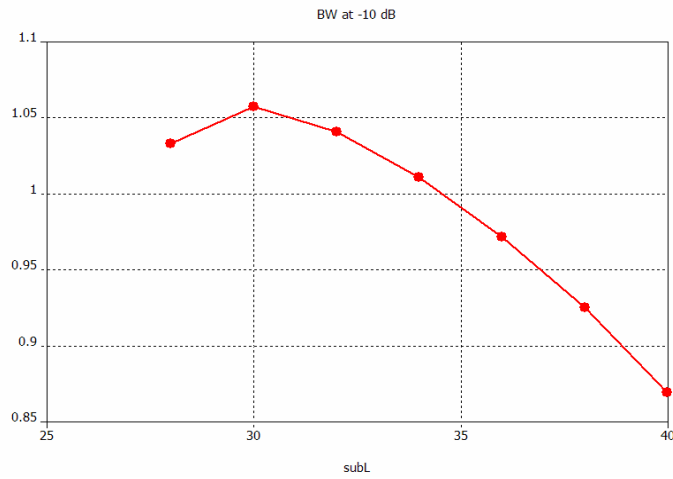
Σχήμα 5.15 Διάγραμμα της συνολικής απόδοσης ακτινοβολίας συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάντου βαθμού



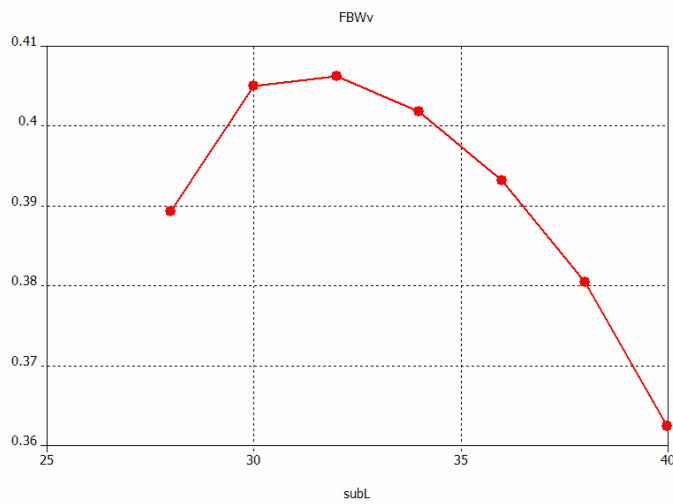
Σχήμα 5.16 Διάγραμμα του συντελεστή αξίας συναρτήσει του πλάτους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάντου βαθμού



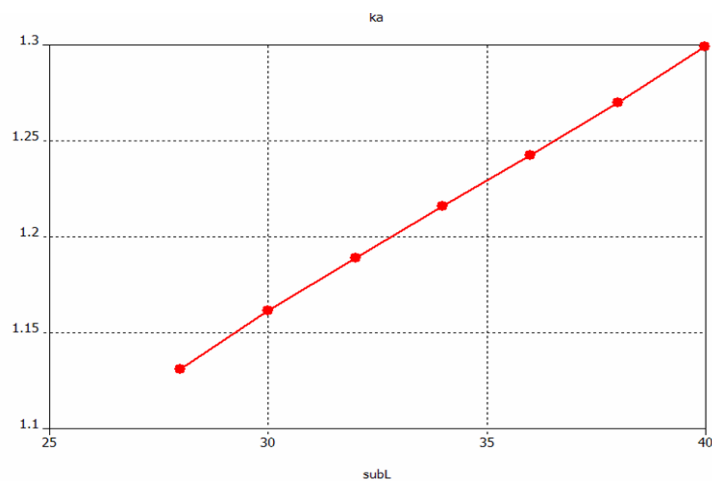
Σχήμα 5.17 Διάγραμμα συντελεστών ανάκλασης συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάντου βαθμού



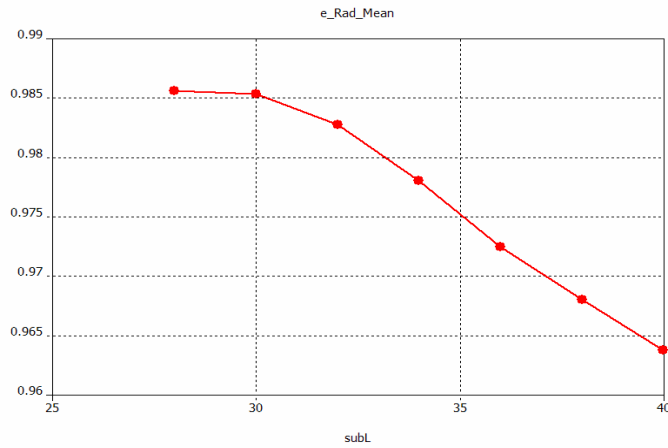
Σχήμα 5.18 Διάγραμμα εύρους ζώνης συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



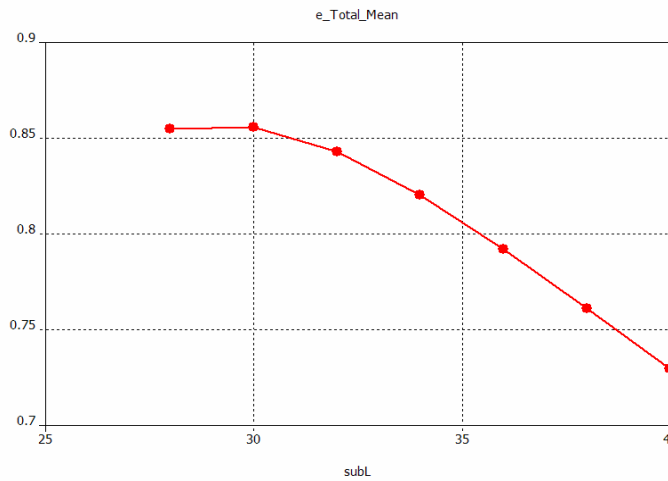
Σχήμα 5.19 Διάγραμμα κλασματικού εύρους ζώνης συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



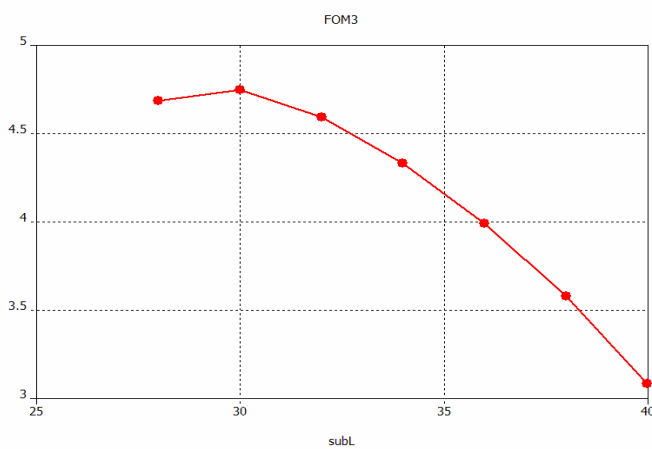
Σχήμα 5.20 Διάγραμμα του ηλεκτρικού μεγέθους συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



Σχήμα 5.21 Διάγραμμα μέσης απόδοσης ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



Σχήμα 5.22 Διάγραμμα της μέσης συνολικής απόδοσης συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού



Σχήμα 5.23 Διάγραμμα συντελεστή αξίας συναρτήσει του μήκους του επιπέδου γείωσης της κεραίας Chebyshev ενάτου βαθμού

Όπως και η ημιτονοειδής, η κεραία Chebyshev παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά όταν το επίπεδο γείωσης έχει μικρό πλάτος και μεγάλο σχετικά μήκος.

5.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι τιμές των διαστάσεων της γείωσης που επιλέχθηκαν για το κάθε μοντέλο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΓΕΙΩΣΗΣ

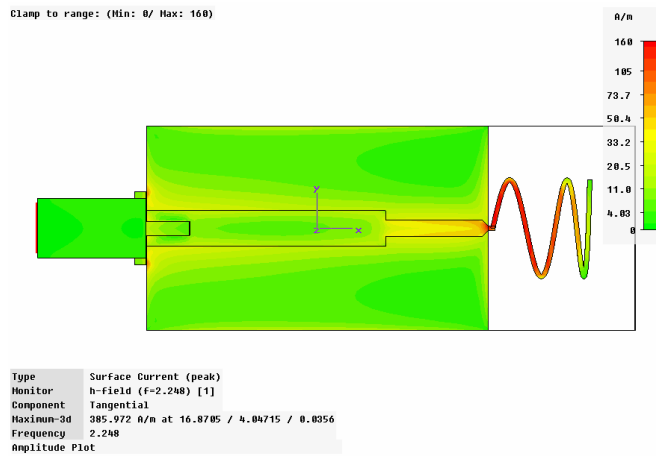
n	subW (mm)	subL (mm)
5	18	30
7	20	30
9	18	30
11	18	30
13	16	30

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι τιμές του εύρους ζώνης, της κεντρικής συχνότητας, του κλασματικού εύρους ζώνης, του ηλεκτρικού μεγέθους, της μέσης απόδοσης ακτινοβολίας, της μέσης συνολικής απόδοσης και του συντελεστή αξίας, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή των παραπάνω διαστάσεων του επιπέδου γείωσης για το κάθε μοντέλο.

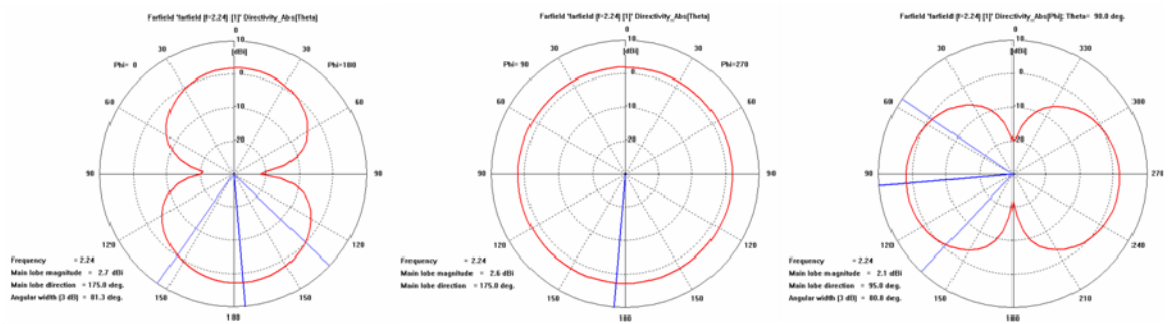
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6 ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΩΝ ΠΕΝΤΕ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

n	BW (GHz)	f_{center} (GHz)	FBWv (%)	ka (radians)	e_{rad}	e_{total}	FOM (dB)
5	1.195	2.659	0.4494	1.222	0.9896	0.9146	5.269
7	0.9941	2.573	0.3864	1.183	0.9872	0.8521	4.444
9	1.057	2.611	0.405	1.162	0.9878	0.8691	4.814
11	1.019	2.604	0.3912	1.151	0.9835	0.8595	4.654
15	1.112	2.634	0.4222	1.137	0.9848	0.8824	5.153

Καθώς όλες οι κεραίες παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή επιφανειακού ρεύματος και διαγραμμάτων ακτινοβολίας παρουσιάζονται αυτά της κεραίας ενότου βαθμού.



Σχήμα 5.24 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της κεραίας Chebyshev 9^{ου} βαθμού στην συχνότητα συντονισμού $f_{res} = 2.26\text{GHz}$



Σχήμα 5.25 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα επίπεδα XZ (θ για $\varphi = 0^\circ$), ZY (θ για $\varphi = 90^\circ$) και XY (φ για $\theta = 90^\circ$) της κεραίας Chebyshev 9^{ου} βαθμού στη συχνότητα συντονισμού 2.26GHz

5.7 Βιβλιογραφία

- [1] (2007) The Wikipedia website. [Online]. Available:
http://en.wikipedia.org/wiki/Chebyshev_polynomials

6. Τρισδιάστατη Κεραία Γεωμετρίας Chirp

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση της κεραίας γεωμετρίας ημιτονοειδούς Chirp. Η καμπύλη Chirp είναι μια κυματομορφή στην οποία η συχνότητα της αυξάνεται ('up-chirp') ή μειώνεται ('down-chirp') με το χρόνο. Υπάρχουν τρία είδη chirp, η γραμμική όπου η συχνότητα της κυματομορφής αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο, η γεωμετρική όπου η συχνότητα μεταβάλλεται στο χρόνο βάση μιας γεωμετρικής σχέσης και η εκθετική όπου η συχνότητα αυξάνεται εκθετικά με το χρόνο. Εμείς χρησιμοποιήσαμε την γραμμική Chirp καμπύλη.

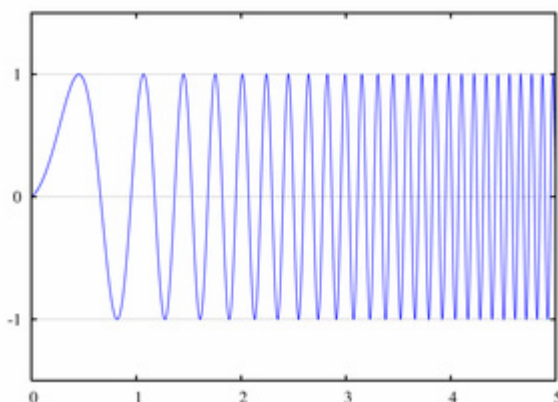
Στη γραμμική καμπύλη Chirp η συχνότητα $f(t)$ μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο σύμφωνα με τη σχέση

$f(t) = f_0 + kt$ όπου f_0 είναι η αρχική συχνότητα (την χρονική στιγμή $t=0$) και k είναι ο ρυθμός αύξησης της συχνότητας.

Η αντίστοιχη ημιτονοειδής καμπύλη Chirp δίνεται από τη σχέση:

$$x(t) = \sin\left(2\pi \int_0^t f(t') dt'\right) = \sin\left(2\pi\left(f_0 + \frac{k}{2}t\right)t\right)$$

και η κυματομορφή της φαίνεται στο Σχήμα 6.1



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα γραμμικής ημιτονοειδούς συνάρτησης Chirp

Κατά τη σχεδίαση της κεραίας χρησιμοποιήθηκε η ελαφρώς τροποποιημένη συνάρτηση

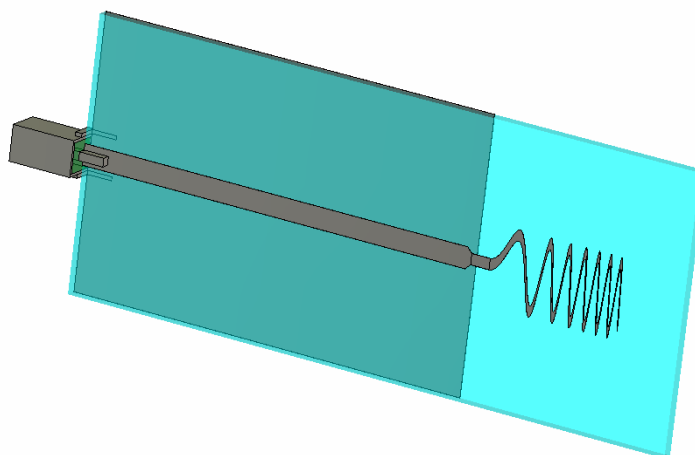
$$y = A \sin\left(2\pi x\left(f_0 + mu \frac{x}{2}\right)\right) \quad \text{για } 0 < x < x_{\max},$$

όπου A είναι το πλάτος της κυματομορφής, μ είναι ο ρυθμός αύξησης της συχνότητας και f_0 είναι η αρχική συχνότητα.

Το σκεπτικό της σχεδίασης της συγκεκριμένης κεραίας ήταν να εξετάσουμε αν αυτή θα επιδείξει πολυζωνική (multiband) συμπεριφορά. Συγκεκριμένα παρατηρήσαμε ότι κυματομορφή Chirp παρουσιάζει μια επαναλαμβανόμενη δομή (ημίτονο) η οποία παρουσιάζεται διαδοχικά σε μικρότερη κλίμακα (self-similarity). Συσχετίσαμε λοιπόν αυτήν τη δομή με τη δομή fractal. Καθώς λοιπόν οι fractal κεραίες παρουσιάζουν πολυζωνική συμπεριφορά αναμέναμε ότι παρόμοια συμπεριφορά θα επιδείξει και η Chirp κεραία, γεγονός που επαληθεύτηκε.

6.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση

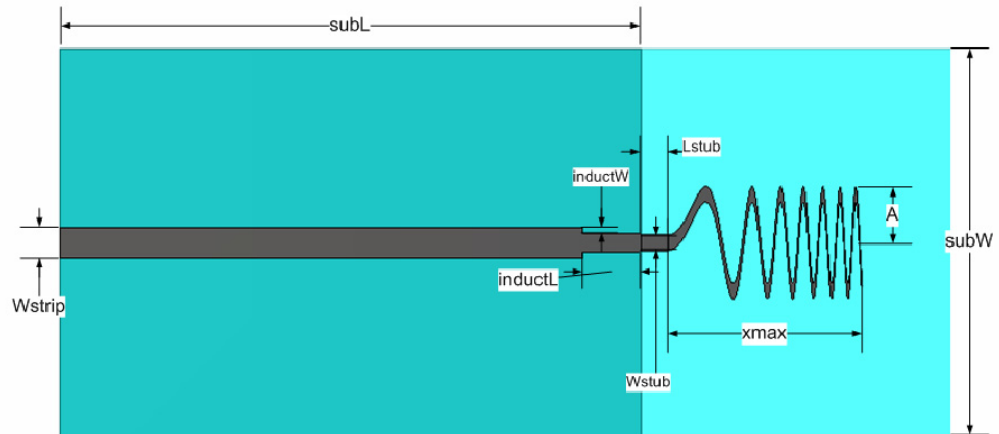
Βάσει της ημιτονοειδούς συνάρτησης Chirp σχεδιάστηκε μία κεραία. Η κεραία είναι τυπωμένη πάνω σε διηλεκτρικό υπόστρωμα και τροφοδοτείται από ένα τμήμα μικροταινιακής γραμμής. Στο κάτω μέρος του διηλεκτρικού υποστρώματος είναι τυπωμένο το επίπεδο γείωσης του οποίου το πλάτος συμπίπτει με το πλάτος του υποστρώματος ενώ το μήκος συμπίπτει με το μήκος της μικροταινίας. Στην είσοδο της μικροταινίας έχει εφαρμοστεί ο τετραγωνικός ομοαξονικός συνδετήρας. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η κεραία Chirp που σχεδιάστηκε.



Σχήμα 6.2 Κεραία Chirp

Το διηλεκτρικό του υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε είναι το tfr-45 με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=4.38$, με εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta=0,00284$ και πάχος $H=1.63\text{mm}$.

Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται η Chirp κεραία με τις παραμέτρους των διαστάσεων της.



Σχήμα 6.3 Η Chirp με τις παραμέτρους των διαστάσεων της.

6.3 Ρύθμιση των παραμέτρων της σχεδίασης

6.3.1 Τροφοδότηση της διάταξης

Η τροφοδότηση της διάταξης έγινε με θύρα κυματοδότησης η οποία εφαρμόστηκε στην επιφάνεια της εισόδου του τετραγωνικού ομοαξονικού συνδετήρα SMA. Χρησιμοποιήθηκε ο νέος τετραγωνικός συνδετήρας SMA που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

6.3.2 Διακριτοποίηση

Στο κάθε μοντέλο εφαρμόστηκε τοπική διακριτοποίηση (local meshing) στην περιοχή του υποστρώματος της κεραίας με ελάχιστο βήμα $H/6$ κατά μήκος του πάχους του, στην περιοχή της επιφάνειας της κεραίας με βήμα 0.25 και στην περιοχή του διηλεκτρικού του SMA με βήμα 1 κατά μήκος του και $H/6$ κατά τις δύο διαστάσεις του πλάτους.

Έπειτα από την εφαρμογή του εργαλείου “adaptive meshing” του transient solver επιλέχθηκε ολική διακριτοποίηση (global meshing) 20/20/50. Ο συνολικός αριθμός κελιών του μοντέλου είναι περίπου 742.000.

6.3.3 Λοιπές ρυθμίσεις

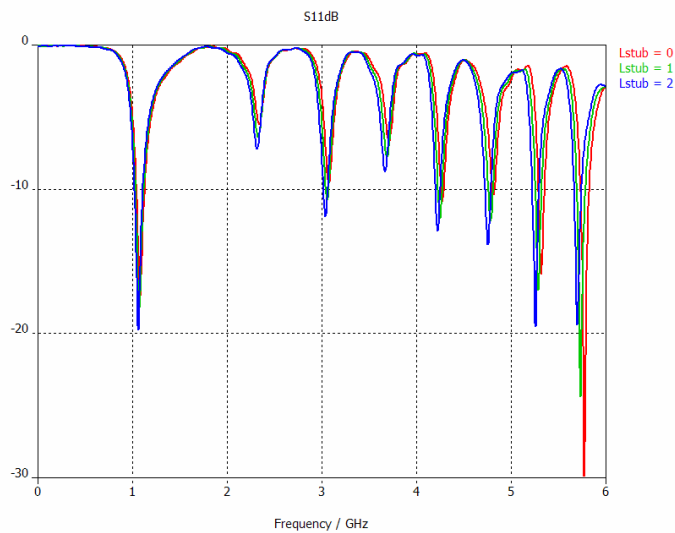
Οι προσομοιώσεις έγιναν στο διάστημα συχνοτήτων 0 έως 6 GHz και ορίστηκαν οριακές συνθήκες ABC.

6.4 Διαδικασία και αποτελέσματα προσομοιώσεων

Οι διαστάσεις της κεραίας καθορίστηκαν έτσι ώστε αυτή να συντονιστεί στην συχνότητα 1GHz. Οι πρώτες προσομοιώσεις έδειξαν ότι η κεραία μπορεί παρουσιάζει πολυζωνική

συμπεριφορά. Συγκεκριμένα στο διάστημα 0 έως 6GHz παρουσίασε οκτώ ελάχιστα τα περισσότερα από τα οποία όμως βρισκόταν πάνω από τα -10dB ενώ κάποια ξεπερνούσαν τα -10dB χωρίς όμως να επιδεικνύουν ικανοποιητικό εύρος ζώνης.

Με την μεταβολή του μήκους L_{stub} καταφέραμε να βελτιώσουμε την συνολική συμπεριφορά. Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται το διάγραμμα των συντελεστών ανάκλασης συναρτήσει της παραμέτρου L_{stub} .



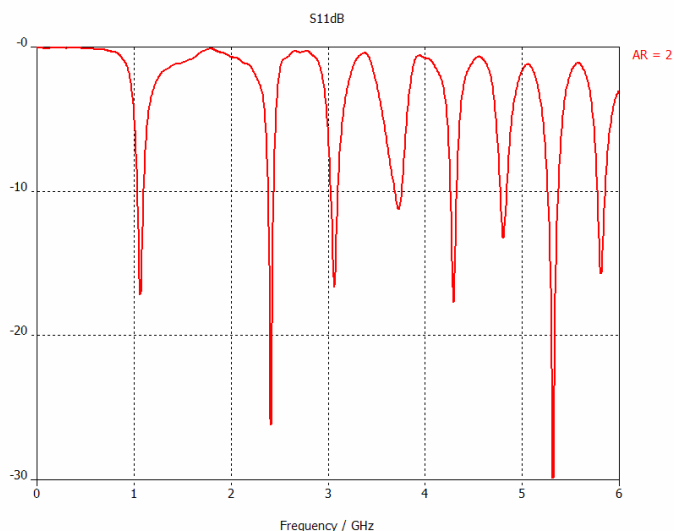
Σχήμα 6.4 Διάγραμμα των συντελεστών ανάκλασης συναρτήσει της παραμέτρου L_{stub}

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1 ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ CHIRP ΚΕΡΑΙΑΣ

A (mm)	X_{max} (mm)	L_{stub} (mm)	W_{stub} (mm)	W_{strip} (mm)
5	20	2	1.6	3.1

Στη συνέχεια προσαρμόσαμε οι διαστάσεις του επιπέδου γείωσης έτσι ώστε να βελτιώσουμε την συμπεριφορά της κεραίας.

Οι διαστάσεις στις οποίες η κεραία έδειξε βέλτιστη συμπεριφορά ήταν $subW=15mm$ και $subL=60mm$.



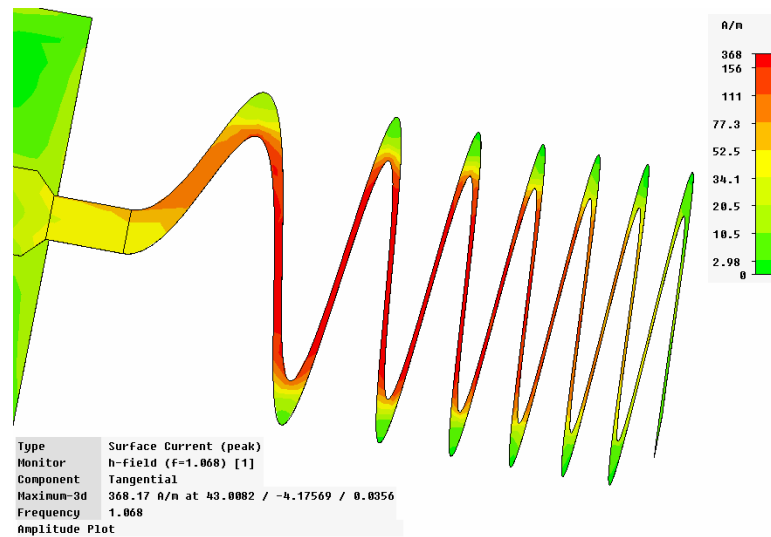
Σχήμα 6.5 Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης της κεραίας Chirp

Ο Πίνακας 6.2 περιλαμβάνει τις συχνότητες συντονισμού και τις αντίστοιχες αντιστάσεις εισόδου.

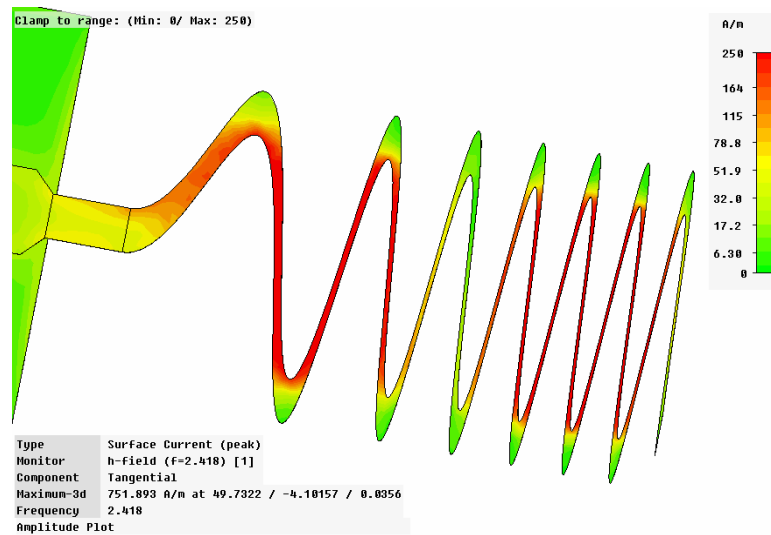
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2 ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΣΟΔΟΥ

Συντονισμοί	Συχνότητα συντονισμού (GHz)	Πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου (Ω)	Φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου (Ω)
1 ^{ος}	1,068	42,07	-12,32
2 ^{ος}	2,418	46,16	3,146
3 ^{ος}	3,066	43,15	13,46
4 ^{ος}	3,732	41,5	24,57
5 ^{ος}	4,296	41,13	-7,989
6 ^{ος}	4,812	32,01	-1,78
7 ^{ος}	5,322	50,14	-0,8552
8 ^{ος}	5,814	47,31	15,95

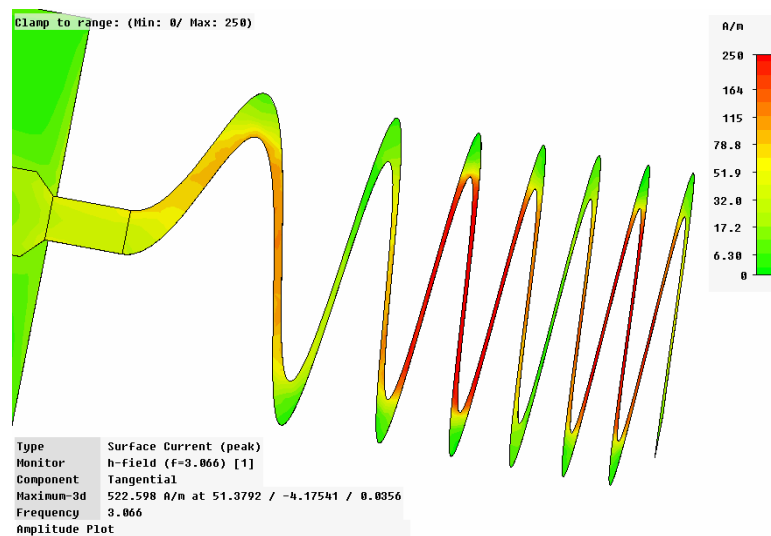
Στη συνέχεια παρουσιάζονται το εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα στις συχνότητες του 1^{ου}, 2^{ου}, 3^{ου}, 5^{ου}, και 7^{ου} συντονισμού.



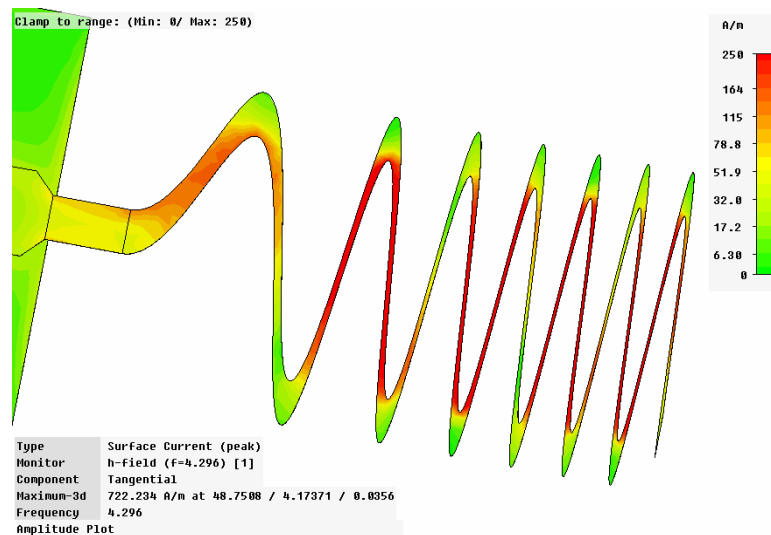
Σχήμα 6.6 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της Chirp κεραίας στην συχνότητα του 1^{ου} συντονισμού



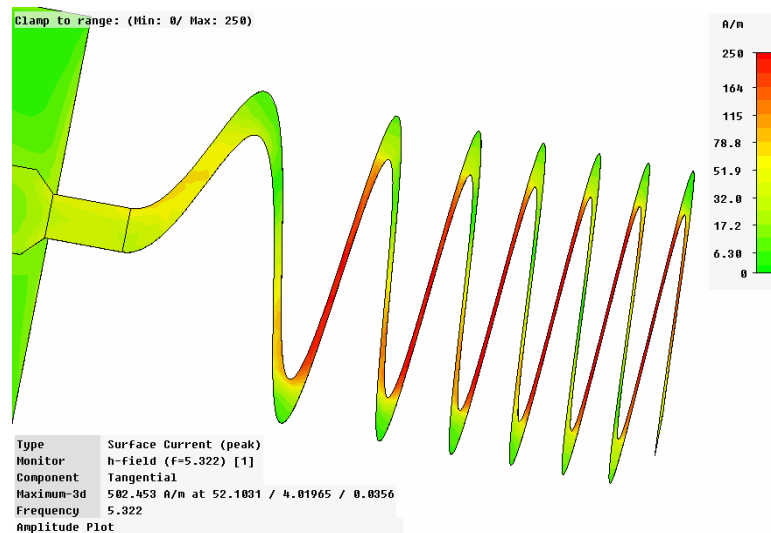
Σχήμα 6.7 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της Chirp κεραίας στην συχνότητα του 2^{ου} συντονισμού



Σχήμα 6.8 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της Chirp κεραίας στην συχνότητα του 3^{ου} συντονισμού



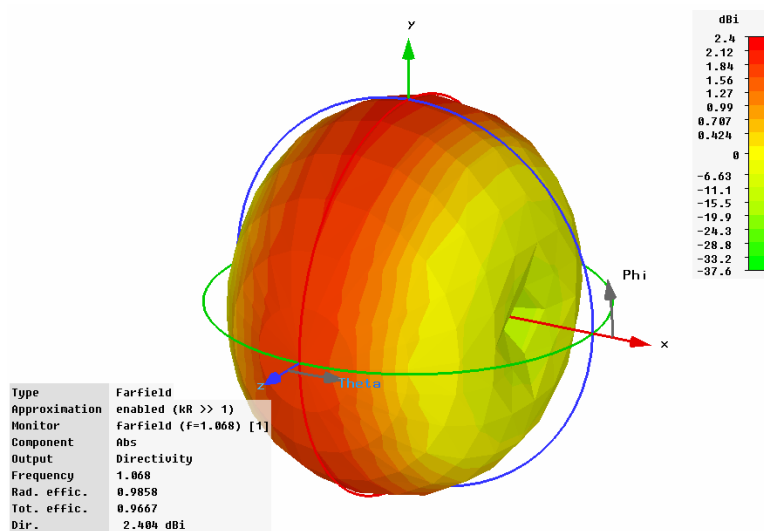
Σχήμα 6.9 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της Chirp κεραίας στην συχνότητα του 5^{ου} συντονισμού



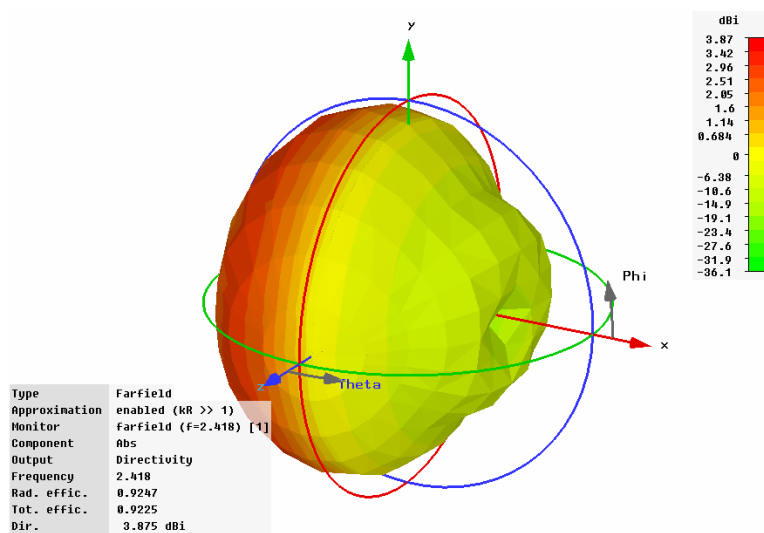
Σχήμα 6.10 Εφαπτομενικό επιφανειακό ρεύμα της Chirp κεραίας στην συχνότητα του 7^{ου} συντονισμού

Στα παραπάνω σχήματα βλέπουμε ότι η εφαπτομενική επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος διαφέρει για κάθε συντονισμό. Αυτό συμβαίνει διότι οι διαφορετικοί ρυθμοί αναπτύσσονται σε διαφορετικό μήκος πάνω στην κεραία. Συγκεκριμένα, καθώς η συχνότητα ανεβαίνει το μήκος αυτό μειώνεται. Έτσι βλέπουμε αυξομειώσεις της ρευματικής κατανομής πιο σύντομες χωρικά σε μεγαλύτερους συντονισμούς.

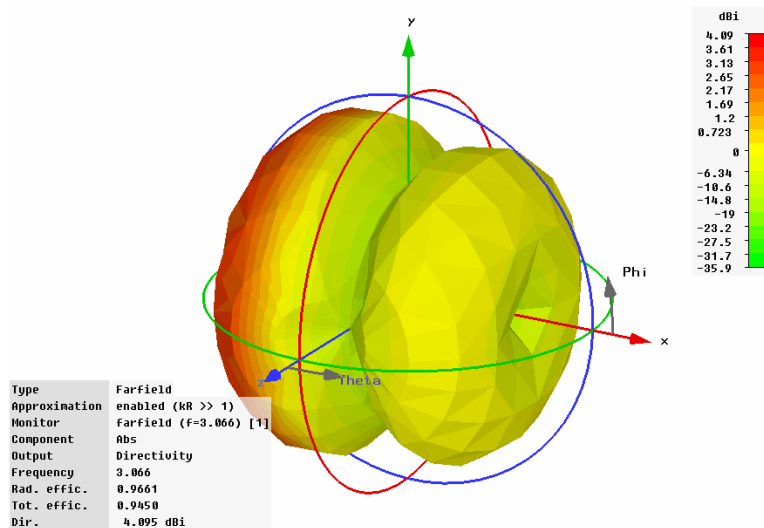
Επίσης παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας στις συχνότητες του 1^{ου}, 2^{ου}, 3^{ου}, 5^{ου}, και 7^{ου} συντονισμού.



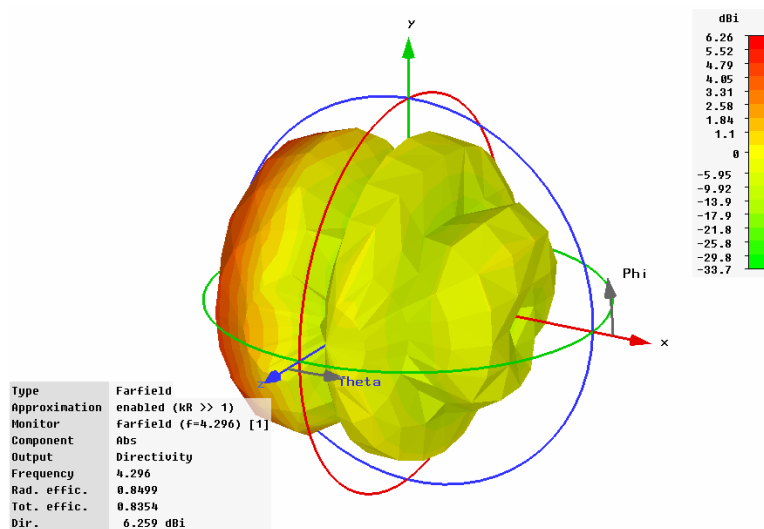
Σχήμα 6.11 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Chirp στον 1^ο συντονισμό ($\epsilon_{\text{rad}}=0.9858$)



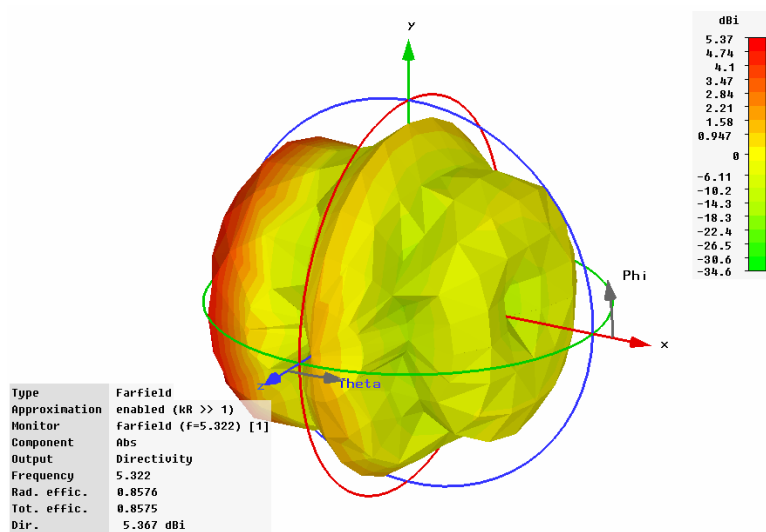
Σχήμα 6.12 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Chirp στον 2^ο συντονισμό ($\epsilon_{\text{rad}}=0.9247$)



Σχήμα 6.13 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Chirp στον 3^ο συντονισμό ($\epsilon_{rad}=0.9661$)



Σχήμα 6.14 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Chirp στον 4^ο συντονισμό ($\epsilon_{rad}=0.8499$)



Σχήμα 6.15 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Chirp στον 5^ο συντονισμό ($\epsilon_{rad}=0.8576$)

Στα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας είναι διαφορετικό για κάθε συχνότητα συντονισμού. Στον πρώτο συντονισμό παρουσιάζει ομοιοκατευθυντικότητα αλλά από τον δεύτερο συντονισμό κι έπειτα αρχίζουν να εμφανίζονται δευτερεύοντες λοβοί στο διάγραμμα ακτινοβολίας (χαρακτηριστικό των ηλεκτρικά μεγάλων κεραιών). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται η συχνότητα συντονισμού μεγαλώνει το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας με αποτέλεσμα η κεραία να γίνεται ηλεκτρικά μεγαλύτερη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

συντονισμός	1 ^{ος}	2 ^{ος}	3 ^{ος}	4 ^{ος}	5 ^{ος}	6 ^{ος}	7 ^{ος}	8 ^{ος}
ka (radians)	0.94	2.13	2.70	3.28	3.78	4.23	4.68	5.12

6.5 Βιβλιογραφία

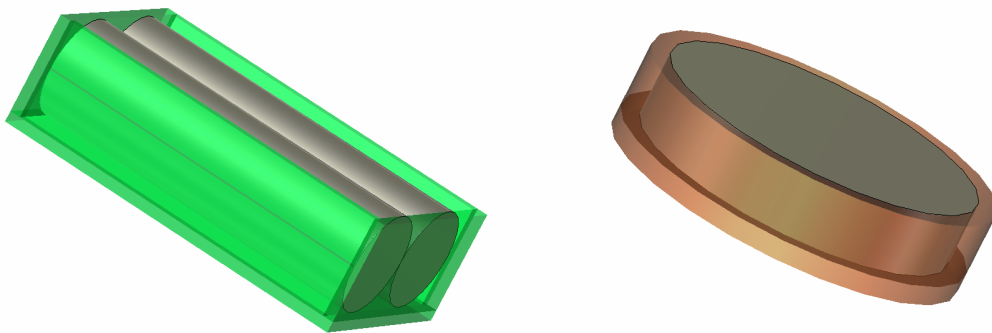
- [1] (2007) The Wikipedia website. [Online]. Available:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Chirp>

7. Μελέτη της συμπεριφοράς της κεραίας παρουσία μπαταριών

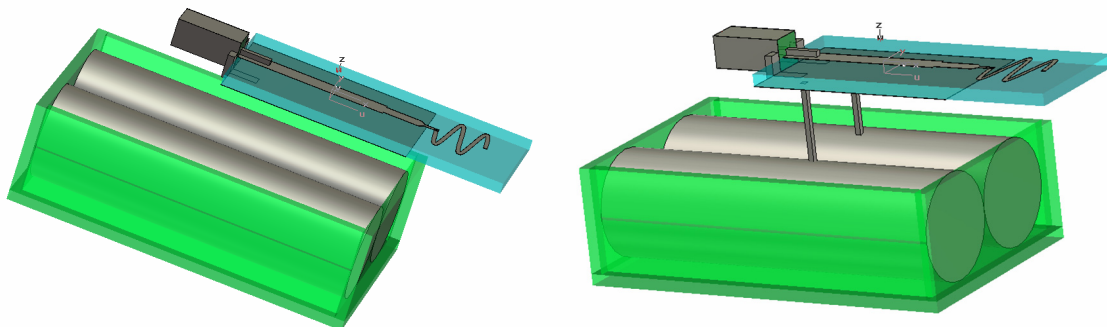
7.1 Εισαγωγή

Η τροφοδότηση των κινητών τερματικών γίνεται με μπαταρίες. Η παρουσία ενός σώματος στο κοντινό πεδίο της κεραίας επηρεάζει την ηλεκτρομαγνητική της συμπεριφορά διότι αλλοιώνει την αντίσταση εισόδου της. Επιπλέον, η μπαταρία είναι ένα αγώγιμο σώμα με αποτέλεσμα να επάγονται ρεύματα πάνω σ' αυτήν και να ακτινοβολεί.

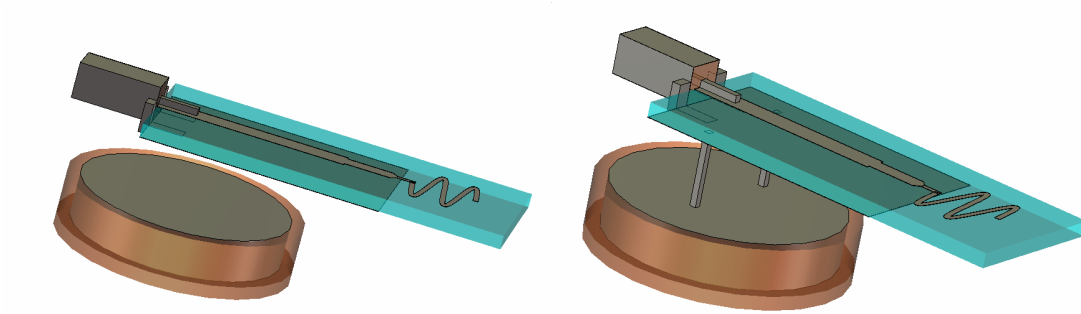
Για τη μελέτη της επίδρασης της συμπεριφοράς της κεραίας παρουσία μπαταριών έγινε χρήση τριών ειδών μπαταριών της αλκαλικής AA, της αλκαλικής AAA και της μπαταρίας λιθίου coin cell.



Σχήμα 7.1 Μπαταρίες τύπου AA και coin cell



Σχήμα 7.2 Μοντέλα ολοκλήρωσης κεραίας με μπαταρία AA



Σχήμα 7.3 Μοντέλα ολοκλήρωσης κεραίας με μπαταρία coin cell

Οι μπαταρίες AA και AAA έχουν σχεδιαστεί ως κυλινδρικοί αγωγοί μήκους 34mm και 29mm και ακτίνας 7mm και 5.15mm αντίστοιχα. Το σχήμα 7.1 παρουσιάζει τις διατάξεις των μπαταριών AA και της μπαταρίας τύπου coin cell όπως σχεδιάστηκαν για τις προσομοιώσεις. Στην πρώτη περίπτωση οι δύο μπαταρίες εφάπτονται και περικλείονται από διηλεκτρικό υλικό το οποίο αποτελεί τη θήκη της μπαταρίας και έχει πάχος 1.5mm το οποίο είναι ανοιχτό στην πάνω όψη. Η μπαταρία τύπου coin cell έχει σχεδιαστεί ως ένας κύλινδρος ακτίνας 12.25mm και πάχους 5mm, ο οποίος περικλείεται από διηλεκτρικό υλικό (θήκη της μπαταρίας) πάχους 1.5mm.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στη σχεδίαση των μπαταριών είναι ο τέλειος αγωγός (pec) για το σώμα τους και το διηλεκτρικό υλικό Teflon για την θήκη, με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 3.3$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0.0003$.

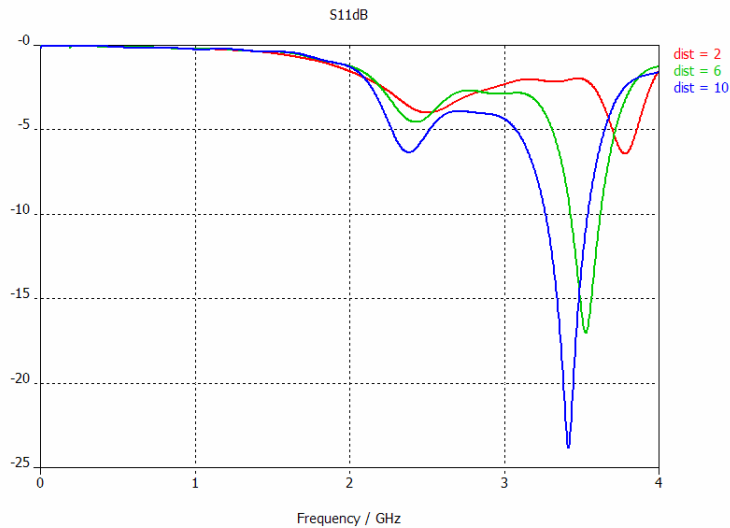
7.2 Διαδικασία και αποτελέσματα προσομοιώσεων

7.2.1 Μπαταρίες μεγέθους AA

Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις: (α) η παρουσία της μπαταρίας κάτω από την κεραία και (β) η παρουσία της μπαταρίας κάτω από την κεραία, η οποία συνδέεται με το επίπεδο γείωσης με γαλβανική σύνδεση μέσω δύο παράλληλων ακροδεκτών πάχους 1mm×1mm. Η δεύτερη σχεδίαση αποτελεί το ρεαλιστικό μοντέλο.

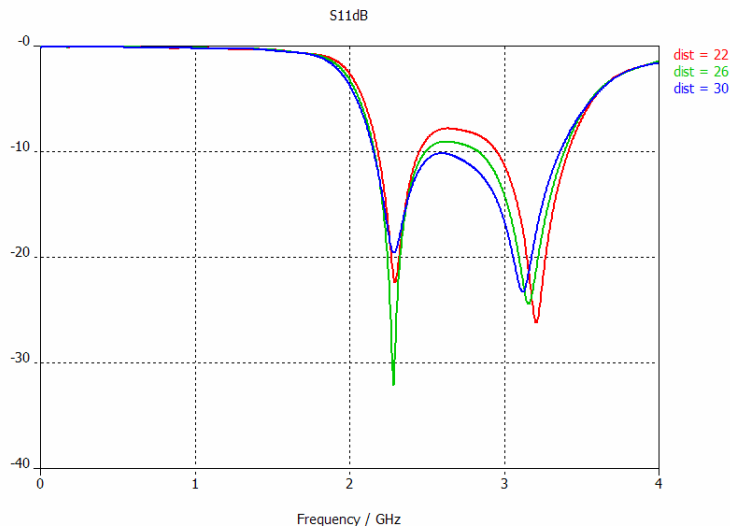
Οι μπαταρίες έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε να εκτείνονται κάτω από το επίπεδο γείωσης και να μην προεξέχουν κάτω από την κεραία. Επειδή οι διαστάσεις τους είναι μεγαλύτερες από το επίπεδο γείωσης, εξέχουν από την μεριά του συνδετήρα.

Η μελέτη λοιπόν έγινε εξετάζοντας την επίδραση της ύπαρξης της μπαταρίας AA στον συντελεστή ανάκλασης σε σχέση με την κάθετη απόστασή της από το επίπεδο γείωσης.



Σχήμα 7.4 Συντελεστές ανάκλασης της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταριών AA σε απόσταση 2mm, 6mm και 10mm.

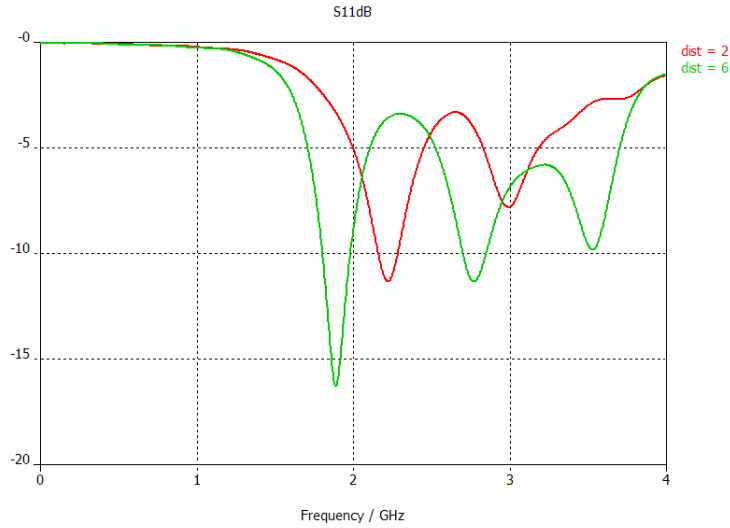
Στα συγκεκριμένα διαγράμματα βλέπουμε ότι η παρουσία της μπαταρίας στις αποστάσεις 2mm, 6mm και 10mm αλλοιώνουν δραματικά το διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης. Ενώ παρατηρώντας το Σχήμα 7.5 βλέπουμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας προσεγγίζει την αρχική του μορφή.



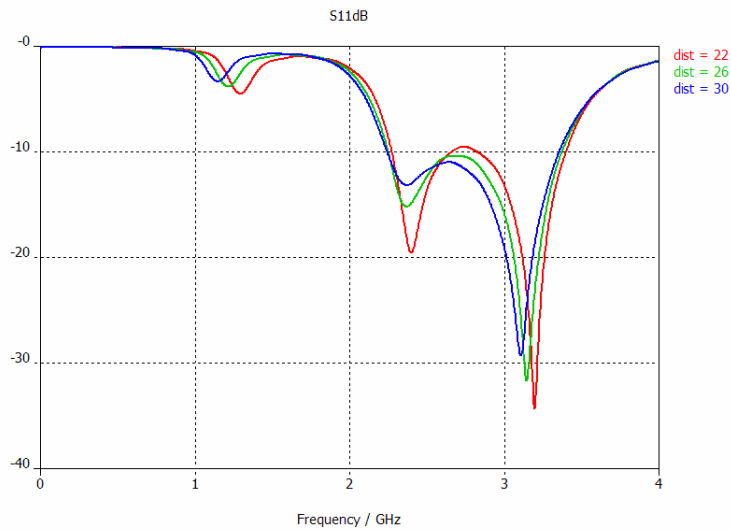
Σχήμα 7.5 Συντελεστές ανάκλασης της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταριών AA σε απόσταση 22mm, 26mm και 30mm.

Το Σχήμα 7.6 περιλαμβάνει τους συντελεστές ανάκλασης για τις αποστάσεις 2mm και 6mm, του μοντέλου όπου η μπαταρία συνδέεται με το επίπεδο γείωσης μέσω δύο ακροδεκτών. Βλέπουμε ότι και σ' αυτήν την περίπτωση το διάγραμμα αλλοιώνεται σημαντικά, και επιπλέον ότι εμφανίζεται και ένας τρίτος συντονισμός ο οποίος οφείλεται στην ακτινοβολήση των ακροδεκτών.

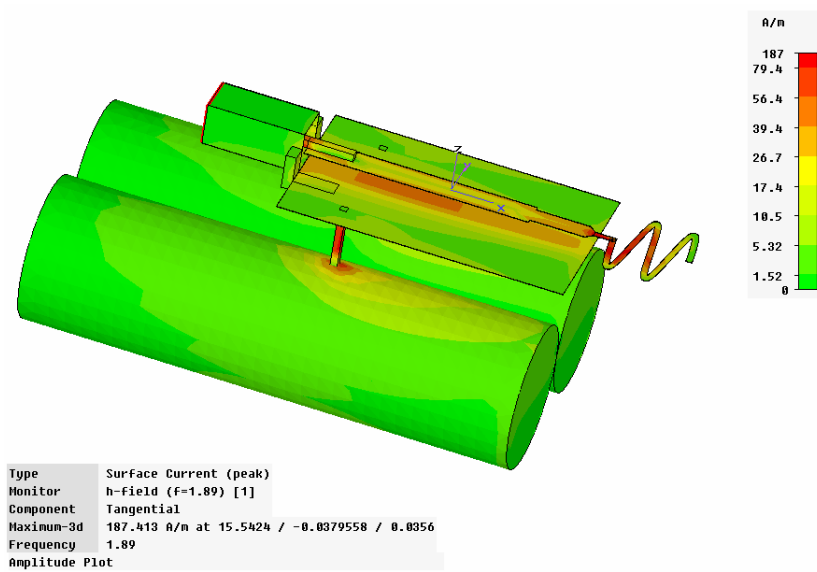
Στο Σχήμα 7.7 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο τρίτος συντονισμός έχει μετατοπισθεί σε μικρότερες συχνότητες πράγμα που συμφωνεί με το γεγονός ότι το μήκος των ακροδεκτών αυξάνεται. Το Σχήμα 7.8 παρουσιάζει την εφαιτομενική επιφανειακή κατανομή ρεύματος στην συχνότητα 1.89GHz όπου εμφανίζεται ο 3^{ος} συντονισμός στην συγκεκριμένη κεραία.



Σχήμα 7.6 Συντελεστές ανάκλασης της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταριών AA με γαλβανική σύνδεση σε απόσταση 2mm και 6mm.



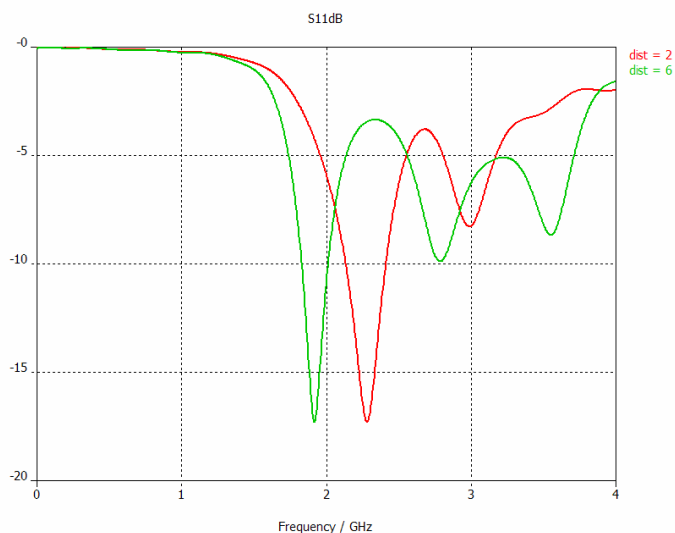
Σχήμα 7.7 Συντελεστές ανάκλασης της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταριών AA με γαλβανική σύνδεση σε απόσταση 22mm, 26mm και 30mm.



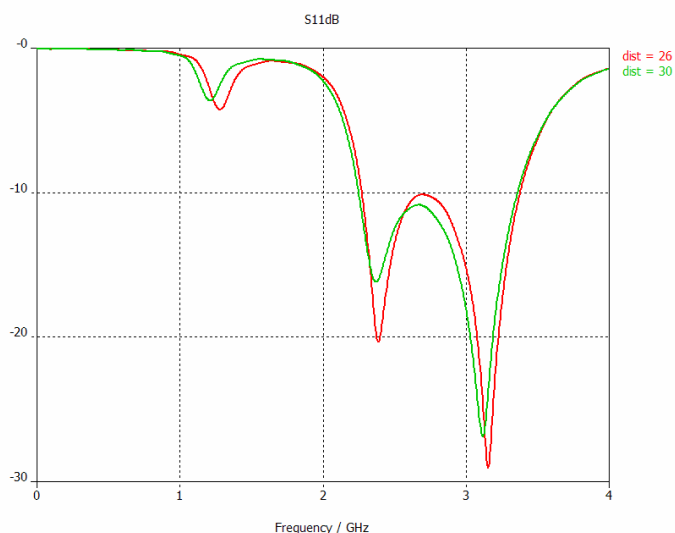
Σχήμα 7.8 Επιφανειακή επαπτομενική πυκνότητα ρεύματος στη συχνότητα 1.89GHz της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταρίας AA με γαλβανική σύνδεση σε απόσταση 6mm.

7.2.2 Μπαταρίες μεγέθους AAA

Το Σχήμα 7.6 περιλαμβάνει τους συντελεστές ανάκλασης για τις αποστάσεις 2mm και 6mm, του μοντέλου όπου η μπαταρία συνδέεται με το επίπεδο γείωσης μέσω δύο ακροδεκτών. Βλέπουμε ότι και σ' αυτήν την περίπτωση το διάγραμμα αλλοιώνεται σημαντικά, και επιπλέον ότι εμφανίζεται και ένας τρίτος συντονισμός ο οποίος οφείλεται στην ακτινοβολή των ακροδεκτών. Γενικά η αλλοίωση του διαγράμματος είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτής που προέκυψε λόγω των μπαταριών AA και αυτό συμβαίνει διότι οι μπαταρίες AAA είναι μικρότερες σε μέγεθος.



Σχήμα 7.9 Συντελεστές ανάκλασης της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταριών AAA με γαλβανική σύνδεση σε απόσταση 2mm και 6mm.

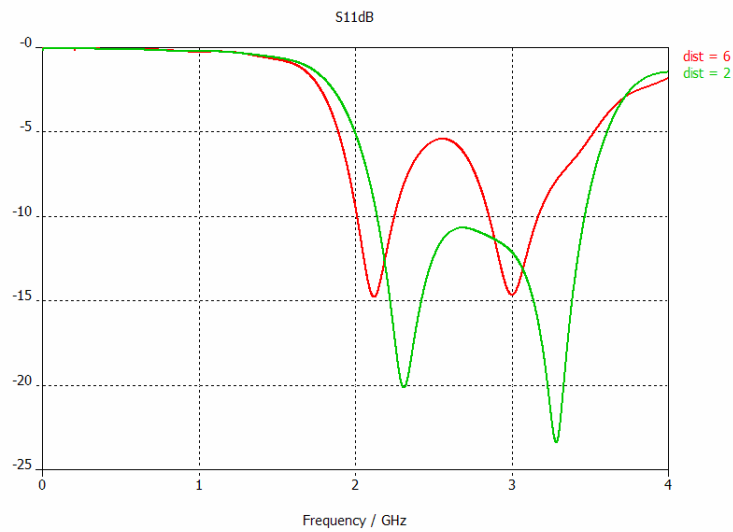


Σχήμα 7.10 Συντελεστές ανάκλασης της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταριών AA με γαλβανική σύνδεση σε απόσταση 26mm και 30mm.

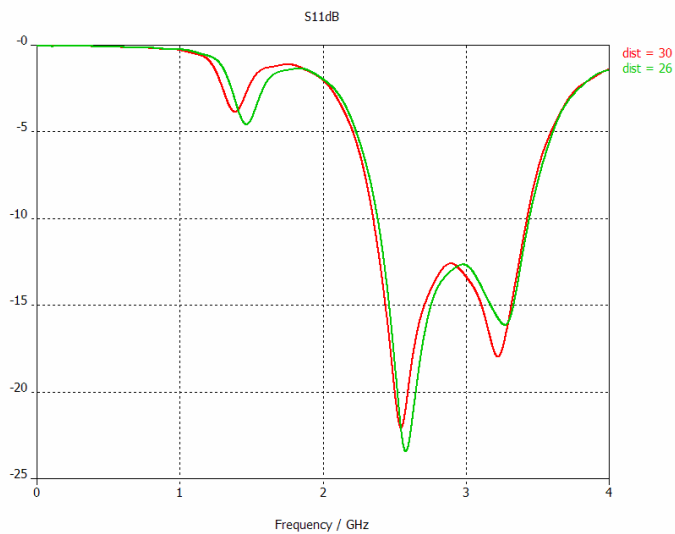
7.2.3 Μπαταρίες τύπου coin cell

Το Σχήμα 7.11 περιλαμβάνει τα διαγράμματα των συντελεστών ανάκλασης που αντιστοιχούν σε κάθετες αποστάσεις 2 και 6mm. Είναι φανερό ότι η αλλοίωση τους είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Οι δύο λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι ότι η μπαταρία έχει πολύ μικρότερες διαστάσεις σε σχέση με τις προηγούμενες και ότι τηρήθηκε και μία οριζόντια απόσταση 8,8mm μεταξύ της μπαταρίας και της κεραίας, γεγονός που μείωσε σημαντικά την επίδραση της μπαταρίας στην κεραία. Στο Σχήμα 7.12 οι συντελεστές ανάκλασης στο εύρος λειτουργίας της κεραίας είναι σχεδόν όμοιοι με αυτούς του μοντέλου χωρίς μπαταρίες

ενώ στην περιοχή του 1,5GHz παρουσιάζεται ο συντονισμός που οφείλεται στην ακτινοβολήση των ακροδεκτών.



Σχήμα 7.11 Συντελεστές ανάκλασης της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταρίας coin cell με γαλβανική σύνδεση σε απόσταση 2mm και 6mm.



Σχήμα 7.12 Συντελεστές ανάκλασης της ημιτονοειδούς κεραίας 2 περιόδων παρουσίας μπαταρίας coin cell με γαλβανική σύνδεση σε απόσταση 2mm και 6mm.

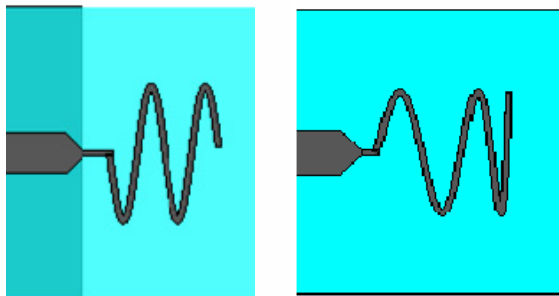
8. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία

8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

8.2 Σύγκριση μεταξύ Ημιτονοειδούς τυπωμένου μονοπόλου δύο περιόδων και τυπωμένου μονοπόλου Chebyshev ενάτου βαθμού

Στον συγκεντρώνουμε τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του Ημιτονοειδούς τυπωμένου μονοπόλου δύο περιόδων και του μονοπόλου Chebyshev ενάτου βαθμού. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα οι δύο γεωμετρίες έχουν κάποιες ομοιότητες.



Σχήμα 8.1 Ημιτονοειδές τυπωμένο μονόπολο δύο περιόδων και μονόπολο Chebyshev ενάτου βαθμού

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΟΥΣ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΟΠΟΛΟΥ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΟΠΟΛΟΥ CHEBYSHEV ΕΝΑΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ

	BW (GHz)	f_{center} (GHz)	FBWv %	ka (radians)	\overline{e}_{rad}	\overline{e}_{total}	FOM (dB)
Ημιτονοειδές τυπωμένο μονόπολο δύο περιόδων	1.164	2.844	0.4093	1.218	0.9115	0.8153	4.378
Μονόπολο Chebyshev ενάτου βαθμού	1.057	2.611	0.405	1.162	0.9878	0.8691	4.814

Σύμφωνα με τον πίνακα η ημιτονοειδής κεραία παρουσιάζει καλύτερο εύρος ζώνης από την κεραία Chebyshev όμως έχει μεγαλύτερο ηλεκτρικό μέγεθος και μικρότερη απόδοση

ακτινοβολίας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον συντελεστή αξίας FOM καλύτερη σχεδιαστικά κεραία είναι η Chebyshev.

8.3 Συμπεράσματα για την Chirp κεραία

Παρατηρώντας την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά της κεραίας Chirp, πρέπει να πούμε απαιτείται περαιτέρω μελέτη της κεραίας αυτής για την βελτίωση της. Συγκεκριμένα θα πρέπει να επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή και μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε κάθε συντονισμό.

Επίσης κατά τη σχεδίαση της συγκεκριμένης κεραίας συναντήσαμε κάποια σχεδιαστικά προβλήματα σε επίπεδο λογισμικού. Η αύξηση της χωρικής συχνότητας της κεραίας προκαλούσε μεγάλη πύκνωση της δομής της με αποτέλεσμα την αδυναμία του CST να δημιουργήσει την κεραία (αδυναμία εκτέλεσης της εντολής trace from curve, εμφάνιση παραμορφωμένου σχήματος). Γι' αυτό το λόγο καταφύγαμε σε μία σχεδιαστική λύση η οποία όμως παρουσίαζε το μειονέκτημα του μη σταθερού πάχους (που αντιπροσωπεύεται από την παράμετρο Wstub) της κεραίας.

Τα παραπάνω προβλήματα μας δημιούργησαν περιορισμούς στην σχεδίαση, σε επίπεδο αξιοποίησης των βαθμών ελευθερίας της γεωμετρίας. Για την περαιτέρω μελέτη λοιπόν της συγκεκριμένης κεραίας, χρειάζεται η επίλυση των προβλημάτων αυτών.

8.4 Συμπεράσματα από την μελέτη της Ημιτονοειδούς κεραίας παρουσία μπαταριών

Στην συγκεκριμένη μελέτη είδαμε ότι η παρουσία των μπαταριών επιδρά σημαντικά στην ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των κεραίων. Σημαντικό ρόλο παίζει τόσο το μέγεθος των μπαταριών όσο και η θέση τους σε σχέση με την κεραία. Είναι απαραίτητο λοιπόν σε μια σχεδίαση να λαμβάνουμε υπ' όψιν εκ των προτέρων την ύπαρξη και τις επιπτώσεις στη συμπεριφορά της κεραίας των μπαταριών που τροφοδοτούν τη διάταξη αλλά και κατ' επέκτασιν της συσκευασίας ολόκληρης της διάταξης.

8.5 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας προέκυψαν κάποιες ιδέες για σχεδίαση και μελέτη τυπωμένων κεραίων οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής εργασίας. Αυτές είναι οι εξής:

- Τυπωμένη κεραία δύο διαδοχικών ημιτόνων διαφορετικής χωρικής συχνότητας
- Τυπωμένη κεραία πολλαπλών στοιχείων (Ημιτονοειδούς γεωμετρίας)