

**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ
ΚΕΡΑΙΩΝ ΥΠΕΡΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ
(UWB)**

Διπλωματική εργασία

Πετκάκης Ιορδάνης
Α.Ε.Μ. 4089

Επιβλέπων καθηγητής: Τραϊανός Β. Γιούλτσης
Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2012

Περιεχόμενα

1. Κεραίες υπερευρείας ζώνης
 - 1.1 Ιστορικό επικοινωνιών UWB
 - 1.2 Ευρυζωνικές κεραίες
2. Ανάλυση επίπεδων κεραιών
 - 2.1 Κεραίες που προσομοιώθηκαν
 - 2.2 Τροφοδοσία, Είδη πηγών
 - 2.3 Συμπεράσματα
3. Σχεδίαση και ανάλυση επίπεδων κεραιών υπερευρείας ζώνης
 - 3.1 Επίπεδο κυκλικό μονόπολο
 - 3.2 Επίπεδο ελλειπτικό μονόπολο
 - 3.3 Επίπεδο τριγωνικό μονόπολο
 - 3.4 Συμπεράσματα
4. Συμπαγείς κεραίες υπερευρείας ζώνης
 - 4.1 Εισαγωγή
 - 4.2 Περιγραφή της κεραίας
 - 4.3 Απόδοση της κεραίας
 - 4.4 Τροποποίηση της κεραίας
 - 4.5 Συμπεράσματα
5. Κεραίας υπερευρείας ζώνης
 - 5.1 Εισαγωγή
 - 5.2 Περιγραφή της κεραίας
 - 5.3 Απόδοση της κεραίας
 - 5.4 Τροποποίηση της κεραίας
 - 5.5 Συμπεράσματα

1. Κεραίες υπερευρείας ζώνης (Ultra-Wideband Antennas)

1.1 Ιστορικό επικοινωνιών UWB

Ultra-wideband (UWB) είναι μια τεχνολογία για τη μετάδοση πληροφοριών σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης μετάδοσης (>500MHz) που θα πρέπει υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις να έχει τη δυνατότητα να μοιράζεται το φάσμα από κοινού με άλλους χρήστες. Η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης (UWB) φέρνει την ευκολία και την ευκινησία των ασύρματων επικοινωνιών στις συνδέσεις συσκευών υψηλής ταχύτητας.

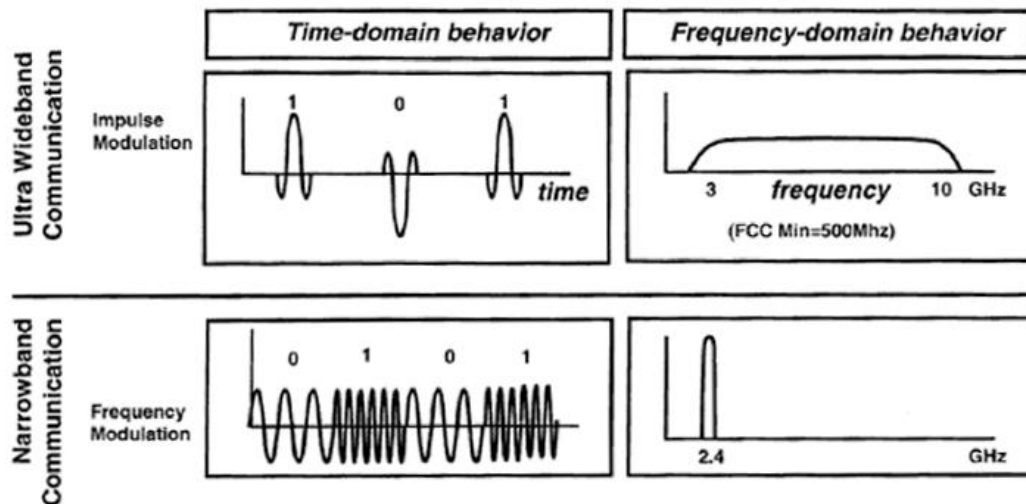
Σχεδιασμένα για χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας ασύρματα δίκτυα WPANs, η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης (UWB) είναι η κύρια τεχνολογία για την απελευθέρωση των ηλεκτρονικών συσκευών από τα καλώδια, επιτρέποντας παράλληλα παράλληλα την ασύρματη σύνδεση πολλών συσκευών για μετάδοση βίντεο, ήχου και άλλων δεδομένων υψηλού εύρους ζώνης.

Η μικρής εμβέλειας τεχνολογία UWB συμπληρώνει άλλες τεχνολογίες μεγαλύτερης εμβέλειας, όπως Wi-Fi, Wimax, και των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών ευρείας ζώνης. Ο συνδυασμός ευρύτερου φάσματος και χαμηλότερης ισχύος βελτώνει την ταχύτητα και μειώνει τις παρεμβολές με άλλα ασύρματα φάσματα. Χρησιμοποιείται για την αναμετάδοση δεδομένων από μια συσκευή υποδοχής σε άλλες συσκευές σε κοντινή περιοχή ως 10 μέτρων. Οι ασύρματες μεταδόσεις υπερευρείας ζώνης μπορούν και πρέπει να λειτουργήσουν στην περιοχή συχνοτήτων από 3.1GHz ως και 10.6GHz, με την περιορισμένη ισχύ εκπομπής των -41dBm/MHz. Ο FCC και ο ITU-R ορίζουν ως UWB τη μετάδοση από μια κεραία σήματος με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 500 MHz ή 20% της κεντρικής συχνότητας. Τα περισσότερα συστήματα στενής ζώνης καταλαμβάνουν λιγότερο εύρος ζώνης μικρότερο από το 10% της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας και εκπέμπουν σε πολύ υψηλότερα επίπεδα ενέργειας.

Τα συστήματα υπερευρείας ζώνης διαφέρουν σημαντικά από τα συμβατικά συστήματα στενής ζώνης συχνοτήτων (RF) και τις τεχνολογίες εξαπλωμένου φάσματος (SS), όπως το Bluetooth και το 802.11a/b/g. Ο πομπός υπερευρείας ζώνης λειτουργεί στέλνοντας δισεκατομμύρια παλμών σε ένα πολύ ευρύ φάσμα συχνοτήτων αρκετών GHz. Ο αντίστοιχος δέκτης μεταφράζει τους παλμούς σε δεδομένα χρησιμοποιώντας μια γνωστή παλμοσειρά που εκπέμπεται από τον πομπό.

Τα συστήματα υπερευρείας ζώνης εκπέμπουν παλμούς πολύ μικρής διάρκειας συμπιεσμένους στο χρόνο, αντί για ημιτονοειδείς κυματομορφές συμπιεσμένες στη συχνότητα. Στο Σχ. 1 φαίνεται η διαφορά ανάμεσα σε ένα σήμα στενής ζώνης και ένα υπερευρείας ζώνης. Το εύρος ζώνης του σήματος UWB είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του σήματος στενής ζώνης, με αποτέλεσμα το σήμα UWB να μπορεί να λειτουργήσει σε ευρύτερες συχνότητες.

Σήμερα οι περισσότεροι υπολογιστές και ηλεκτρονικές συσκευές, από μια ψηφιακή κάμερα και ένα DVD player μέχρι ένα φορητό H/Y και μια τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) απαιτούν καλώδια για την εγγραφή, την αναπαραγωγή ή την ανταλλαγή δεδομένων. Μέσω της τεχνολογίας υπερευρείας ζώνης (UWB) προσδοκείται η εξάλειψη των καλωδίων.



Σχήμα 1. Η διαφορά ανάμεσα σε ένα σήμα στενής ζώνης και ένα υπερευρείας ζώνης. Το εύρος ζώνης του σήματος UWB είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του σήματος στενής ζώνης

Παρατίθενται, συνοπτικά, παρακάτω οι σημαντικότερες χρήσεις και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κεραιών μικροταινίας:

Χρήσεις

- Δορυφορικές επικοινωνίες
- Ραντάρ
- Επικοινωνία αεροσκαφών και πλοίων
- Ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs)
- GPS
- Εφαρμογές κινητής ραδιοεπικοινωνίας (οχήματα)
- Τηλεμετρία

Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό βάρος, μικρός όγκος
- Χαμηλό κόστος κατασκευής
- Υποστήριξη γραμμικής και κυκλικής πόλωσης
- Εύκολη υλοποίηση σε μορφή μονολιθικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (MMICs)
- Μεγάλη ευελιξία στον καθορισμό διαφόρων χαρακτηριστικών τους, όπως η συχνότητα συντονισμού, το διάγραμμα ακτινοβολίας, η πόλωση
- Αντοχή σε κρούσεις και δονήσεις λόγω της σπιβαρής κατασκευής τους

Μειονεκτήματα

- Χαμηλή μέγιστη ισχύς
- Μικρό κέρδος (~6 dBi)
- Μη καθαρή πόλωση (υψηλά επίπεδα cross-polarization)

1.2 Ευρυζωνικές κεραιές

Η τεχνολογία της υπερευρείας ζώνης είχε σημαντική επίδραση στη σχεδίαση κεραιών. Δεδομένου ότι η έρευνα για τις κεραιές συστημάτων στενής ζώνης βρίσκεται πια σε σχετικά ώριμο επίπεδο, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η κεραία ήταν η θεμελιώδης πρόκληση των συστημάτων τηλεπικοινωνιών υπερευρείας ζώνης, η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης κέντρισε το ενδιαφέρον των σχεδιαστών κεραιών, παρέχοντας νέες προκλήσεις για σχεδιασμό. Η μεγαλύτερη πρόκληση στο σχεδιασμό είναι η επίτευξη της μεγάλου εύρους σύνθετης αντιστάσης διατηρώντας παράλληλα υψηλή απόδοση ακτινοβολίας. Με εύρος 7.5 GHz, η κεραία ξεπερνάει τον ορισμό των κεραιών ευρείας ζώνης. Οι κεραιές υπερευρείας ζώνης συνήθως πρέπει να επιτυγχάνουν ένα εύρος ζώνης που να υπερβαίνει το 100% της κεντρικής συχνότητας και να εξασφαλίζουν επαρκή σύνθετη αντίσταση σε όλο το εύρος, έτσι ώστε η απώλεια ισχύος λόγω των ανακλάσεων στα άκρα της κεραίας να είναι μικρότερη από 10%.

Η χρήση συχνοτήτων υπερευρείας ζώνης απαιτεί λειτουργικό εύρος ζώνης μέχρι και μεγαλύτερο από το 100% της κεντρικής συχνότητας. Εκτός από την επίτευξη επαρκούς εύρους ζώνης σύνθετη αντίσταση, απαιτείται επίσης γραμμική φάση και χαμηλή διασπορά για τη βέλτιστη λήψη του κύματος, το οποίο αντιστοιχεί σε σχεδόν σταθερή καθυστέρηση ομάδας. Αυτό ελαχιστοποιεί τη παραμόρφωση του παλμού κατά τη μετάδοση. Επίσης για εφαρμογές υπερευρείας ζώνης απαιτείται υψηλή απόδοση ακτινοβολίας. Δεδομένου της πολύ χαμηλής ενέργειας εκπομπής (κάτω από το κατώφλι του θορύβου), οι απώλειες ισχύος που οφείλονται στα διηλεκτρικά και στους αγωγούς πρέπει να είναι ελαχιστοποιημένες. Τυπικές κεραιές του εμπορίου επιτυγχάνουν απόδοση της τάξης του 50-60% λόγω απωλειών στο διηλεκτρικό. Η απώλεια ενέργειας σε ποσοστό 50% δεν είναι αποδεκτή για χρήση σε υπερευρεία ζώνη, αφού η λήψη και η αρχιτεκτονική της κεραίας υπερευρείας ζώνης πρέπει να είναι εξαιρετικά ευαίσθητη για να ληφθεί ένα σήμα υπερευρείας ζώνης. Επιπλέον απώλειες μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τη λειτουργικότητα του συστήματος. Η συμβατότητα με φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και ολοκληρωμένα κυκλώματα απαιτεί φυσικούς περιορισμούς. Ως εκτούτου, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός συμπαγών και μικρών κεραιών. Οι επίπεδες κεραιές είναι επίσης επιθυμητές για τους ίδιους λόγους.

2. Ανάλυση επίπεδων κεραιών

Η σχεδίαση των κεραιών έγινε με κατάλληλο λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης υψηλών συχνοτήτων.

Τα επίπεδα κυκλώματα περιλαμβάνουν κυκλώματα μικροταινίας, τυπωμένες γραμμές μεταφοράς, ομοεπίπεδους κυματοδηγούς, PCB (ενός και πολλών επιπέδων) και συνδυασμούς αυτών με συνδέσεις νίας, κάθετα μεταλλικά φύλλα, καθώς και οποιοδήποτε αριθμό ενσωματωμένων στρωμάτων μετάλλων σε στρωματοποιημένα διηλεκτρικά υλικά.

Το λογισμικό απαιτεί μια φυσική περιγραφή του κυκλώματος (δομή και ιδιότητες των μετάλλων και των διηλεκτρικών) και ακολουθεί μια αυστηρή μέθοδο ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης, βασισμένη στις εξισώσεις του Maxwell, που περιλαμβάνει όλα τα παρασιτικά, πολλαπλών συζεύξεων, enclosure και package φαινόμενα συντονισμού.

2.1 Κεραίες που προσομοιώθηκαν

Έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης των ακόλουθων κεραιών, όσον αφορά τα διαγράμματα S_{11} , με κύριο στόχο την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τη σωστή εφαρμογή του λογισμικού σε επίπεδες κεραίες:

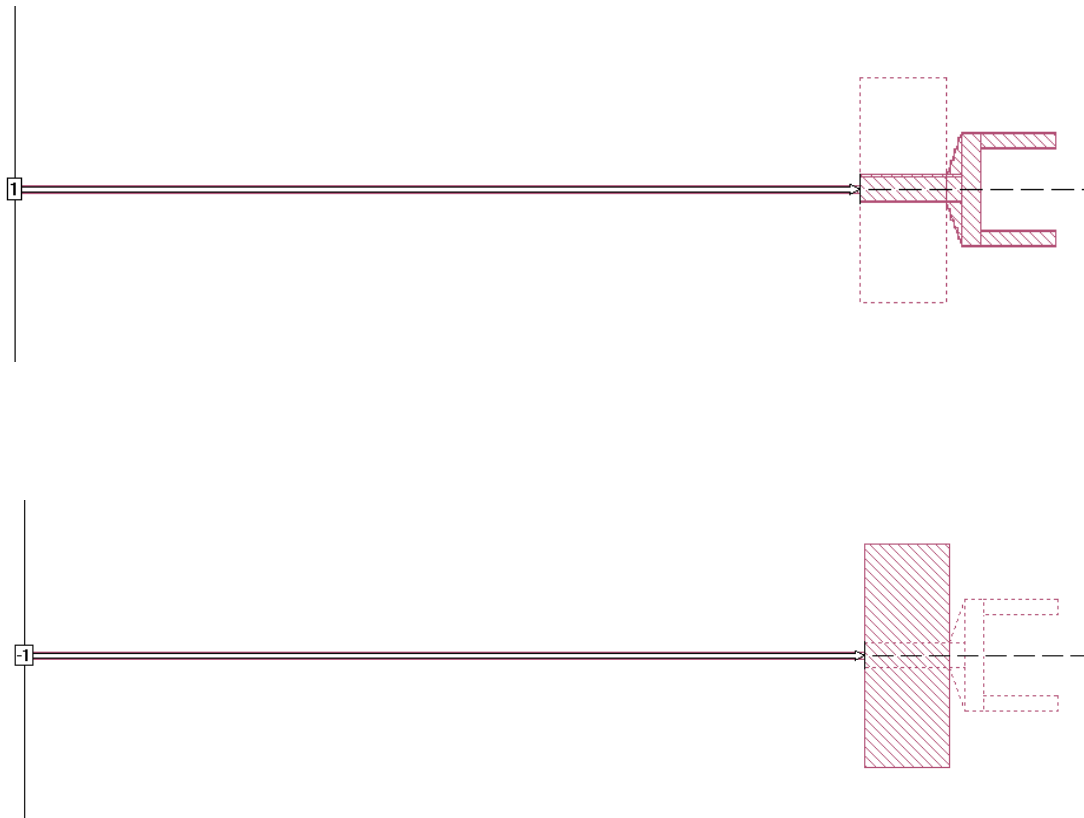
- Επίπεδο κυκλικό μονόπολο
- Επίπεδο ελλειπτικό μονόπολο
- Επίπεδο τριγωνικό μονόπολο

2.2 Τροφοδοσία, Είδη πηγών

Υπάρχουν τα ακόλουθα είδη πηγών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν: standard box-wall port, co-calibrated internal port, via port, auto-grounded port και ungrounded internal port. Η εξ ορισμού ρύθμιση για τη χαρακτηριστική αντίσταση της πηγής είναι 50 Ohm, οπότε στις περισσότερες εφαρμογές δε χρειάζεται να γίνει κάποια αλλαγή.

Box wall:

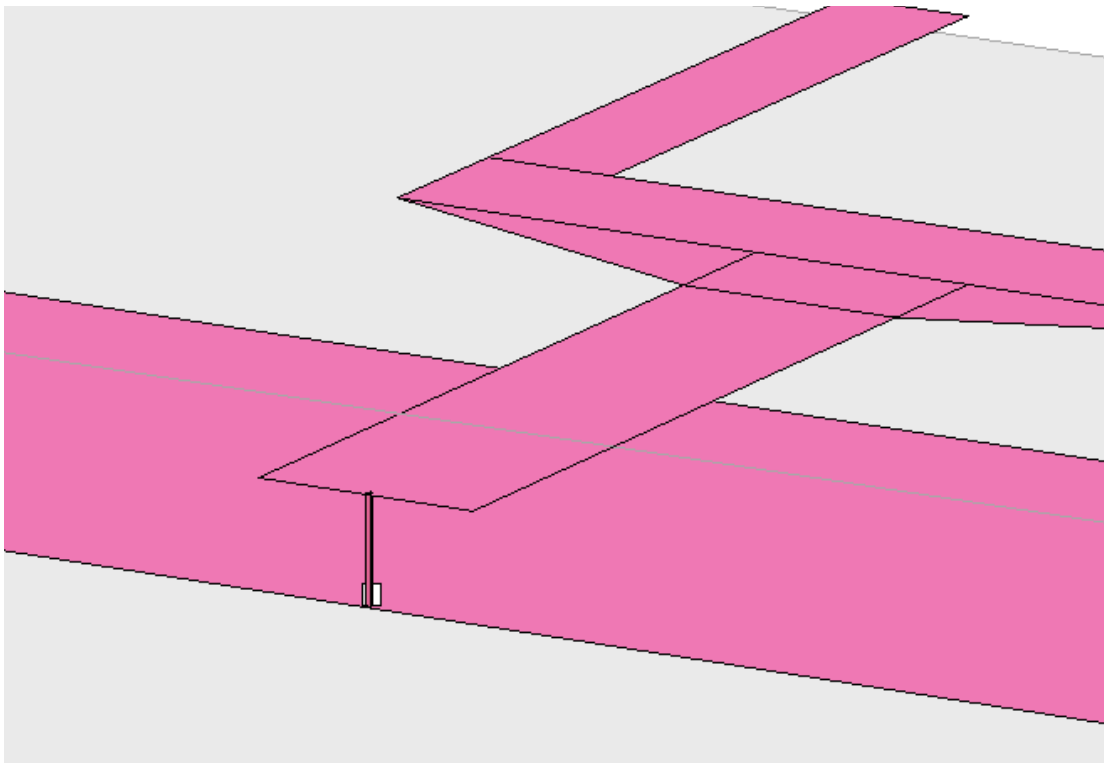
- Ο πιο συνηθισμένος τύπος πηγής.
- Ο θετικός ακροδέκτης συνδέεται σε ένα μεταλλικό πολύγωνο και ο αρνητικός στο μεταλλικό box που λειτουργεί ως γείωση.
- Η χρήση De-embedding είναι απαραίτητη για ακρίβεια στην ανάλυση.
- Χρησιμοποιείται για συνδέσεις στην περιφέρεια του κυκλώματος.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν reference planes.



Σχήμα 1. Η γεωμετρία τύπου πηγής Box wall άνω και κάτω όψη (επάνω και κάτω αντίστοιχα).

Via port:

- Χρησιμοποιείται στο εσωτερικό του κυκλώματος.
- Το αρνητικό άκρο συνδέεται σε ένα πολύγωνο κάποιου επιπέδου και το θετικό σε ένα άλλο πολύγωνο ενός άλλου επιπέδου σε υψηλότερο επίπεδο.
- Δεν μπορεί να γίνει χρήση de-embedding.
- Συνήθως χρησιμοποιείται για τη σύνδεση πηγής μεταξύ δύο παρακείμενων επιπέδων.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν reference planes.
- Η via port δεν συνδέεται με τα τοιχώματα του box, οπότε το κύκλωμα έχει τη δική του γείωση που είναι ανεξάρτητη της γείωσης του box.



Σχήμα 2. Η γεωμετρία τύπου πηγής Via port.

Αυτός ο τύπος πηγής είναι ο μόνος που δεν έχει άμεση εξάρτηση από τη γείωση του box, και γι αυτό το λόγο είναι ο πιο ρεαλιστικός από τους υπόλοιπους τύπους πηγών, αφού η πηγή συνδέεται με το ένα της άκρο στη γραμμή μεταφοράς που οδηγεί στον ακτινοβολητή και με το άλλο άκρο στο groundplane.

Co-calibrated internal port:

- Χρησιμοποιείται στο εσωτερικό του κυκλώματος.
- Αναγνωρίζεται ως μέρος μιας βαθμονομημένης ομάδας με κοινή τοπική σύνδεση γείωσης (common ground node connection).
- Όταν το em πρεγματοποιεί μια ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, οι co-calibrated ports μιας ομάδας αποενσωματώνονται (de-embedded) ταυτόχρονα.
- Υψηλής ακρίβειας de-embedding.

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν reference planes.

Ο τύπος αυτός πηγής με γείωση δε γίνεται να χρησιμοποιηθεί σε κεραία όπου το box δεν έχει μεταλλική επιφάνεια είτε στη βάση είτε στην οροφή του, γιατί όταν δηλώσουμε σαν γείωση το box αυτόματα δημιουργείται μια νία που συνδέει την πηγή με τη βάση ή την οροφή του box.

Auto-grounded port:

- Χρησιμοποιείται στο εσωτερικό του κυκλώματος.
- Ο θετικός ακροδέκτης συνδέεται στην άκρη ενός μεταλλικού πολυγώνου και ο αρνητικός ακροδέκτης συνδέεται στη γείωση (box wall) μέσω όλων των ενδιάμεσων διηλεκτρικών στρωμάτων.
- Χρησιμοποιείται στη θέση μιας πηγής co-calibrated για να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για τη διαδικασία του de-embedding με κόστος στην ακρίβεια.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν reference planes.
- Οι συζεύξεις ανάμεσα σε auto-grounded ports δεν λαμβάνονται υπόψιν κατά τη διαδικασία του de-embedding.

Η γείωση αυτού του τύπου πηγής είναι η βάση του box. Για να λειτουργήσει σωστά πρέπει να μην υπάρχουν μεταλλικές επιφάνειες μεταξύ του θετικού άκρου της πηγής και του ground plane. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε επίπεδες κεραίες όπου η γείωσή του είναι σε χαμηλότερο επίπεδο και καταλαμβάνει μεγαλύτερη επιφάνεια από αυτήν του ακτινοβολητή, δηλαδή σαν γείωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση του box.

Ungrounded Internal Ports:

- Χρησιμοποιείται στο εσωτερικό του κυκλώματος.
- Κάθε ακροδέκτης συνδέεται σε ένα ή δύο παρακείμενα πολύγωνα.
- Χρησιμοποιείται αντί co-calibrated port όταν δεν επιθυμείται κενό μεταξύ των δύο πολυγώνων.
- Έχει διαφορετική γείωση από τις άλλες πηγές του κυκλώματος.
- Συνήθως χρησιμοποιείται για την πρόσθεση μια σειρά στοιχείων σε μετέπειτα επεξεργασία.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν reference planes.

Δεν είναι δυνατή η χρήση τους σε συνδέσεις μεταξύ επιπέδων.

2.3 Συμπεράσματα

Σε κεραίες με ground plane σε άλλο επίπεδο από τον ακτινοβολητή είναι δυνατή η χρήση μόνο δύο εκ των πέντε τύπων πηγών, της box wall port και της via port. Χρησιμοποιήθηκε circular via διαμέτρου 0.1mm, καθώς έχει παρατηρηθεί από σχετικές αναφορές ότι δίνει ελαφρώς πιο ακριβή αποτελέσματα από την boxwall port και συγχρόνως δεν έχουμε εξάρτηση από τη γείωση του box. Επίσης όσον αφορά το μέγεθος της διαμέτρου της viaport έχει παρατηρηθεί ότι ελάχιστα συμβάλει στη μεταβολή των S_{11} διαγραμμάτων.

3. Σχεδίαση και ανάλυση επίπεδων κεραιών υπερευρείας ζώνης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που έγιναν για τρεις επίπεδες κεραιές. Λεπτομέρειες για τη σχεδίαση των κεραιών δε θα αναφερθούν στο παρόν κεφάλαιο, εκτός και αν υπάρχει κάποιο ιδιαίτερο σημείο άξιον αναφοράς.

Η σχεδίαση των κεραιών θα γίνει για λειτουργία στα 2.5 GHz. Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται υπόστρωμα πάχους $d=1.6\text{mm}$ από διηλεκτρικό FR4. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του FR4 είναι τα ακόλουθα:

- διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=4.4$
- εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta=0.022$
- διηλεκτρική αγωγιμότητα $\sigma=0$

Το πάχος του μετάλλου είναι αμελητέο και θεωρείται μηδενικό ($t=0\text{mm}$). Όλες οι κεραιές τροφοδοτούνται από πηγή χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ohm, που είναι και η πιο συνηθισμένη στο εμπόριο. Για να υπάρχει προσαρμογή ανάμεσα στην πηγή και τη γραμμή μεταφοράς που τροφοδοτεί τον ακτινοβολητή, πρέπει και η γραμμή μεταφοράς να έχει χαρακτηριστική αντίσταση 50 Ohm. Για να γίνει αυτό πρέπει να επιλέξουμε κάποιο πλάτος γραμμής μεταφοράς που να δίνει τη συγκεκριμένη χαρακτηριστική αντίσταση.

Οι εξισώσεις που μας επιτρέπουν να υπολογίσουμε το πλάτος W της γραμμής μεταφοράς που απαιτείται είναι οι ακόλουθες:

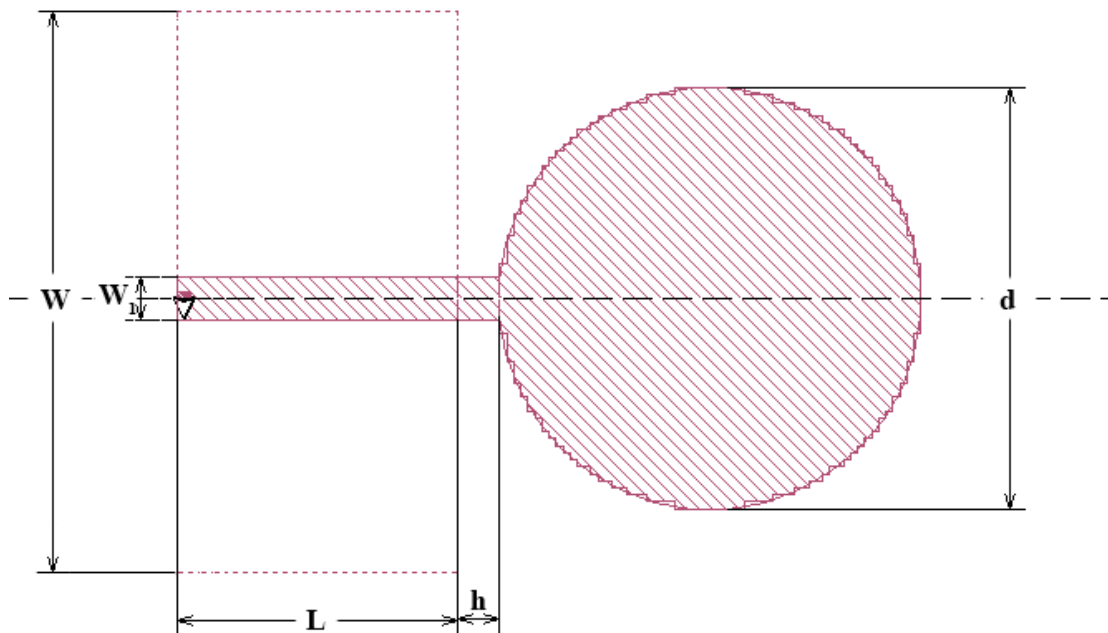
$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A}-2}, & A > 1.52 \\ \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r-1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\}, & A \leq 1.52 \end{cases}$$

όπου

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \text{ και } B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

Μετά τους υπολογισμούς βρίσκουμε ότι το πλάτος των γραμμών μεταφοράς μικροταινίας θα ισούται περίπου με $W=3\text{mm}$.

3.1 Επίπεδο κυκλικό μονόπολο



Σχήμα 1. Η γεωμετρίαεπίπεδου κυκλικού μονόπολου (άνω όψη) .

Το επίπεδο κυκλικό μονόπολο χρησιμοποιείται κυρίως για απώλειες επιστροφής 10 dB σε ένα εύρος ζώνης κατάλληλο για χρήση στην υπερευρεία ζώνη και ικανοποιητικά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας.

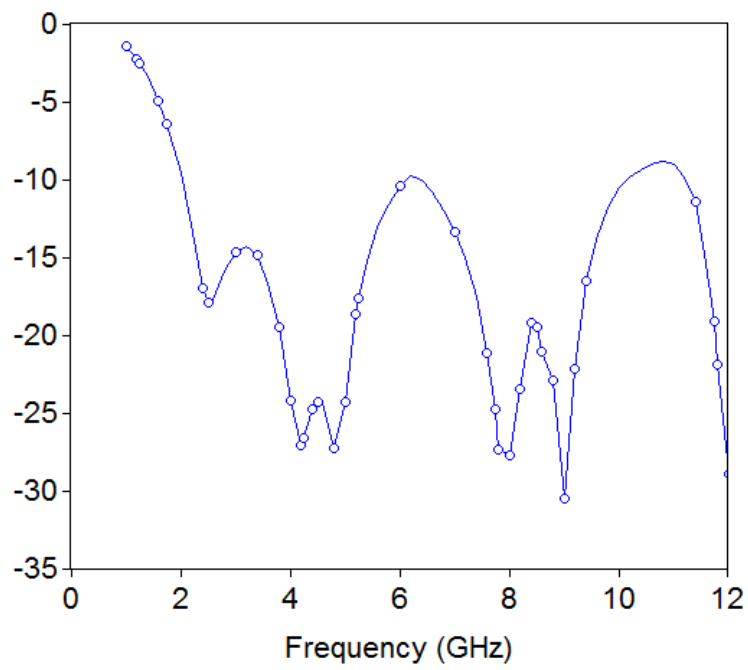
Για την κατασκευή της κεραίας λάβαμε υπόψην το πλάτος W_1 να είναι πάντα 3mm, ώστε να υπάρχει προσαρμογή μεταξύ πηγής και κεραίας. Για το groundplane διαλέξαμε διαστάσεις $L=20$ mm και $W=40$ mm ώστε να είναι συγκρίσιμες με το μέγεθος του ακτινοβολητή.

Θέλουμε η πρώτη συχνότητα συντονισμού να είναι στα 2.5 GHz και αυτό μπορούμε να το υπολογίσουμε προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση $d=\lambda/4$. Άρα η διάμετρος του κυκλικού δίσκου αναμένεται να καθορίσει την πρώτη συχνότητα συντονισμού και στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει να είναι $d=30$ mm.

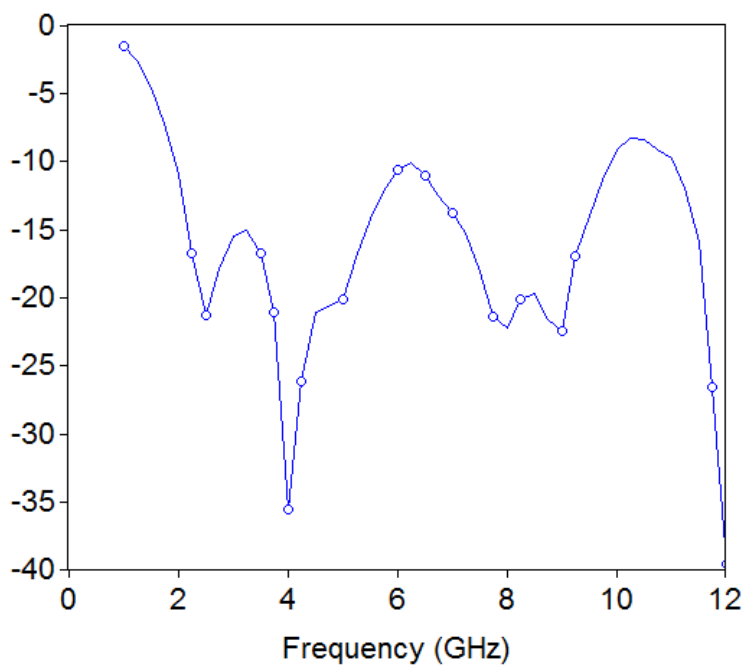
Στη συνέχεια ακολουθούν διάφορες προσομοιώσεις για να δούμε πώς επηρεάζει το ύψος h την απόδοση της κεραίας.

Διερεύνηση για αλλαγή στο μήκος h

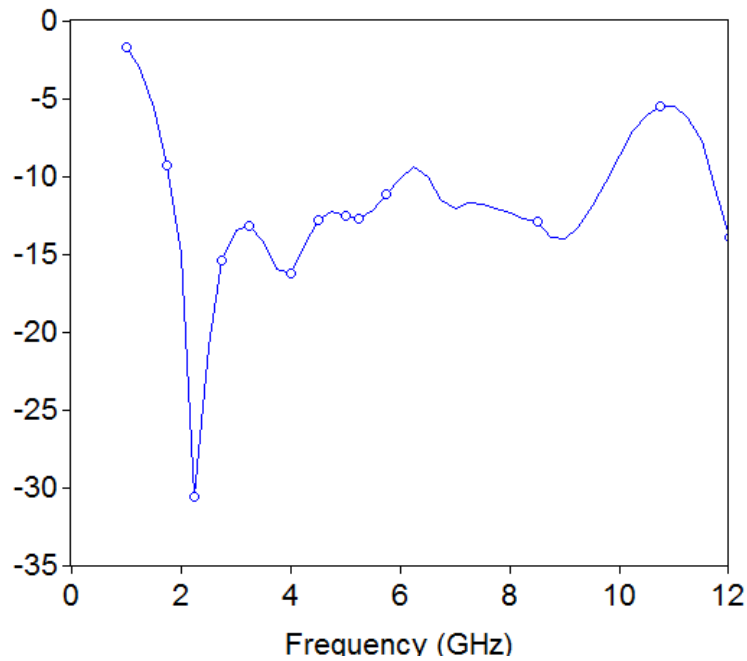
Έγιναν προσομοιώσεις για μήκη διακένου $h=0, 0.5$ και 1.5 mm. Ακολουθούν τα διαγράμματα S_{11} για τα αντίστοιχα μήκη:



Σχήμα 2. Διάγραμμα για $h=0$ mm



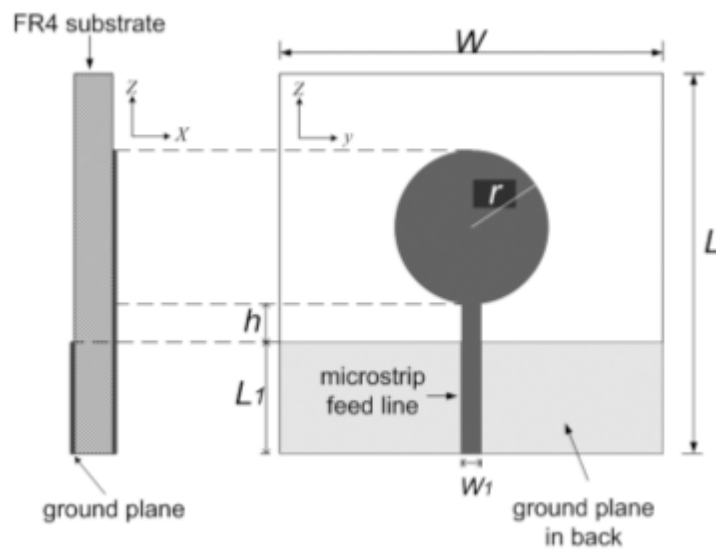
Σχήμα 3. Διάγραμμα για $h=0.5$ mm



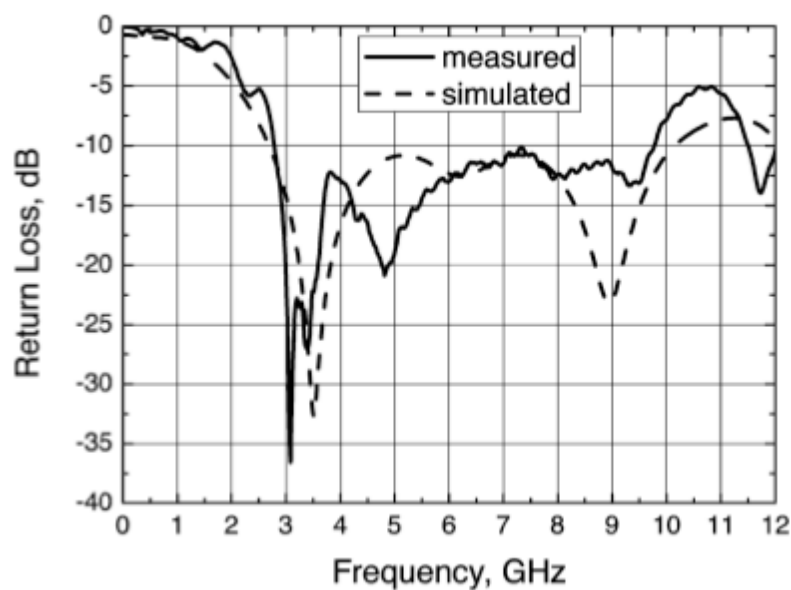
Σχήμα 4. Διάγραμμα για $h=1.5$ mm

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το μήκος διακένου h , η συχνότητα του πρώτου συντονισμού παρατηρείται σε όλο και μικρότερη συχνότητα, ακόμα και αν η διαφορά δεν είναι τόσο μεγάλη. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το h μειώνεται η περιοχή συχνοτήτων, όπου οι απώλειες επιστροφής είναι μεγαλύτερες από -10 dB, δηλαδή μειώνεται η περιοχή λειτουργίας της κεραίας. Συνεπώς, για χρήση της κεραίας στην υπερευρεία ζώνη το μήκος h πρέπει να είναι αρκετά μικρό, όχι όμως μηδενικό, καθότι για $h=0$ μπορεί να έχουμε την επιθυμητή συχνότητα πρώτου συντονισμού, η κυματομορφή όμως δεν είναι αυτή που θα επιθυμούσαμε.

Η ανάλυση της συγκεκριμένης κεραίας δημοσιεύτηκε το 2005 [1]. Η γεωμετρία της κεραίας, καθώς και το διάγραμμα S_{11} από την προσομοίωση αλλά και από μέτρηση της κατασκευής φαίνονται στις εικόνες παρακάτω.



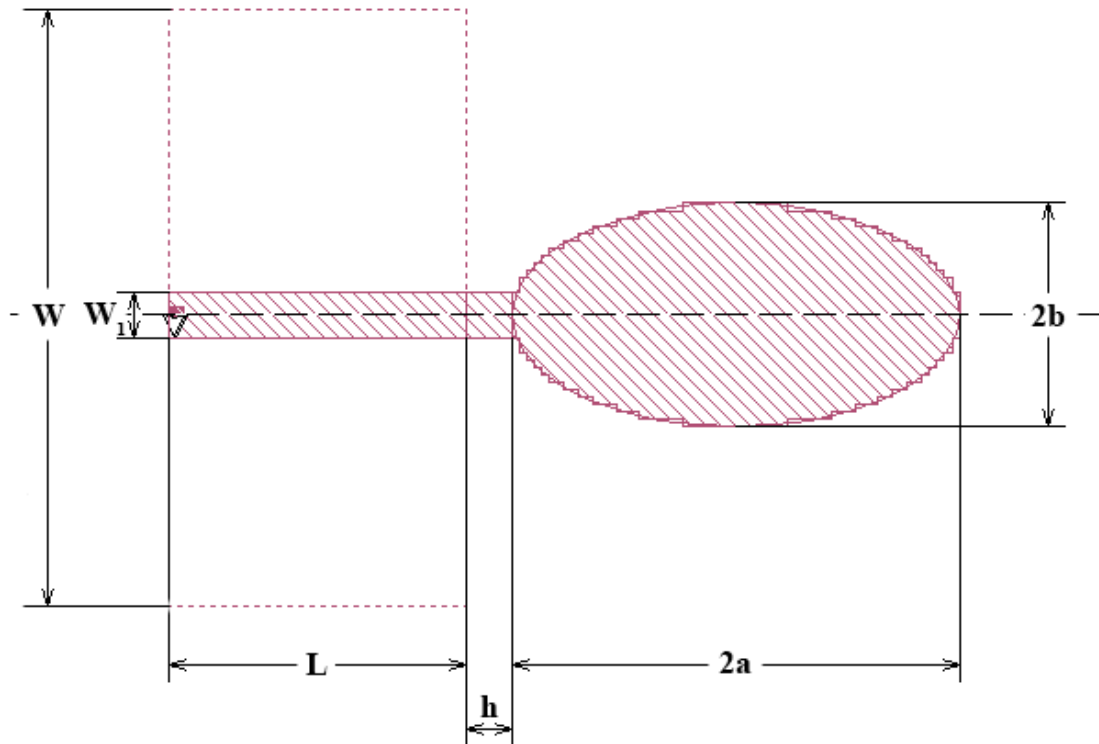
Σχήμα 5. Η γεωμετρία της κεραίας κυκλικού μονοπόλου.



Σχήμα 6. Διάγραμμα απωλειών επιστροφής κεραίας κυκλικού μονοπόλου [1].

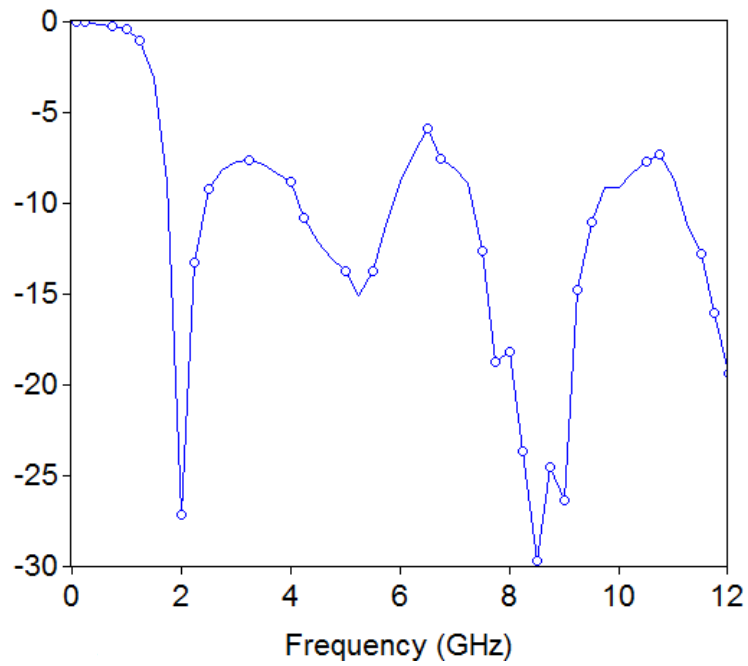
Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα που πήραμε από τις δικές μας προσομοιώσεις δεν απέχουν και τόσο πολύ από το διάγραμμα της κατασκευασμένης κεραίας, λαμβάνοντας υπόψη και τα διαφορετικά μεγέθη της κατασκευασμένης κεραίας σε σχέση με τα δικά μας επιλεγμένα για τις προσομοιώσεις, και συνεπώς μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι και οι δικές μας προσομοιώσεις είναι πολύ κοντά σε μια ρεαλιστική κατασκευή.

3.2 Επίπεδο ελλειπτικό μονόπολο

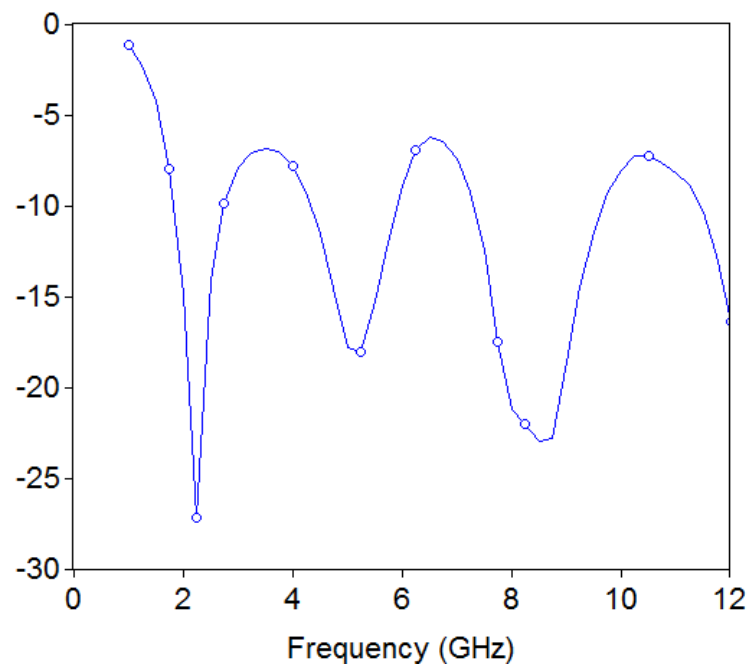


Σχήμα 7. Η γεωμετρίαεπίπεδου ελλειπτικού μονόπολου (άνω όψη) .

Το επίπεδο ελλειπτικό μονόπολο μπορούμε να το θεωρήσουμε σαν μια παραλλαγή του επίπεδου κυκλικού μονόπολου. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση όπως και στις υπόλοιπες επίπεδες κεραίες. Αναμένεται το μήκος $2a$ να είναι αυτό που καθορίζει τη συχνότητα του πρώτου συντονισμού. Οπότε, εφόσον θέλουμε η κεραία να εμφανίζει συχνότητα πρώτου συντονισμού στα 2.5 GHz και σύμφωνα με τις προσομοιώσεις του κυκλικού μονόπολου θέλουμε το μήκος $2a$ να είναι ίσο με 30 mm. Κάνουμε δύο διερευνήσεις για μήκος διακένου $h=0$ και 0.5 mm. Τις διαστάσεις του επιπέδου γείωσης τις κρατάμε σταθερές με τις αντίστοιχες του κυκλικού μονόπολου, δηλαδή $W=40$ mm και $L=20$ mm.



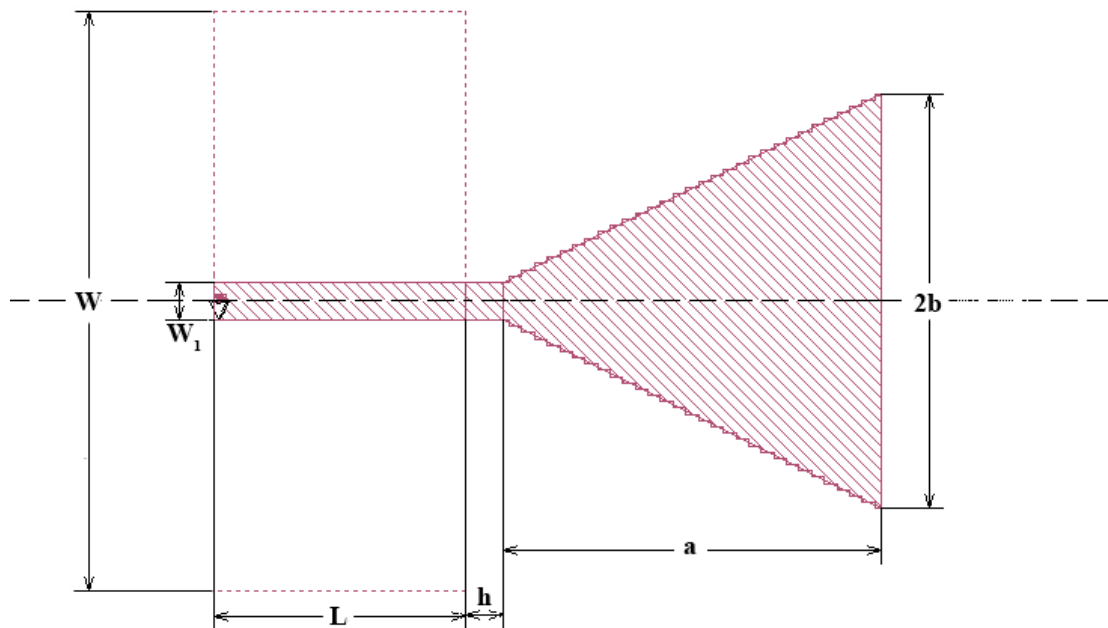
Σχήμα 8. Διάγραμμα S_{11} για $h=0$ mm



Σχήμα 9. Διάγραμμα S_{11} για $h=0.5$ mm

Παρατηρούμε ότι για $h=0.5$ mm το σχεδιάγραμμα είναι πιο επιθυμητό σε σχέση με το αντίστοιχο όπου $h=0$ mm και κατά συνέπεια μπορούμε πάλι να συμπεράνουμε ότι το μήκος διακένου h ιδανικά πρέπει να είναι πολύ μικρό και όχι μηδενικό, ώστε να έχουμε την επιθυμητή κυματομορφή.

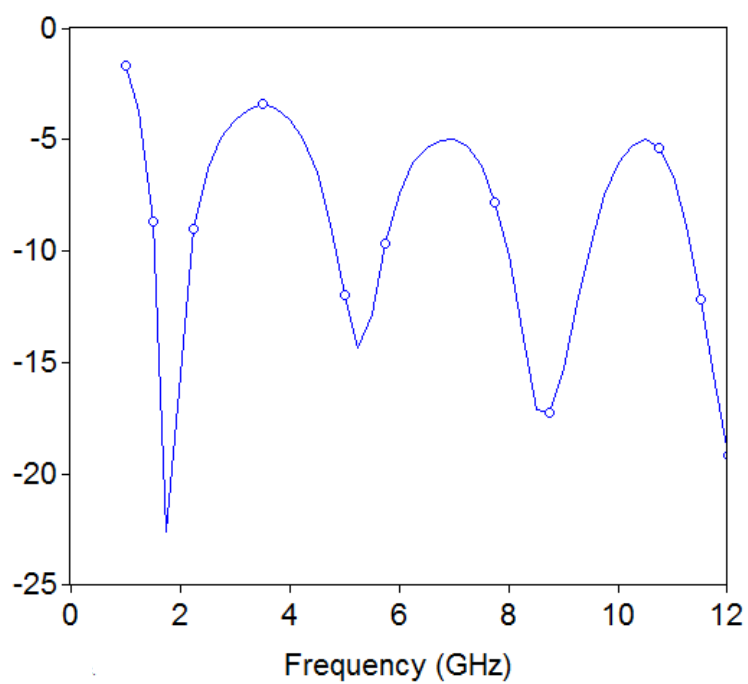
3.3 Επίπεδο τριγωνικό μονόπολο



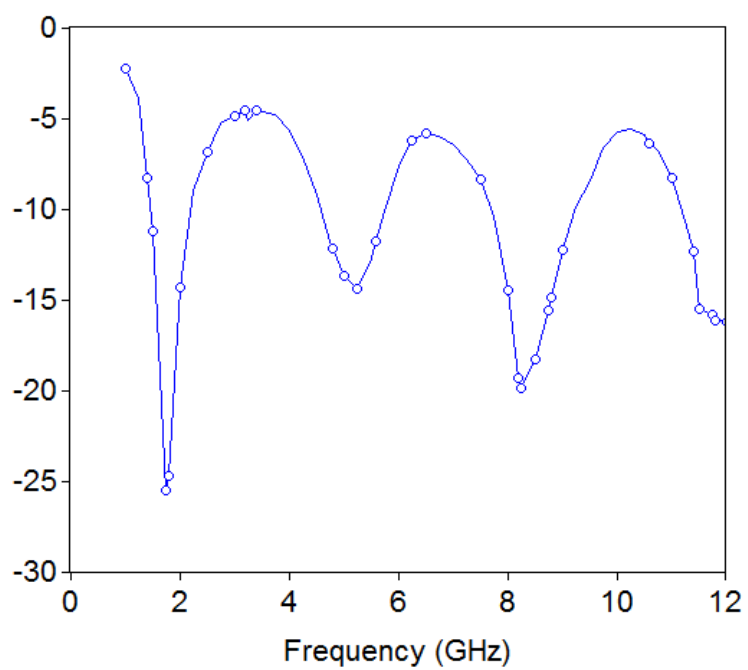
Σχήμα 10. Η γεωμετρίαεπίπεδου τριγωνικού μονόπολου (άνω όψη) .

Η κεραία σχεδιάζεται ανάλογα και με τις προαναφερθέντες επίπεδες κεραίες. Το πλάτος W_1 και εδώ επιλέγεται να είναι ίσο με 3 mm, ώστε να υπάρχει προσαρμογή μεταξύ της πηγής και της γραμμής μεταφοράς. Το μήκος διακένου h επιλέγεται στα 0.5 mm, πμή που όπως είδαμε και προηγουμένως δίνει συχνότητα πρώτου συντονισμού σχεδόν ίση με τη θεωρητική και δεν αλλοιώνει πολύ το διάγραμμα απωλειών επιστροφής. Το μήκος a επιλέγεται στα 30 mm, έτσι ώστε η πρώτη συχνότητα συντονισμού να είναι γύρω στα 2.5 GHz. Το μήκος $2b$ δεν αναμένεται να επηρεάζει την πρώτη συχνότητα συντονισμού, αλλά το εύρος ζώνης. Οι διαστάσεις του groundplane επιλέγονται $W=46$ mm και $L=20$ mm. Ακολουθούν οι προσομοιώσεις για κάθε διάσταση ξεχωριστά.

Διερεύνηση για μεταβολή στην τιμή του πλάτους $2b$

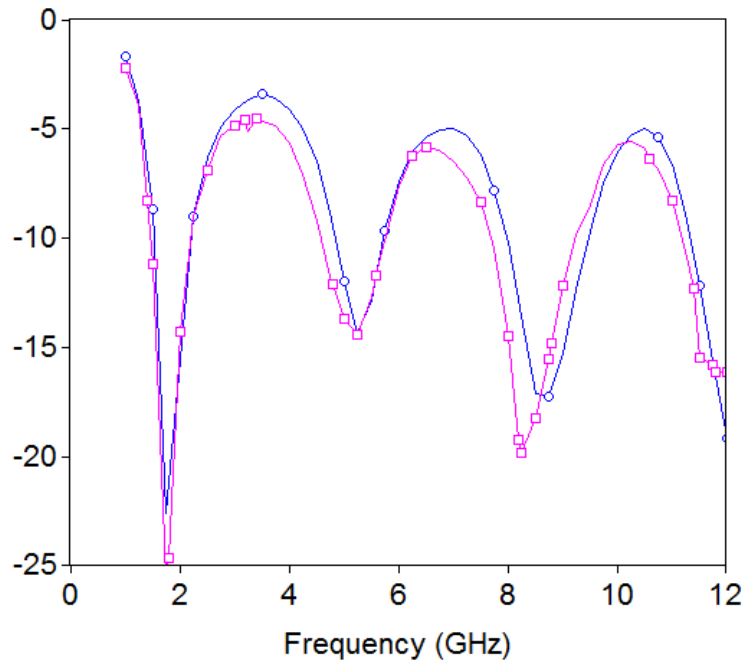


Σχήμα 11. Διάγραμμα S_{11} για $2b=12$ mm



Σχήμα 12. Διάγραμμα S_{11} για $2b=29$ mm

Παρατηρούμε ότι η συχνότητα πρώτου συντονισμού δεν είναι ακριβώς στα 2.5 GHz και άρα το μήκος a δεν ακολουθεί πιστά τη σχέση $a=\lambda/4$ όπως στις άλλες κεραίες. Επίσης παρατηρούμε ότι με αύξηση του $2b$ πλησιάζουν οι υπόλοιπες συχνότητες συντονισμού προς τη συχνότητα πρώτου συντονισμού, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχεδιάγραμμα



Σχήμα 13. S_{11} για $2b=12, 29$ mm

3.4 Συμπεράσματα

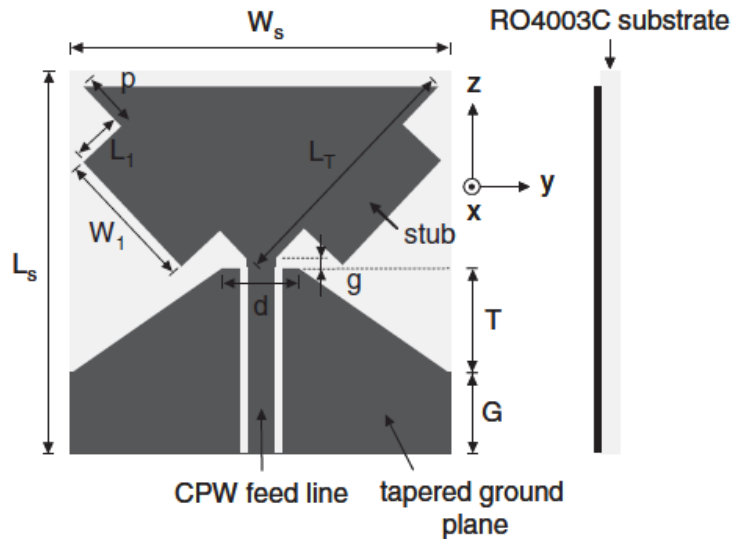
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που έγιναν για τρεις επίπεδες κεραίες. Ως θύρα διέγερσης επιλέχτηκε η Via port. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση κάποιων συγκεκριμένων διαστάσεων στο συντελεστή ανάκλασης της κεραίας. Τα αποτελέσματα μιας εξ αυτών επαληθεύτηκαν με τα αντίστοιχα, τα δημοσιευμένα στη βιβλιογραφία. Παρατηρήθηκε πολύ καλή ταύτιση.

4. Συμπαγείς κεραίες υπερευρείας ζώνης

4.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία των κεραιών υπερευρείας ζώνης έχει αποσπάσει την προσοχή των επιστημόνων τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της ικανότητας που προσφέρει για υψηλό ρυθμό στην επικοινωνία δεδομένων και της χαμηλής απαιτούμενης ενέργειας εκπομπής για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές κυρίως μικρού μεγέθους όπως αυτή της ασύρματης δικτύωσης WLAN(wireless personal area network) [2]. Η πρόκληση σε ένα τέτοιο σύστημα είναι ο σχεδιασμός μιας κεραίας μικρού μεγέθους, με μεγάλο εύρος λειτουργίας (3.1–10.6 GHz), με παγκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας, καθώς και με μικρή διακύμανση της καθυστέρησης ομάδας. Συνήθως, προς την κατεύθυνση αυτή, χρησιμοποιούνται επίπεδες μονοπολικές κεραίες εξαιτίας του χαμηλού κόστους και της εύκολης κατασκευής τους, του μικρού βάρους τους, και της εγγενούς παγκατευθυντικής ακτινοβολίας τους [3]. Συγκεκριμένα, περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κεραίες μονοπόλων που τροφοδοτούνται από ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς, αφενός μεν γιατί η όλη διάταξη βρίσκεται στην ίδια πλευρά του διηλεκτρικού υποστρώματος (ομοεπίπεδη δομή) καθιστώντας την κατασκευή της ακόμη πιο εύκολη, αφετέρου λόγω της εύκολης συνεργασίας και συνδεσμολογίας της με άλλες μικροκυματικές δομές [4, 5]. Πολλές είναι οι εργασίες που στόχο έχουν την αύξηση του συχνοτικού εύρους λειτουργίας μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού της γεωμετρίας τόσο του ακτινοβολούντος στοιχείου όσο και της τροφοδοσίας [4–9]. Παρόλα αυτά, οι προκύπτουσες δομές έχουν σχετικά μεγάλο μέγεθος [4, 6–9]. Επιπλέον, σε πολλές εργασίες με ομοεπίπεδες κεραίες δεν παρουσιάζονται τα διαγράμματα της καθυστέρησης ομάδας [4, 5, 8, 9].

Το 2005 ο C.-C. Lin και οι συνεργάτες του προτείνουν μία κεραία μονοπόλου, τριγωνικού σχήματος, η οποία παρουσιάζει όμως στενό εύρος ζώνης λειτουργίας [9]. Παρόλα αυτά, είναι δυνατόν να επιτευχτεί καλή προσαρμογή σε μία ευρεία ζώνη συχνοτήτων αφενός με προσθήκη κατάλληλων ακτινοβολούντων τμημάτων στο τριγωνικό μονόπολο, αφετέρου με την τροποποίηση της γραμμής μικροταινίας. Προς την κατεύθυνση αυτή, το 2009, ο SungTaeChoi και οι συνεργάτες του, παρουσίασαν μια καινούργια γεωμετρία κεραίας υπερευρείας ζώνης τύπου τριγωνικού μονοπόλου η οποία τροφοδοτείται με ομοεπίπεδη γραμμή μικροταινίας. Η όλη διάταξη έχει μικρό σχετικά μέγεθος (30×32 mm), μεγάλο εύρος λειτουργίας (2.9–13.2 GHz) και μικρή μεταβολή της ταχύτητας ομάδας [11]. Η κεραία αυτή θα μελετηθεί στις παραγράφους που ακολουθούν. Αναλυτικά, θα υπολογιστούν ο συντελεστής ανάκλασης, το διάγραμμα ακτινοβολίας, και η καθυστέρηση ομάδας για όλη την περιοχή λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα θα επαληθευτούν με τα δημοσιευμένα αποτελέσματα. Οι υπολογισμοί θα γίνουν με τη βοήθεια κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που έχει αναπτυχτεί στο Εργαστήριο Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών και Υπολογισμών του τομέα Τηλεπικοινωνιών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών της Πολυτεχνικής σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 1. Η προτεινόμενη νέα γεωμετρία της κεραίας. Οι αρχικές διαστάσεις είναι: $L_T = 19.5$ mm, $g = 0.13$ mm, $W_1 = 10$ mm, $L_1 = 3$ mm, $p = 5.5$ mm, $d = 7$ mm, $T = 7.5$ mm, and $G = 11$ mm.

4.2 Περιγραφή της κεραίας

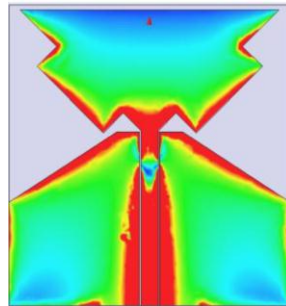
Η προτεινόμενη κεραία απεικονίζεται στο Σχ. 1. Το ακτινοβολούν στοιχείο αποτελείται από ένα τριγωνικό τμήμα στο οποίο είναι προσαρμοσμένα συμμετρικά του, δύο παραλληλόγραμμα τμήματα. Η ομοεπίπεδη γραμμή μικροταινίας τερματίζει σε τραπεζοειδή διάταξη ενώ η αντίσταση εισόδου της γραμμής είναι ίση με 50Ω . Η όλη γεωμετρία εδράζεται στο χαμηλού κόστους διηλεκτρικό Rogers RO4003C, με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 3.38$, ύψος 0.813 mm και διαστάσεις 30×32 mm ($W_s \times L_s$). Η γραμμή μικροταινίας 50Ω έχεις πλάτος $w_0 = 1.86$ mm και απέχει $d_0 = 0.15$ mm από την υπόλοιπη ομοεπίπεδη διάταξη. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει γείωση στην άλλη όψη του διηλεκτρικού υποστρώματος ενώ είναι εύκολη η συνεργασία της με άλλες μικροκυματικές δομές. Οι αρχικές διαστάσεις της κεραίας [10] είναι: $L_T = 19.5$ mm, $g = 0.13$ mm, $W_1 = 10$ mm, $L_1 = 3$ mm, $p = 5.5$ mm, $d = 7$ mm, $T = 7.5$ mm, και $G = 11$ mm.

4.3 Απόδοση της κεραίας

Αρχικά η κεραία προσομοιώνεται ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής ανάκλασης της. Στην αρχή πραγματοποιείται διερεύνηση του ρυθμού που διεγείρεται στην είσοδο της κεραίας, στη γραμμή μικροταινίας. Επειδή οι διαστάσεις της κεραίας είναι συγκρίσιμες με αυτές του κόνεκτορα SMA που τροφοδοτεί την κεραία μέσω της ομοεπίπεδης γραμμής μικροταινίας, στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη και η γεωμετρία αυτού. Στη συνέχεια ο τρισδιάστατος χώρος διακριτοποιείται σε τετράεδρα δεύτερης τάξης μέσω επαναληπτικής διαδικασίας. Τέλος ο χώρος τερματίζεται σε τέλειες απορροφητικές συνθήκες (perfect matched layer, PML). Το συνολικό

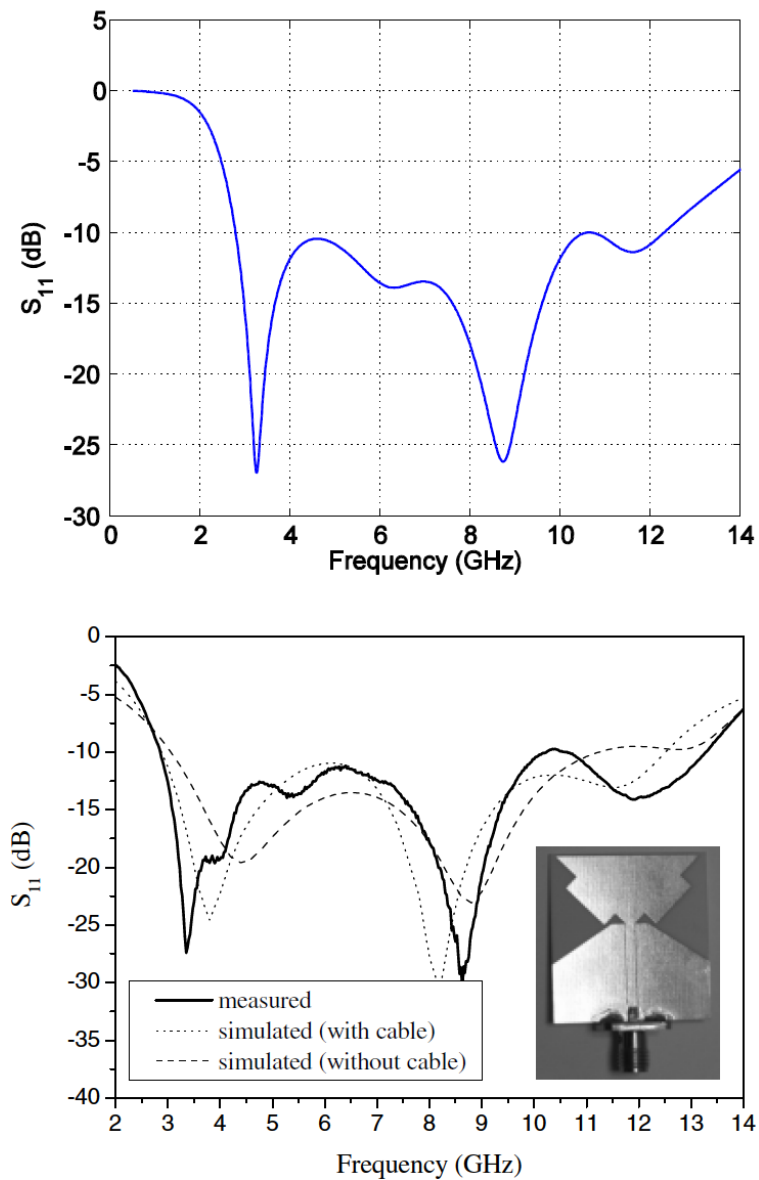
πρόβλημα ανάγεται σε περίπου 300.000 βαθμούς ελευθερίας και επιλέγεται μη επαναληπτικός επιλυτής (directsolver).

Είναι γνωστό ότι η μικρότερη συχνότητα λειτουργίας επηρεάζεται από το μήκος της τροχιάς του επιφανειακού ρεύματος που παρουσιάζεται στη κεραία, και μάλιστα η σχέση τους είναι αντιστρόφως ανάλογη. Στο Σχ. 2 απεικονίζεται η επιφανειακή ρευματική κατανομή της κεραίας, για τη συχνότητα των 3.8 GHz. Είναι φανερό ότι το ρεύμα διαρρέει το σύνθετο τριγωνικό μονόπολο και την ομοεπίπεδη γραμμή μικροταινίας. Επίσης παρατηρείται ότι κινείται κυρίως στα κάτω άκρα του μονοπόλου ενώ δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου στο επάνω άκρο. Συνεπώς, η εισαγωγή των παραλληλόγραμμων τμημάτων αυξάνει τη τροχιά του ρεύματος άρα μειώνει την ελάχιστη συχνότητα λειτουργίας, χωρίς την απαίτηση για αύξηση των φυσικών διαστάσεων της κεραίας, γεγονός που οδηγεί στο συμπαγές μέγεθος της κεραίας.

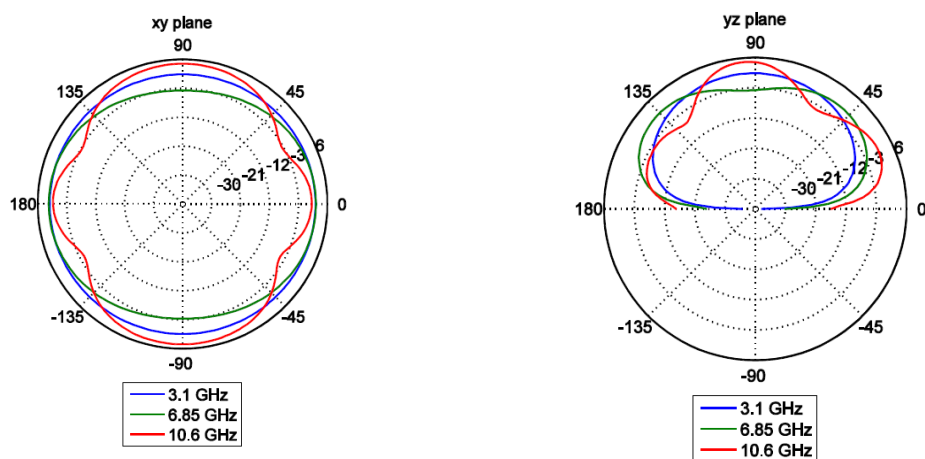


Σχήμα 2. Η ρευματική κατανομή για τη συχνότητα των 3.8 GHz. Παρατηρείται ότι η εισαγωγή των παραλληλόγραμμων τμημάτων αυξάνει τη τροχιά του ρεύματος άρα μειώνει την ελάχιστη συχνότητα λειτουργίας.

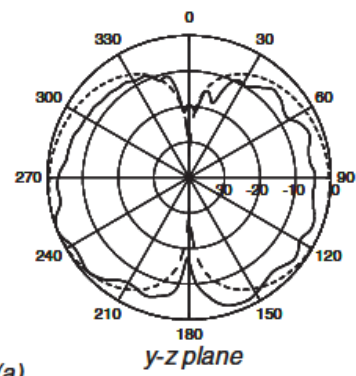
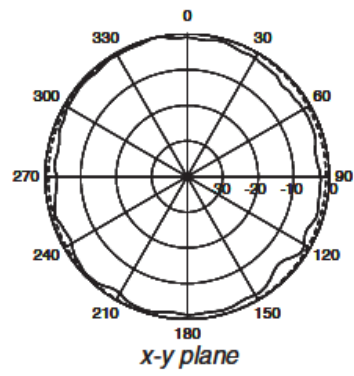
Στο Σχ. 3 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης όπως αυτός υπολογίστηκε καθώς και τα αποτελέσματα που δημοσιεύθηκαν στο [10]. Η κεραία λειτουργεί, δηλαδή ο συντελεστής S_{11} είναι μικρότερος από -10 dB, για συχνότητες από 2.8 GHz έως 12.4 GHz. Διαπιστώνεται καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων (σύγκριση με εκείνα της προσομοίωσης). Επίσης γίνεται διερεύνηση του μακρινού πεδίου της κεραίας μέσω του κέρδους. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχ. 4 ενώ το Σχ. 5 παρουσιάζει τα αντίστοιχα δημοσιευμένα για σύγκριση. Είναι εμφανές ότι και πάλι η ταύτιση είναι ικανοποιητική. Τέλος στο Σχ. 6 παρουσιάζεται η καθυστέρηση ομάδας. Ο υπολογισμός της βασίστηκε μέσω του υπολογισμού του συντελεστή διάδοσης, S_{21} , ανάμεσα σε δύο πανομοιότυπες κεραίες και προέκυψε από την παραγωγή της φάσης του S_{21} , ενώ στο Σχ. 7 παρουσιάζεται η καθυστέρηση ομάδας όπως αυτή μετρήθηκε και δημοσιεύτηκε. Συγκρινόμενα τα αποτελέσματα, αν και ελαφρώς διαφοροποιημένα κυρίως λόγω του διαφορετικού τρόπου με τον οποίο προέκυψαν, παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, αφού και στην δύο περιπτώσεις παρατηρείται ανεκτή διακύμανση στο εύρος λειτουργίας από τα 3.1 GHz έως 10.6 GHz.



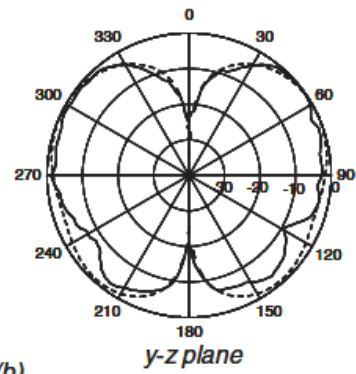
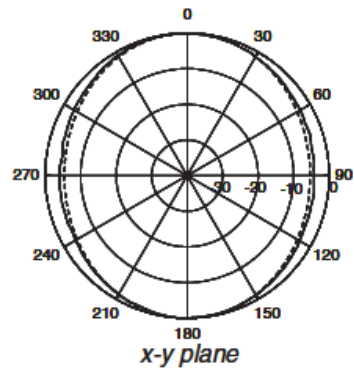
Σχήμα 3. Ο συντελεστής ανάκλασης όπως υπολογίστηκε (πάνω) και όπως παρουσιάστηκε στη [11] (κάτω). Παρατηρείται καλή ταύπιση των αποτελεσμάτων.



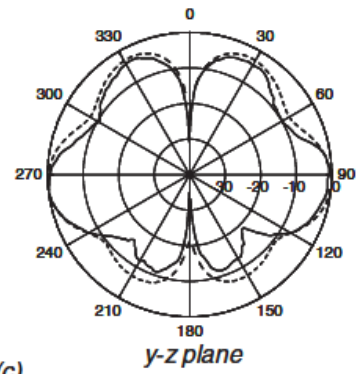
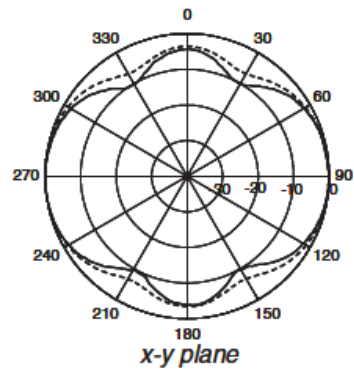
Σχήμα 4. Το μακρινό πεδίο (κέρδος) της κεραίας όπως αυτό υπολογίστηκε για τα διάφορα επίπεδα και συχνότητες.



(a)

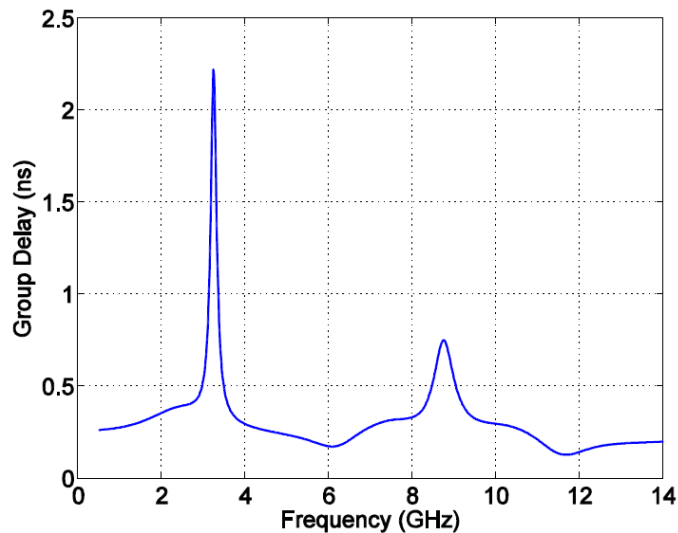


(b)

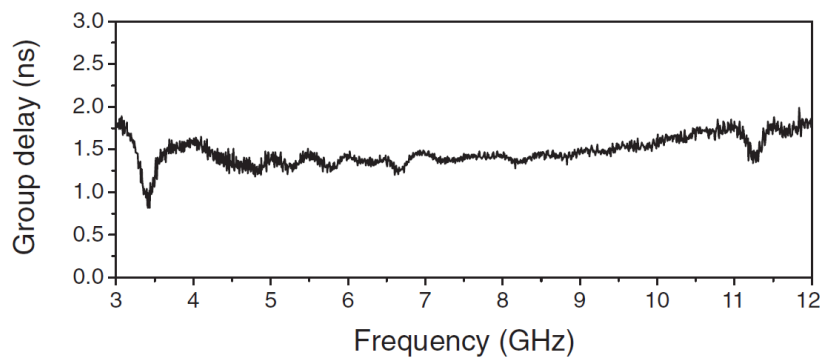


(c)

Σχήμα 5. Το μακρινό πεδίο (κέρδος) της κεραίας όπως αυτό παρουσιάστηκε [11] για τα διάφορα επίπεδα και συχνότητες (3.1 GHz, 6.85 GHz, 10.6 GHz).



Σχήμα 6. Η καθυστέρηση ομάδας για το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας όπως υπολογίστηκε.



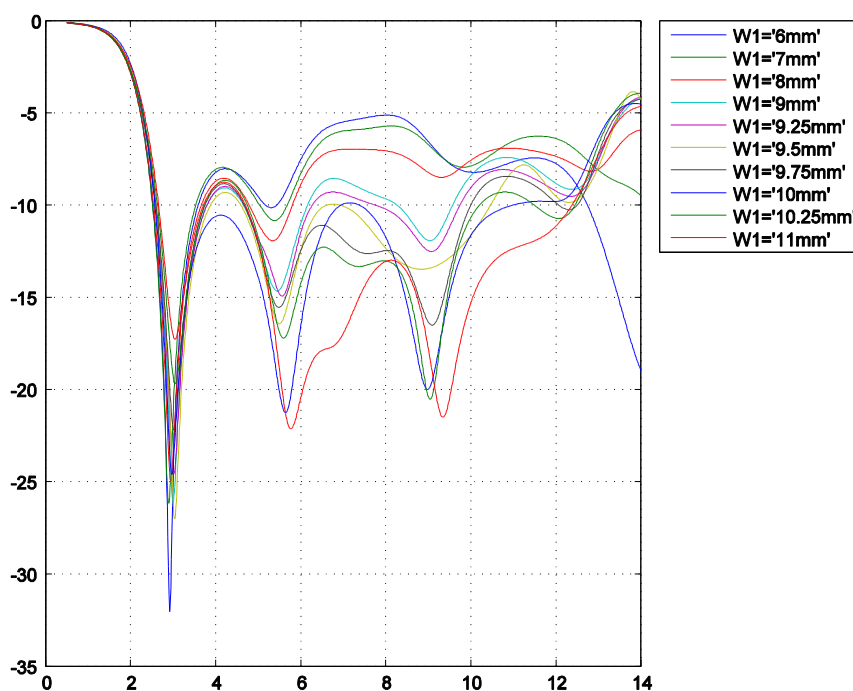
Σχήμα 7. Η καθυστέρηση ομάδας για το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας όπως παρουσιάστηκε στη [11].

4.4 Τροποποίηση της κεραίας

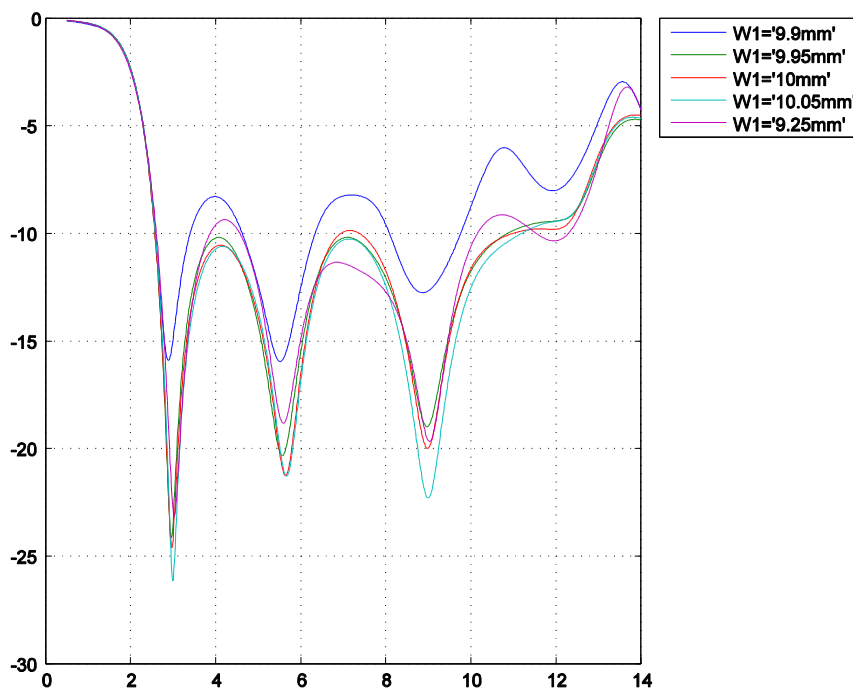
Στη συνέχεια η κεραία τροποποιείται ώστε το διηλεκτρικό υπόστρωμα να είναι FR-4 με χαρακτηριστικά: διηλεκτρική σταθερά, $\epsilon_r = 4.4$, εφασπτομένη απωλειών, $\tan\delta = 0.025$, και ύψος 1.5 mm. Επιπλέον απαίτηση είναι η μικρότερη διάσταση να μην είναι κάτω από 0.3 mm, όριο που επιβάλλεται από την αναλυτικότητα της τεχνικής κατασκευής. Επίσης, αρχικό ζητούμενο είναι η αντίσταση εισόδου που παρουσιάζει η ομοεπίπεδη γραμμή μικροταινίας να είναι και πάλι 50 Ω. Η πρώτη επιλογή ήταν να πολλαπλασιαστεί το πλάτος w_0 της μικροταινίας, καθώς και όλες οι διαστάσεις με κατάλληλο συντελεστή, τον $(\epsilon_r'/\epsilon_r)^{1/2} = (4.4/3.38)^{1/2}$, και να υπολογιστεί εκ νέου η απόσταση d_0 ώστε η αντίσταση να είναι 50 Ω. Με βάση αυτή τη μέθοδο

προκύπτει $w_0 = 2.12 \text{ mm}$ και $d_0 = 0.23 \text{ mm}$, συνδυασμός μη αποδεκτός λόγω των απαιτήσεων. Οπότε ακολουθήθηκε άλλη τακτική. Επιλέχθηκε η απόσταση $d_0 = 0.33 \text{ mm}$ από όπου τελικά προέκυψε $w_0 = 3.5 \text{ mm}$. Οι υπόλοιπες διαστάσεις παρέμειναν ως είχαν.

Η διαδικασία της προσομοίωσης είναι παρόμοια με την προηγούμενη. Το συνολικό πρόβλημα ανάγεται σε περίπου 250.000 βαθμούς ελευθερίας (η μείωση οφείλεται στο ότι αυξήθηκε η μικρότερη απόσταση της διάταξης, d_0 , από 0.15 mm σε 0.33 mm). Είναι λογικό η συμπεριφορά της κεραίας να τροποποιηθεί. Στο Σχ. 8 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης της κεραίας καθώς η $W1$ σαρώνει τις τιμές 6–11 mm.



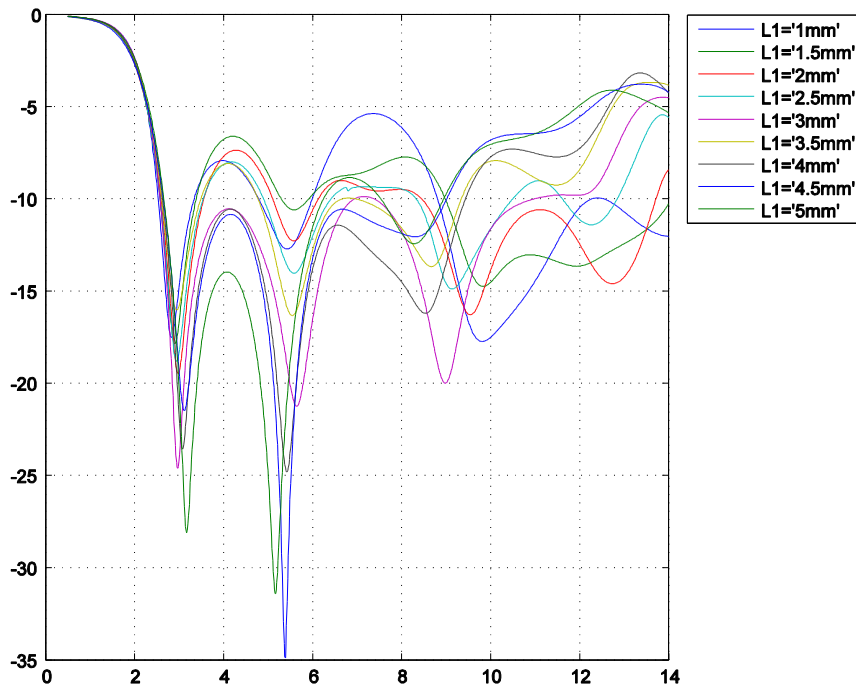
Σχήμα 8. Ο συντελεστής ανάκλασης της τροποποιημένης κεραίας με $W1$ από 6–11 mm. Η καλύτερη απόδοση πραγματοποιείται για $W1 = 10 \text{ mm}$, χωρίς όμως και πάλι το εύρος λειτουργίας να εκτείνεται από 3.1 – 10.6 GHz.



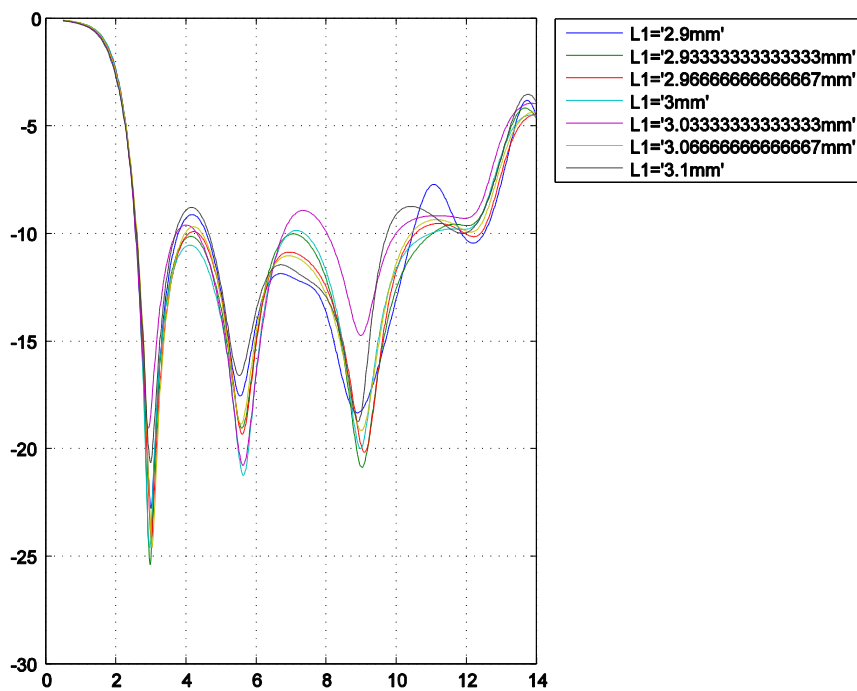
Σχήμα 9. Ο συντελεστής ανάκλασης της τροποποιημένης κεραίας με $W1$ από 9.9–10.05 mm με μικρότερο βήμα αυτή τη φορά. Η καλύτερη απόδοση πραγματοποιείται για $W1 = 10.05$ mm.

Από το Σχ. 8 διαπιστώνεται ότι η κεραία λειτουργεί καλύτερα όταν $W1 = 10$ mm, χωρίς όμως το εύρος λειτουργίας να εκτείνεται από 3.1 – 10.6 GHz, αφού το μέτρο του $S_{11} > -10$ dB στα 7.14 GHz. Στη συνέχεια πραγματοποιείται και νέα σάρωση για το $W1$ με πμές αυτή τη φορά πολύ κοντά στα 10 mm. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχ. 9. Αυτή τη φορά παρατηρείται ότι για $W1 = 10.05$ mm η κεραία λειτουργεί από 2.57–11.22 GHz (περίπου 4.37:1). Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για τη διάσταση $L1$. Τα αποτελέσματα για το συντελεστή ανάκλασης παρουσιάζονται στο Σχ. 11. Παρατηρείται ότι η κεραία λειτουργεί καλύτερα όταν $L1 = 3$ mm, χωρίς όμως το εύρος λειτουργίας να εκτείνεται από 3.1 – 10.6 GHz, αφού το μέτρο του $S_{11} > -10$ dB στα 7.18 GHz. Στη συνέχεια πραγματοποιείται και νέα σάρωση για το $L1$ με πμές αυτή τη φορά πολύ κοντά στα 3 mm. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχ. 12. Αυτή τη φορά παρατηρείται ότι για $L1 = 2.93$ mm η κεραία λειτουργεί από 2.57–11.1 GHz (περίπου 4.32:1). Τέλος με παρόμοια διαδικασία για τη διάσταση p διαπιστώνεται ότι η κεραία λειτουργεί καλύτερα κοντά στα 3.5 mm και συγκεκριμένα για $p = 3.542$ mm με εύρος 2.59–10.85 GHz (περίπου 4.18:1), (Σχ. 13). Συγκεντρωτικά, ο συντελεστής ανάκλασης για τις βέλτιστες πμές $W1 = 10.05$ mm, $L1 = 2.93$ mm και $p = 3.542$ mm, απεικονίζονται στο Σχ. 14.

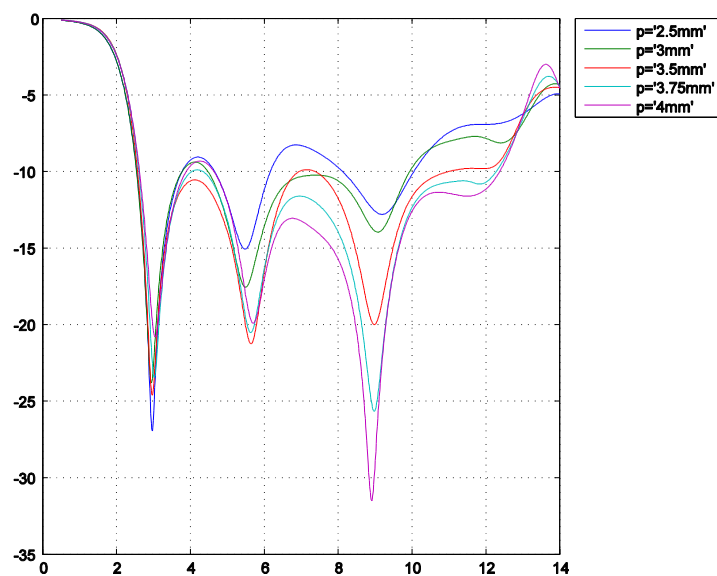
Συνοψίζοντας λοιπόν, είναι φανερό ότι καλύτερη απόδοση παρατηρείται όταν $W1 = 10.05 \text{ mm}$ όπου ο λόγος λειτουργίας είναι 4.37:1. Για την περίπτωση αυτή υπολογίζεται το μακρινό πεδίο της κεραίας για το οριζόντιο (xy) και κάθετο επίπεδο (yz) στις συχνότητες 3.1 GHz, 6.85 GHz, 10.6 GHz. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχ. 15. Παρατηρείται ότι το οριζόντιο διάγραμμα είναι ιστροπικό, χαρακτηριστικό που υπήρξε ζητούμενο. Τέλος, στο Σχ. 16 παρουσιάζεται η καθυστέρηση ομάδας και διαπιστώνεται ανεκτή διακύμανση στο εύρος λειτουργίας από τα 3.1 GHz έως 10.6 GHz, πολύ μικρότερη από το όριο των 9.5 ns.



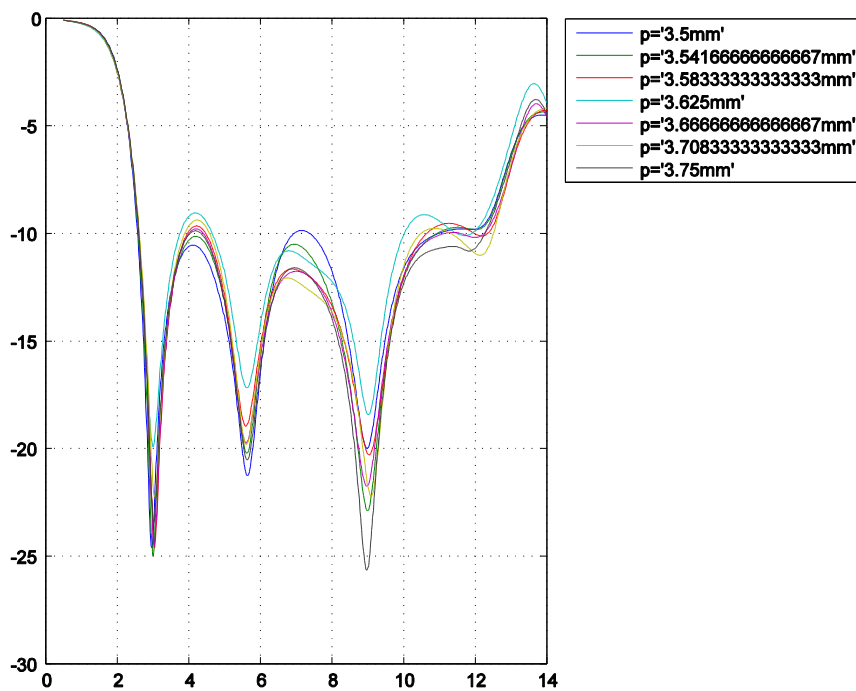
Σχήμα 10. Ο συντελεστής ανάκλασης της τροποποιημένης κεραίας με $L1$ από 1–5 mm. Η καλύτερη απόδοση πραγματοποιείται για $L1 = 3 \text{ mm}$, χωρίς όμως και πάλι το εύρος λειτουργίας να εκτείνεται από 3.1 – 10.6 GHz.



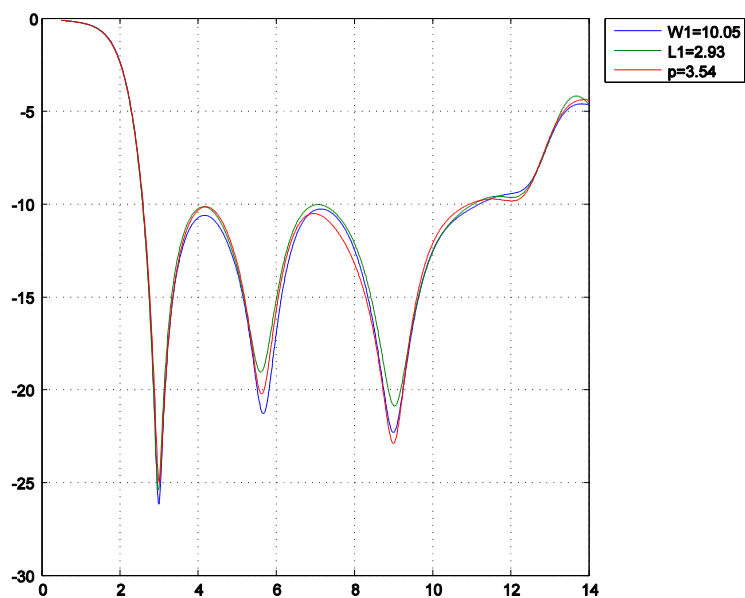
Σχήμα 11. Ο συντελεστής ανάκλασης της τροποποιημένης κεραίας με $L1$ από 2.9–3.1 mm με μικρότερο βήμα αυτή τη φορά. Η καλύτερη απόδοση πραγματοποιείται για $L1 = 2.93\text{ mm}$.



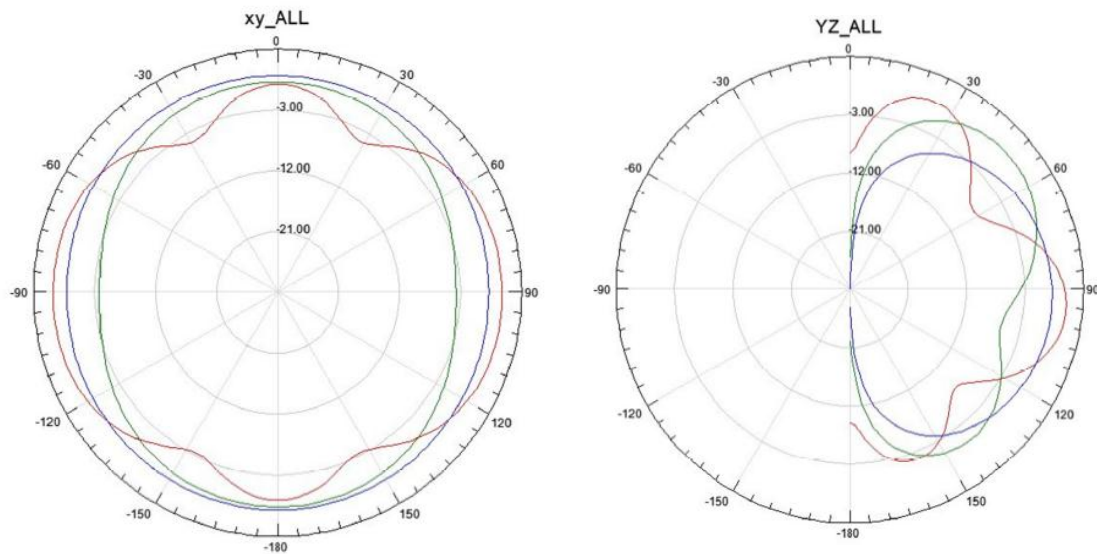
Σχήμα 12. Ο συντελεστής ανάκλασης της τροποποιημένης κεραίας με p από 2.5–4 mm. Η καλύτερη απόδοση πραγματοποιείται για $p = 3.5\text{ mm}$, χωρίς όμως και πάλι το εύρος λειτουργίας να εκτίνεται από 3.1 – 10.6 GHz.



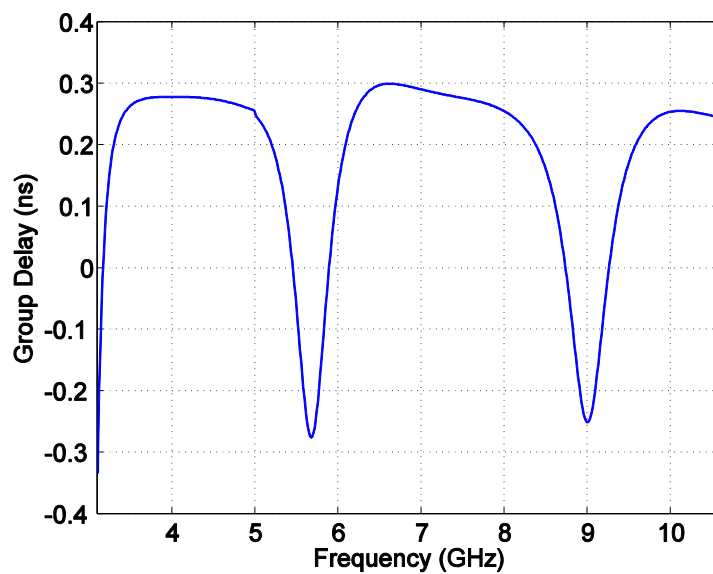
Σχήμα 13. Ο συντελεστής ανάκλασης της τροποποιημένης κεραίας με p από 3.5–3.75 mm με μικρότερο βήμα αυτή τη φορά. Η καλύτερη απόδοση πραγματοποιείται για $p = 3.542$ mm.



Σχήμα 14. Ο συντελεστής ανάκλασης της τροποποιημένης κεραίας για $W1 = 10.05$ mm, $L1 = 2.93$ mm, $p = 3.542$ mm και οι άλλες διαστάσεις ως έχουν. Καλύτερη απόδοση με βάση το λόγο λειτουργίας παρατηρείται για $W1 = 10.05$ mm.



Σχήμα 15. Το μακρινό πεδίο (κέρδος) της κεραίας όπως αυτό υπολογίστηκε για το οριζόνιο και κάθετοεπίπεδο στις συχνότητες 3.1 GHz (μπλε), 6.85 GHz (πράσινο), 10.6 GHz (κόκκινο). Παρατηρείται ισοτροπική για το οριζόνιο επίπεδο.



Σχήμα 16. Η καθυστέρηση ομάδας για το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας όπως υπολογίστηκε. Διαπιστώνεται ανεκτή διακύμανση στο εύρος λειτουργίας από τα 3.1 GHz έως 10.6 GHz, πολύ μικρότερη (0.3 ns) από το όριο των 0.95 ns.

4.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν κάποιες γενικές πληροφορίες για τις κεραίες υπερευρείας ζώνης. Πραγματοποιήθηκε σύντομη έρευνα στη βιβλιογραφία και αναφέρθηκαν οι πιο σύγχρονες εργασίες. Τελικά, επιλέχθηκε προς μελέτη η ελλειπτική κεραία που παρουσιάστηκε στην [11]. Αρχικά η κεραία προσομοιώθηκε και στόχος ήταν η επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Παρατηρήθηκε καλή ταύπιση. Κατόπιν η κεραία τροποποιήθηκε. Συγκεκριμένα άλλαξε το διηλεκτρικό υπόστρωμα σε FR-4. Για να λειτουργήσει η κεραία σχεδιάστηκε με παραμετρική ανάλυση. Τελικά, η προκύπτουσα κεραία φαίνεται να λειτουργεί ικανοποιητικά με λόγο 4.37:1, παρόμοιο με εκείνο της αρχικής. Επίσης από το διάγραμμα ακτινοβολίας διαπιστώνεται ότι η κεραία λειτουργεί ιστροπικά. Τέλος, από το διάγραμμα καθυστέρησης ομάδας διαπιστώνεται ότι η τροποποιημένη κεραία παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση γεγονός που την καθιστά πιο αποδοτική σε σχέση με την αρχική.

5. Κεραίας εξαιρετικά υπερευρείας ζώνης

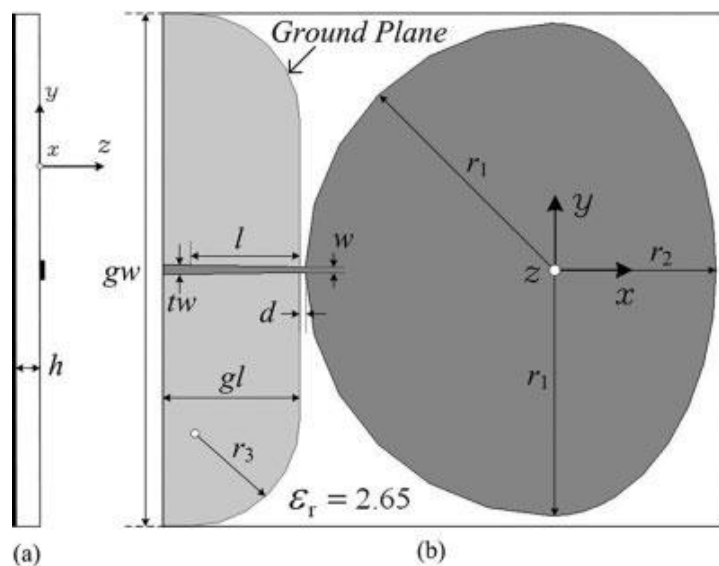
5.1 Εισαγωγή

Οι κεραίες εξαιρετικά υπερευρείας ζώνης (super-wideband, SWB) με λόγο εύρους συχνότητας λειτουργίας μεγαλύτερο από 10:1 αναπτύχθηκαν αρχικά από τον Rumsey και τους συνεργάτες του στα τέλη της δεκαετίας του 1950 [12]. Αρχικά ονομάστηκαν κεραίες ανεξαρτήτου συχνότητας (frequency-independent antennas) και αποτελούνταν από σπειροειδείς ή λογαριθμικά επαναλαμβανόμενες δομές (log-periodic structures). Τον τελευταίο καιρό, η τεχνολογία των SWB κεραιών αποκτά όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον μιας και έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα καναλιών ασύρματης τηλεπικοινωνίας όπως AMPS (829–894 MHz), GSM (880–960 MHz), GPS (1.57–1.58 GHz), WCDMA (1.92–2.17 GHz), και UWB (3.1–10.6 GHz). Αρκετές είναι οι SWB που έχουν προταθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία όπως η κεραία Vivaldi [13], η επίπεδη κεραία ελλειπτικού μονοπόλου [14], η επίσης επίπεδη κεραία ανεστραμμένου κώνου [15], η κεραία κυκλικής σχισμής [16] κ.α. Στην [17] παρουσιάζεται μια συμπαγής κεραία ελλειπτικού μονοπόλου που τροφοδοτείται από μία ομο-επίπεδη γραμμή μικροταινίας η οποία καταλήγει σε τραπεζοειδές σχήμα. Η κεραία επιτυγχάνει λόγο εύρους λειτουργίας 21:1. Το 2009 ο Dong και οι συνεργάτες του, προτείνουν μια επίσης κεραία ελλειπτικού μονοπόλου με λόγο 25:1 [18] και βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Η κεραία αυτή θα μελετηθεί στις παραγράφους που ακολουθούν. Αναλυτικά, θα υπολογιστούν ο συντελεστής ανάκλασης, το διάγραμμα ακτινοβολίας και το μέγιστο κέρδος για όλη την περιοχή λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα θα επαληθευτούν με τα δημοσιευμένα αποτελέσματα. Οι υπολογισμοί θα πραγματοποιηθούν με τη βοήθεια κώδικα πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών και Υπολογισμών του τομέα Τηλεπικοινωνιών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών της Πολυτεχνικής σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

5.2 Περιγραφή της κεραίας

Η προτεινόμενη κεραία απεικονίζεται στο Σχ. 1. Καταρχάς αποτελείται από τρία τμήματα: τη γραμμή μικροταινίας τραπεζοειδούς σχήματος που τροφοδοτεί τη κεραία, το τμήμα του γειωμένου υποστρώματος με στρογγυλεμένες άκρες και το, νέο, ακτινοβολούν στοιχείο, που αποτελείται με τη σειρά του από τα μισά τμήματα ενός κύκλου με ακτίνα r_1 και μιας έλλειψης με μήκος μεγάλου και μικρού άξονα r_1 , r_2 , αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Το τραπεζοειδές σχήμα της γραμμής τροφοδοσίας είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να παρουσιάζει στο ένα άκρο του που ενώνεται με το ακτινοβολούν στοιχείο αντίσταση εισόδου 70 Ω ενώ στο άλλο, που θα συνδεθεί με ένα SMA κονέκτορα, 50 Ω. Οι στρογγυλεμένες άκρες του επιπέδου γείωσης βοηθούν στην αύξηση του εύρους ζώνης λειτουργίας, και συγκεκριμένα την

ανίσταση εισόδου που παρουσιάζει η διάταξη στις υψηλότερες συχνότητες. Βασικά κάποιος μπορεί να σκεφτεί ότι το ακτινοβολούν στοιχείο και το επίπεδο γείωσης λειτουργούν ως ένας μετασχηματιστής 70–377 Ω , όπου 377 Ω η χαρακτηριστική αντίσταση του αέρα. Επειδή αυτός ο μετασχηματισμός λαμβάνει χώρα κυρίως στο κάτω, κυκλικό, μέρος του ακτινοβολούντος στοιχείου, είναι λογικό κάποιος να σκεφτεί ότι το πάνω, ελλειπτικό, τμήμα μπορεί να παραβλεφθεί. Παρόλα αυτά, οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι η διάθλαση που συμβαίνει εξ αιτίας της αιχμηρής άκρης του μισού κυκλικού δίσκου, επιδεινώνει την απόδοση της κεραίας. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να προστεθεί και το ελλειπτικό τμήμα. Επίσης, επειδή η μικρότερη συχνότητα λειτουργίας επηρεάζεται από το μήκος της τροχιάς του επιφανειακού ρεύματος που παρουσιάζεται στη κεραία, και μάλιστα η σχέση τους είναι αντιστρόφως ανάλογη, το επιπλέον ελλειπτικό τμήμα οδηγεί στη μετατόπιση της εύρους λειτουργίας σε χαμηλότερες συχνότητες, αυξάνοντας το λόγο λειτουργίας. Οι πλήρεις διαστάσεις της κεραίας απεικονίζονται στο Σχ. 1. Επίσης το διηλεκτρικό επιλέχθηκε να έχει, διηλεκτρική σταθερά, $\epsilon_r = 2.65$, εφαπτομένη απωλειών, $\tan\delta = 0.001$, και ύψος 0.5 mm. Αναλυτικά οι διαστάσεις της κεραίας, όπως αρχικά δημοσιεύτηκαν [18] είναι: $gl = 36$ mm, $gw = 150$ mm, $l = 32$ mm, $tw = 1.355$ mm, $w = 0.8$ mm, $r_1 = 72$ mm, $r_2 = 48$ mm, $r_3 = 30$ mm, $d = 0.3$ mm, και $h = 0.5$ mm

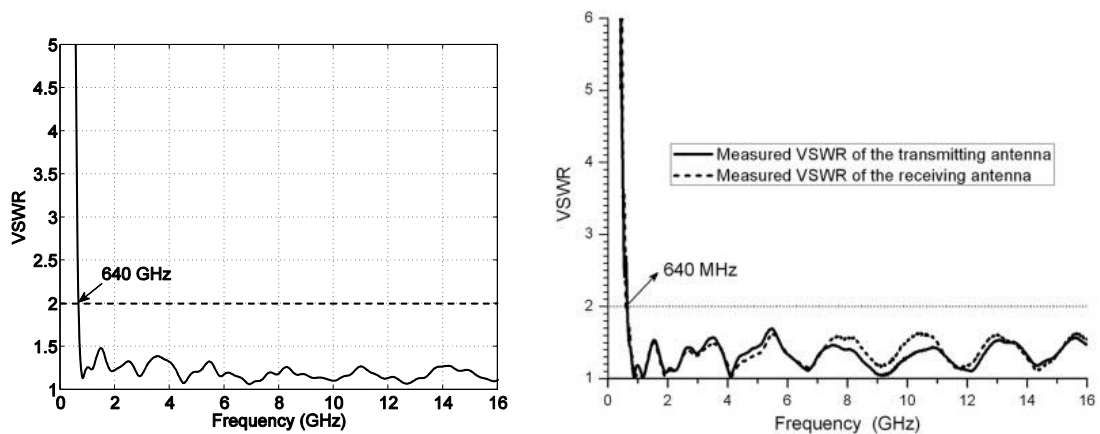


Σχήμα 1. Η κάτοψη της κεραίας εξαιρετικά υπερευρείας ζώνης που παρουσιάστηκε στην [18]

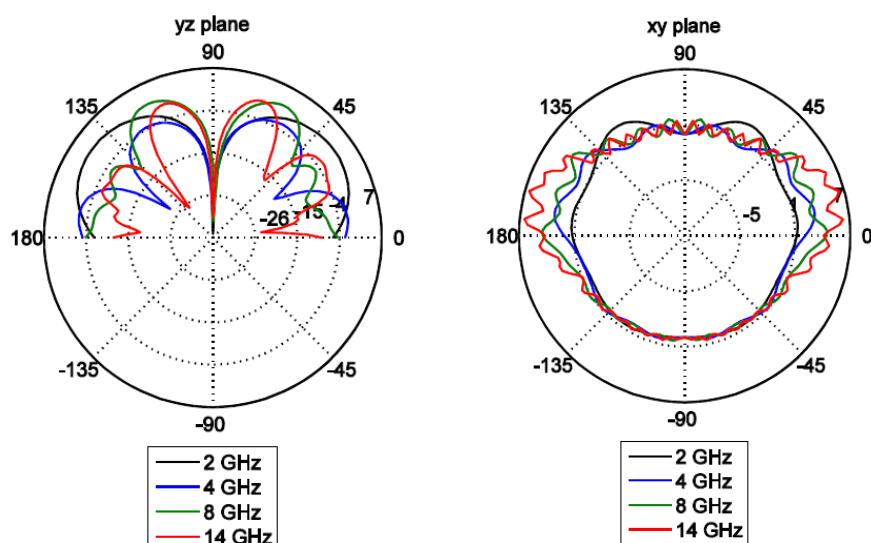
5.3 Απόδοση της κεραίας

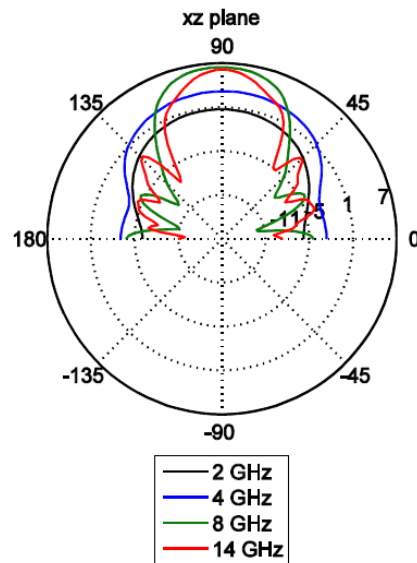
Αρχικά η κεραία προσομοιώνεται ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής ανάκλασης της και μέσω αυτού ο λόγος στάσιμου κύματος. Στην αρχή πραγματοποιείται διερεύνηση του ρυθμού που διεγείρεται στην είσοδο της κεραίας, στη γραμμή μικροταινίας. Στη συνέχεια ο τρισδιάστατος χώρος πλεγματοποιείται με

ελάχιστο βήμα 0.059 mm και μέγιστο 1.1804 mm με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν 5.549.460 μοναδιαία κελιά και συγκεκριμένα $N_x = 725$, $N_y = 366$, $N_z = 22$ κατά τις διαστάσεις x , y , και z , αντίστοιχα. Τέλος ο χώρος τερματίζεται σε τέλειες απορροφητικές συνθήκες (perfectmatchedlayer , PML). Στο Σχ. 2 απεικονίζεται ο λόγος στάσιμου κύματος (VSWR) της κεραίας, όπου και παρατηρείται ότι η συχνοτική περιοχή λειτουργίας, δηλαδή το εύρος για το οποίο $VSWR < 2$, είναι ιδιαίτερα ευρεία και εκτείνεται από τα 640 MHz έως τα 16 GHz. Είναι επίσης σαφές ότι υπάρχει καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων με εκείνα τα δημοσιευμένα στη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια υπολογίζεται το μακρινό πεδίο της κεραίας, και συγκεκριμένα το κέρδος της, για τις συχνότητες 2 GHz, 4 GHz, 8 GHz, και 14 GHz, και για τα τρία επίπεδα. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχ. 3 και ελέγχονται με εκείνα στη [18] που παρουσιάζονται στο Σχ. 4. Και πάλι παρατηρείται καλή ταύτιση. Τέλος, στο Σχ. 5 παρουσιάζεται το μέγιστο κέρδος για τις συχνότητες από 2–14GHz.

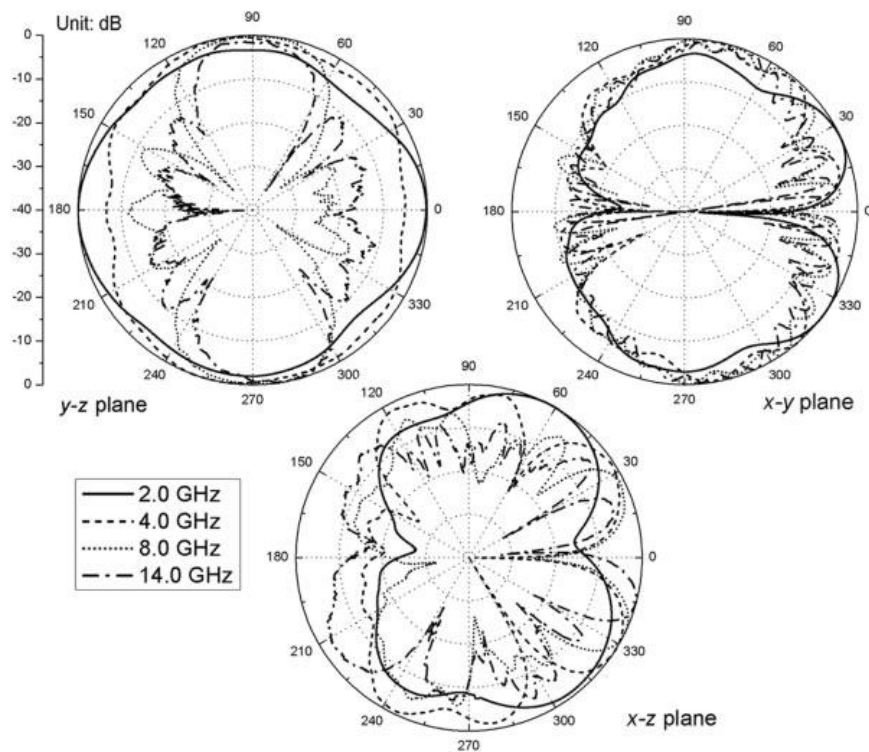


Σχήμα 2. Ο λόγος στάσιμου κύματος όπως υπολογίστηκε (αριστερά) και όπως παρουσιάστηκε στη [18] (δεξιά). Παρατηρείται καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων.

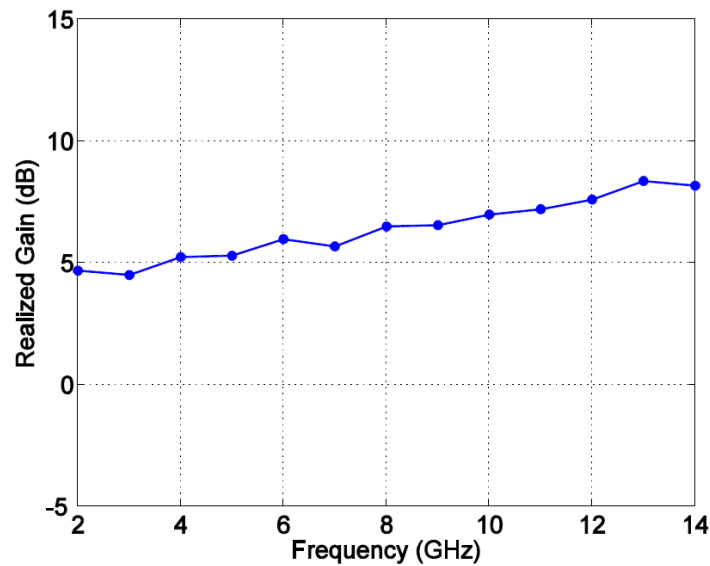




Σχήμα 3. Το μακρινό πεδίο (κέρδος) της κεραίας όπως αυτό υπολογίστηκε για τα διάφορα επίπεδα και συχνότητες.



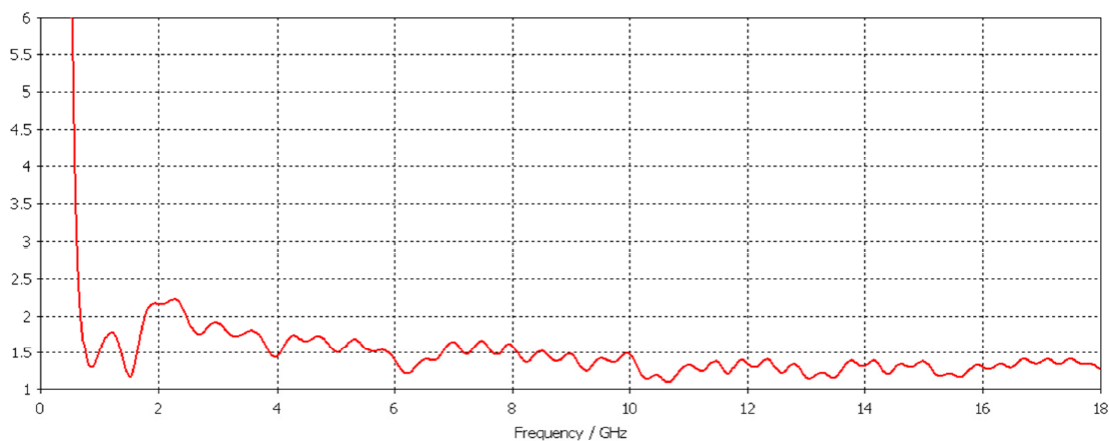
Σχήμα 4. Το μακρινό πεδίο (κέρδος) της κεραίας όπως αυτό παρουσιάστηκε στη [18] για τα διάφορα επίπεδα και συχνότητες. Παρατηρείται καλή ταύπιση των αποτελεσμάτων με εκείνα του Σχ. 3.



Σχήμα 5. Το μέγιστο κέρδος της κεραίας για 2–14 GHz.

5.4 Τροποποίηση της κεραίας

Στη συνέχεια η κεραία τροποποιείται ώστε το διηλεκτρικό υπόστρωμα να είναι FR-4 με χαρακτηριστικά: διηλεκτρική σταθερά, $\epsilon_r = 4.4$, εφαπτομένη απωλειών, $\tan\delta = 0.025$, και ύψος 1.5 mm. Είναι λογικό η συμπεριφορά της κεραίας να τροποποιηθεί. Αρχικά, το μόνο που αλλάζει από τις διαστάσεις της κεραίας είναι η $tw = 2.85$ mm ώστε η γραμμή μεταφοράς να παρουσιάζει αντίσταση εισόδου 50 Ω και επίσης χάρην μείωσης του υπολογιστικού κόστους επιλέγεται $w = tw$. Η διαδικασία



Σχήμα 6. Ο λόγος στάσιμου της τροποποιημένης κεραίας, όπως υπολογίστηκε με μεταβολή μόνο της διάστασης $tw = 2.85$ mm. . Παρατηρείται ότι η κεραία δε συντονίζεται για τη συχνότητα των 2 GHz.

της προσομοίωσης είναι παρόμοια με την προηγούμενη. Και πάλι ο χώρος διακριτοποιείται αυτή τη φορά με ελάχιστο βήμα 0.0864176 mm και μέγιστο 1.71512 mm. Τελικά προκύπτουν 6.273.952 στοιχεία ($N_x = 608$, $N_y = 305$, $N_z = 35$) Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχ. 6. Παρατηρείται ότι η κεραία δε συντονίζεται για τη συχνότητα των 2 GHz.

Είναι γνωστό ότι γενικά ισχύει,

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

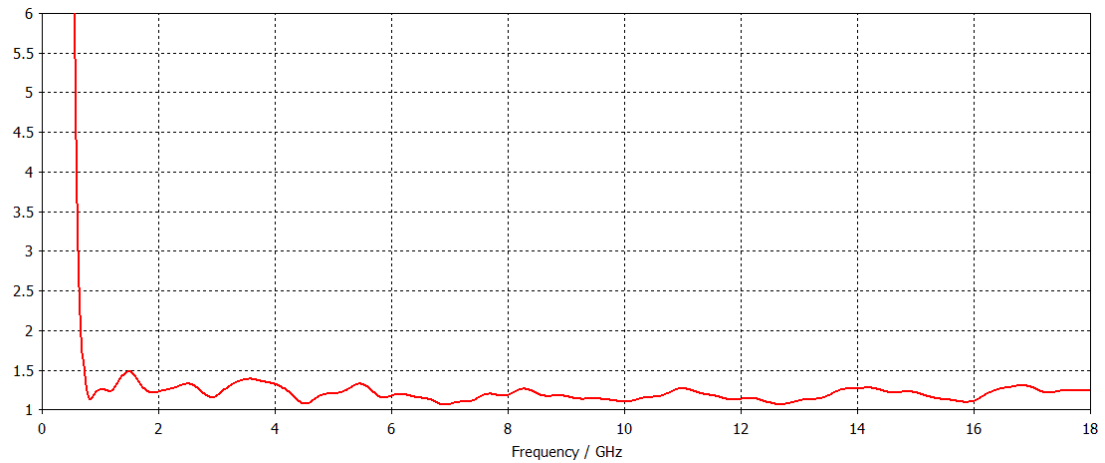
επίσης οι διαστάσεις μιας διάταξης είναι δυνατόν να εκφραστούν ως πολλαπλάσια του μήκους κύματος, δηλαδή,

$$d = a\lambda$$

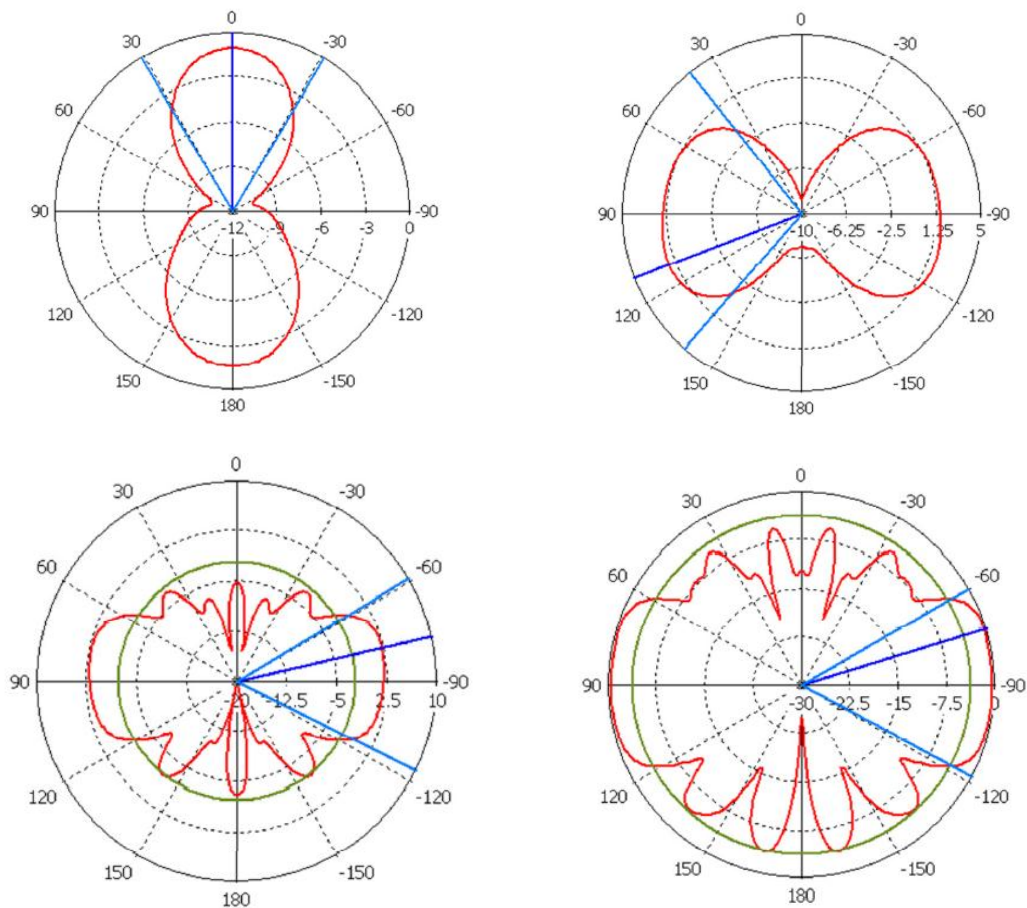
Συνεπώς, εάν η διάσταση, d , μεταβληθεί στην d' θα πρέπει να ισχύει,

$$\frac{d'}{d} = \frac{\lambda'}{\lambda} = \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{\epsilon_r}} \Leftrightarrow d' = \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{\epsilon_r}} d$$

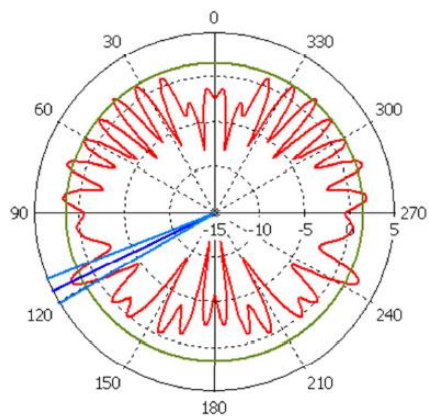
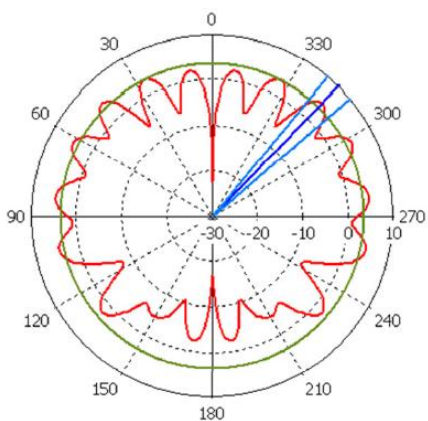
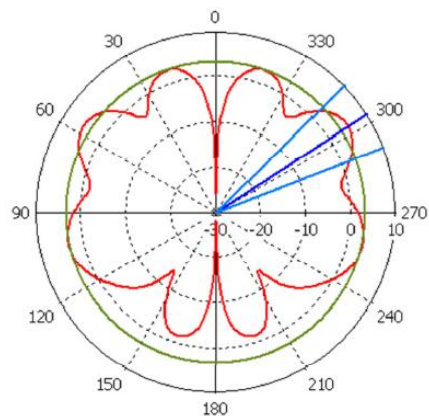
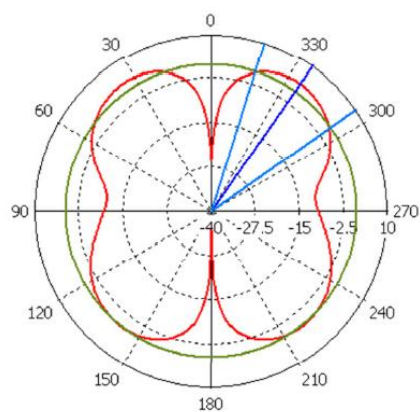
συνεπώς μια καλή αρχική προσέγγιση θα μπορούσε να είναι ο πολλαπλασιασμός των διαστάσεων της κεραίας με το συντελεστή $logos = (\epsilon_r'/\epsilon_r)^{1/2} = (4.4/2.65)^{1/2}$. Οι διαστάσεις που τροποποιούνται είναι οι εξής: d , gl , gw , l , r_1 , r_2 , r_3 . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το λόγο στάσιμου κύματος απεικονίζονται στο Σχ. 7. Αυτή τη φορά η κεραία φαίνεται να λειτουργεί ικανοποιητικά μιας και ο $VSWR < 1.5$ για συχνότητες από 670 MHz έως πάνω από 18 GHz. Παρατηρείται δηλαδή αύξηση στο λόγο λειτουργίας από 25:1 σε μεγαλύτερο από 27:1. Στα Σχ. 8 παρουσιάζεται το μακρινό πεδίο της κεραίας και συγκεκριμένα το κέρδος της και πάλι για τις συχνότητες 2 GHz, 4 GHz, 8 GHz, και 14 GHz, και για τα τρία επίπεδα. Τέλος, στο Σχ. 9 παρουσιάζεται το μέγιστο κέρδος ως συνάρτηση της συχνότητας. Παρατηρείται ότι στην τροποποιημένη κεραία το μέγιστο κέρδος στις υψηλότερες συχνότητες είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο της αρχικής διάταξης.



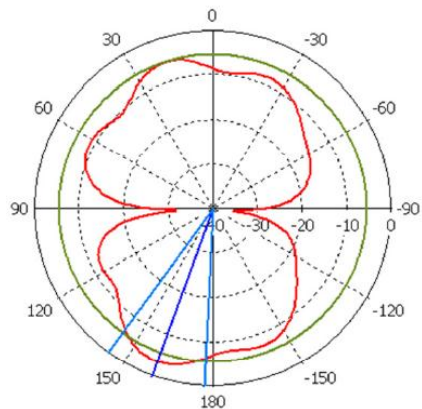
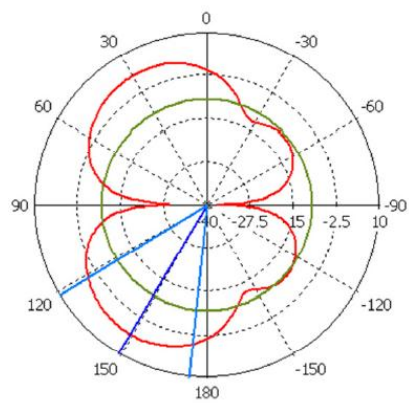
Σχήμα 7. Ο λόγος στάσιμου της τροποποιημένης κεραίας, με τις νέες διαστάσεις $d = 0.3 \times \logos$ mm, $gl = 36 \times \logos$ mm, $gw = 150 \times \logos$ mm, $l = 32 \times \logos$ mm, $w = 0.8 \times \logos$ mm, $r_1 = 72 \times \logos$ mm, $r_2 = 48 \times \logos$ mm, $r_3 = 30 \times \logos$ mm, όπου $\logos = (\epsilon_r'/\epsilon_r)^{1/2} = (4.4/2.65)^{1/2}$.

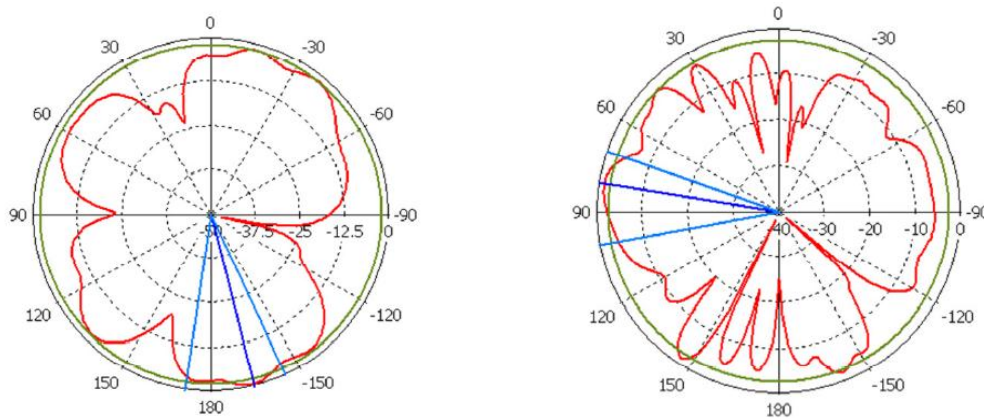


Σχήμα 8α: Το μακρινό πεδίο για το επίπεδο y-z για τις συχνότητες 2 GHz (πάνω αριστερά), 4 GHz (πάνω δεξιά), 8 GHz (κάτω αριστερά), 12 GHz (κάτω δεξιά)

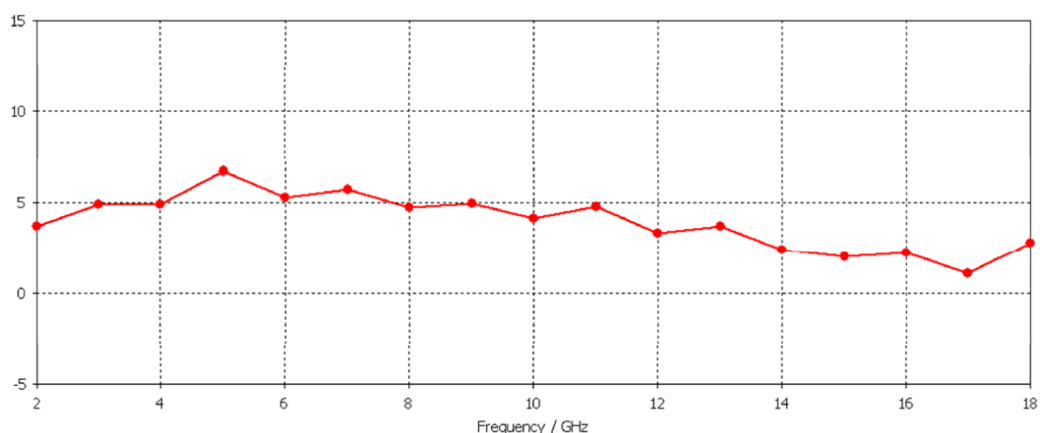


Σχήμα 8b: Το μακρινό πεδίο για το επίπεδο x-y για τις συχνότητες 2 GHz (πάνω αριστερά), 4 GHz (πάνω δεξιά), 8 GHz (κάτω αριστερά), 12 GHz (κάτω δεξιά)





Σχήμα 8c: Το μακρινό πεδίο για το επίπεδο x-z για τις συχνότητες 2 GHz (πάνω αριστερά), 4 GHz (πάνω δεξιά), 8 GHz (κάτω αριστερά), 12 GHz (κάτω δεξιά)



Σχήμα 9. Το μέγιστο κέρδος της κεραίας για 2–18 GHz. Παρατηρείται ότι στην τροποποιημένη κεραία το μέγιστο κέρδος στις υψηλότερες συχνότητες (π.χ. 8–14 GHz) είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο της αρχικής διάταξης.

5.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν κάποιες γενικές πληροφορίες για τις κεραίες εξαιρετικά υπερευρείας ζώνης. Πραγματοποιήθηκε σύντομη έρευνα στη βιβλιογραφία και αναφέρθηκαν οι πιο σύγχρονες εργασίες. Τελικά, επιλέχθηκε προς μελέτη η ελλειπτική κεραία που παρουσιάστηκε στην [18]. Αρχικά η κεραία προσομοιώθηκε και στόχος ήταν η επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Παρατηρήθηκε καλή ταύτιση. Κατόπιν η κεραία τροποποιήθηκε. Συγκεκριμένα άλλαξε το διηλεκτρικό υπόστρωμα σε FR-4. Για να λειτουργήσει η κεραία οι διαστάσεις της πολλαπλασιάστηκαν με κατάλληλο συντελεστή, όπως προέκυψε από θεωρητική ανάλυση. Τελικά, η προκύπτουσα κεραία φαίνεται να λειτουργεί ικανοποιητικά με λόγο 27:1 έναντι 25:1 της αρχικής. Τέλος, από το διάγραμμα μέγιστου κέρδους συναρτήσει της συχνότητας διαπιστώνεται ότι στην τροποποιημένη κεραία το μέγιστο κέρδος στις υψηλότερες συχνότητες (π.χ. 8–14 GHz) είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο της αρχικής διάταξης.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Liang, C.C. Chiau, X. Chen, and C.G. Parini, "Study of a printed circular disc monopole antenna for UWB systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* vol. 53, num. 11, pp. 3500–3504, 2005.
- [2] S. Roy, J.R. Foerster, V.S. Somayazulu, and D.G. Leeper, "Ultrawideband radio design: The promise of high-speed, short-range wireless connectivity," *Proc IEEE* 92 (2004), 295–311.
- [3] M.A. Peyrot-Solis, G.M. Galvan-Tejada, and H. Jordan-Aguilar, "State of the art in ultra-wideband antennas," *Electr Electron Eng Conf* (2005), 101–105.
- [4] X.-L. Liang, S.-S. Zhong, and F.-W. Yao, "Compact UWB tapered-CPW-fed planar monopole antenna," *Asia-Pacific Microwave Conf Suzhou, China* (2005).
- [5] Y.-C. Lin and K.-J. Hung, "Compact ultrawideband rectangular aperture antenna and band-notched designs," *IEEE Trans Antennas Propag* 54(2006), 3075–3081.
- [6] J. Kim, T. Yoon, J. Kim, and J. Choi, "Design of an ultrawide-band printed monopole antenna using FDTD and genetic algorithm," *IEEE Microwave Wireless Component Lett* 15 (2005), 395–397.
- [7] J. Liang, L. Guo, C.C. Chiau, X. Chen, and C.G. Parini, "Study of CPW-fed circular disc monopole antenna for ultra wideband applications," *IEEE Proc-Microwaves Antennas Propag* 152 (2005), 520–526.
- [8] Q. Wu, R. Jin, J. Geng, and M. Ding, "Compact CPW-fed quasi-circular monopole with very wide bandwidth," *Electron Lett* 43 (2007), 69–70.
- [9] H.K. Kan, W.S.T. Rowe, and A.M. Abbosh, "Compact coplanar waveguide-fed ultra-wideband antenna," *Electron Lett* 43 (2007), 654–656.
- [10] C.-C. Lin, Y.-C. Kan, L.-C. Kuo, and H.-R. Chuang, "A planar triangular monopole antenna for UWB communication," *IEEE Microwave Wireless Component Lett* 15 (2005), 624–626.
- [11] S.T. Choi, K. Hamaguchi, and R. Kohno, "Small printed CPW-fed triangular monopole antenna for ultra-wideband applications," *Microwave Opt Technol Lett* 51 (2009), 1180–1182.
- [12] V. Rumsey, *Frequency independent antennas*, Academic Press, New York, 1966.

- [13] E. Guillon and J.Y. Dauvignac et al., "A new design of tapered slot antenna for ultra-wideband applications," *Microwave Opt TechnolLett* 19 (1998), 286–289.
- [14] K.P. Ray and Y. Ranga, "Ultrawideband printed elliptical monopole antennas," *IEEE Trans Antennas Propag* 55 (2007), 1189–1192.
- [15] S.Y. Suh, W.L. Stutzman, and W.A. Davis, "A new ultrawideband printed monopole antenna: The planar inverted cone antenna (PICA)," *IEEE Trans Antennas Propag* 52 (2004), 1361–1365.
- [16] S.A. Evangelos and A.Z. Anastopoulos et al., "Circular and elliptical CPW-fed slot and microstrip-fed antennas for ultrawideband applications," *IEEE Antennas Wireless PropagLett* 5 (2006), 294–297.
- [17] S.S. Zhong, X.L. Liang, and W. Wang, "Compact elliptical monopole antenna with impedance bandwidth in excess of 21:1," *IEEE Trans Antennas Propag* 55 (2007), 3082–3085.
- [18] Y. Dong, W Hong, L Liu, Y Zhang, and Z. Kuai, "Performance analysis of a printed super-wideband antenna," *Microwave Opt TechnolLett* 51 (2009), 949–956.