



Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Ψηφιακές Επικοινωνίες και Δίκτυα

*“ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ
ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ ΜΕ ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΜΕΝΟ
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ”*

Χρονόπουλος Αναστάσιος

ΑΜ: ΜΨΕ1618

Επιβλέπων: Καθηγητής κ.Αθανάσιος Κανάτας

Πειραιάς

Οκτώβριος 2018

*Αφιερώνεται
στους κοντινούς μου ανθρώπους...*

Περίληψη

Χάρη στην εξελισσόμενη τεχνολογία είναι πλέον αρκετά εύκολο να υπάρξει επικοινωνία μεταξύ της επιφάνειας της Γης και του διαστήματος. Ολοένα και περισσότερες υπηρεσίες που μέχρι σήμερα στηρίζονταν στις επίγειες επικοινωνίες τείνουν να επεκτείνονται εκμεταλλευόμενες όλα εκείνα τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι δορυφορικές επικοινωνίες. Έτσι, η έρευνα και η σχεδίαση κατάλληλων κεραιών επιθέματος, με χαρακτηριστικά όπως επαναπροσδιοριζόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας αλλά και επαναπροσδιοριζόμενη πόλωση, είναι άκρως απαραίτητες. Θα σχεδιαστούν κεραιές οι οποίες με κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα θα είναι ικανές να μεταβάλλουν την πόλωση και να στρέφουν τον κύριο λοβό ακτινοβολίας οπουδήποτε αυτό καθίσταται απαραίτητο. Επομένως, κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη και η σχεδίαση στον ηλεκτρομαγνητικό προσομοιωτή, τυπωμένων κεραιών επιθέματος, και συγκεκριμένα α) μία ορθογώνια παραλληλόγραμμη κεραία επιθέματος με δύο ορθογώνια παραλληλόγραμμα παρασιτικά στοιχεία και β) μία κεραία επιθέματος με ένα κυκλικό ενεργό στοιχείο και τέσσερα παρασιτικά κυκλικά στοιχεία. Αρχικά, η συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας βασίστηκε στην θεωρία αλλά και την μελέτη προηγούμενων ερευνών με κύριο γνώμονα την σχεδίαση κεραιών οι οποίες θα ικανοποιούν κάποια κριτήρια, όπως για παράδειγμα, επαναπροσδιοριζόμενο κύριο λοβό ακτινοβολίας με την συμβολή κατάλληλων διόδων PIN. Σε τελικό στάδιο, περιγράφονται αναλυτικά όλα τα παραχθέντα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις αλλά και κατά το πόσο αυτά είναι ικανοποιητικά.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Αθανάσιο Κανάτα για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω αυτή την διπλωματική εργασία αλλά και για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για την περάτωσή της. Οι σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του με κατεύθυναν σ' ένα σωστό τρόπο σκέψης αποκομίζοντας όλα εκείνα τα απαραίτητα εφόδια για την ακαδημαϊκή μου σταδιοδρομία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στον Μεταδιδάκτορα Δρ. Λεωνίδα Μαράντη, στον Μεταδιδάκτορα Δρ. Αναστάσιο Παρασκευόπουλο και στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Δημήτριο Ρόγγα για την ανιδιοτελή προσφορά τους, για τον σημαντικό χρόνο που αφιέρωσαν και τις πολύτιμες πληροφορίες που μου μετέδωσαν καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής αυτής της διπλωματικής εργασίας, γιατί χωρίς τη βοήθειά τους δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίησή της.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάω και στην οικογένειά μου η οποία με στήριξε με κάθε τρόπο σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη | 3 |
| Ευχαριστίες..... | 4 |
| Κεφάλαιο 1..... | 14 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 14 |
| 1.2 Κίνητρα | 15 |
| 1.3 Στόχοι..... | 15 |
| 1.4 Βιβλιογραφική έρευνα..... | 15 |
| 1.5 Δομή διπλωματικής εργασίας..... | 19 |
| Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο | 20 |
| 2.1 Εισαγωγή στις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες | 20 |
| 2.2 GEO και LEO τροχιές στις δορυφορικές επικοινωνίες | 20 |
| 2.2.1 GEO δορυφόροι..... | 20 |
| 2.2.2 LEO δορυφόροι..... | 22 |
| 2.3 Μικροταινιακή τεχνολογία στις δορυφορικές επικοινωνίες..... | 24 |
| 2.3.1 Διαστάσεις κεραίας επιθέματος..... | 26 |
| 2.3.2 Συχνότητα συντονισμού | 27 |
| 2.3.2 Προσαρμογή της σύνθετης χαρακτηριστικής αντίστασης | 28 |
| 2.4 Παράμετροι κεραιών επιθέματος | 30 |
| 2.4.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας..... | 30 |
| 2.4.2 Πόλωση | 31 |
| 2.4.3 Εύρος ζώνης λειτουργίας..... | 34 |
| 2.4.3 Μέθοδοι τροφοδοσίας της κεραίας..... | 35 |
| 2.4.3.1 Ομοαξονικό καλώδιο μεταφοράς | 37 |
| 2.4.3.2 Μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς..... | 39 |
| 2.4.3.2 Συνδετήρες | 41 |
| Κεφάλαιο 3 : Παρασιτική στοιχειοκεραία επιθέματος με 2 παρασιτικά στοιχεία στη κεντρική συχνότητα των 3GHz | 43 |
| 3.1 Σχεδίαση-Παράμετροι | 43 |
| 3.2 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα..... | 50 |
| Κεφάλαιο 4 : Παρασιτική στοιχειοκεραία με 4 κυκλικά παρασιτικά στοιχεία στη κεντρική συχνότητα των 3GHz | 59 |
| 4.1 Σχεδίαση-Παράμετροι | 59 |
| 4.2 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα..... | 67 |
| Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα και μελλοντική μελέτη..... | 80 |
| 5.1 Συμπεράσματα..... | 80 |

| | |
|---|----|
| 5.1 Μελλοντική μελέτη | 82 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 83 |
| Παράρτημα Α: Αποτυχημένες προσπάθειες για κυκλική πόλωση στο Κεφάλαιο 4 | 84 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 86 |

Λίστα Σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1.1: Πρωταρχική[3] σχεδίαση κεραίας επιθέματος . | 16 |
| Σχήμα 1.2: Παρασιτική κεραία επιθέματος βασισμένη στην yagi-uda | 17 |
| Σχήμα 1.3: Κεραία με δύο επιθέματα με σκοπό την λειτουργία σε 2 διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων. | 17 |
| Σχήμα 1.4: αριστερά προς δεξιά, παρασιτική στοιχειοκεραία με τοποθέτηση ενός παρασιτικού στοιχείου σε κάθε πλευρά του ενεργού στοιχείου και τοποθέτηση εκατέρωθεν του ενεργού στοιχείου. | 18 |
| Σχήμα 1.5: Κεραία με δυνατότητα λειτουργίας τόσο σε αριστερόστροφη όσο και σε δεξιόστροφη κυκλική πόλωση με χρήση διόδων p-i-n. | 19 |
| Σχήμα 2.1: Γεωγραφικό αποτύπωμα γεωστατικών δορυφόρων στην επιφάνεια της Γης. | 21 |
| Σχήμα 2.2 Σύγκριση αποστάσεων[35] των δορυφόρων από την επιφάνεια της Γης. | 23 |
| Σχήμα 2.3 Παράδειγμα δομής μίας τυπικής κεραίας επιθέματος. | 25 |
| Σχήμα 2.4 Αναπαράσταση των fringing fields σε τετράγωνο αλλά και σε κυκλικό επίθεμα. | 25 |
| Σχήμα 2.5 Τετράγωνο επίθεμα το οποίο τροφοδοτείται με την τεχνική probe fed στο κατάλληλο σημείο με στόχο την επίτευξη της καλής προσαρμογής της κεραίας με την γραμμή μεταφοράς. | 28 |
| Σχήμα 2.6 Γραφική αναπαράσταση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης. | 29 |
| Σχήμα 2.7 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας επιθέματος. | 30 |
| Σχήμα 2.8 Επίτευξη κυκλικής πόλωσης με την τροφοδοσία της κεραίας σε δύο σημεία. | 32 |
| Σχήμα 2.9 Γραφική αναπαράσταση της φάσης με την συχνότητα, στην οποία φαίνεται ότι μεταξύ των συχνοτήτων f_a και f_b επιτυγχάνεται διαφορά φάσης 90° . | 33 |
| Σχήμα 2.10 Επίτευξη κυκλικής πόλωσης και την τροφοδοσία της κεραίας στην διαγώνιο. | 33 |
| Σχήμα 2.11 Διάγραμμα co/cross polar vs axial ratio στο οποίο φαίνεται κατά το πόσο η κεραία έχει κυκλική πόλωση. | 34 |
| Σχήμα 2.12 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} , όπου απεικονίζεται το εύρος ζώνης, το οποίο αποτελείται από όλες τις συχνότητες στις οποίες η τιμή της σκέδασης είναι < -10 dB. | 35 |
| Σχήμα 2.13 Τροφοδοσία με κάθετη προβολή του ομοαξονικού καλωδίου στο επίθεμα (probe fed). | 36 |
| Σχήμα 2.14 Τροφοδοσία επιθέματος με μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς, αριστερά χωρίς εσοχή, δεξιά με εσοχή. | 36 |
| Σχήμα 2.15 Τροφοδοσία με άνοιγμα σύζευξης, κατά την οποία δεν έρχονται σε άμεση επαφή η γραμμή μεταφοράς και το επίθεμα. | 37 |
| Σχήμα 2.16 Ομοαξονικό καλώδιο. | 37 |
| Σχήμα 2.17 Αναπαράσταση ηλεκτρικού E και μαγνητικού H πεδίου μέσα στο ομοαξονικό καλώδιο. | 38 |
| Σχήμα 2.18 Αναπαράσταση των fringing fields μέσα στο διηλεκτρικό υπόστρωμα. | 40 |
| Σχήμα 2.19 Συνδετήρας SMA. | 42 |
| Σχήμα 3.1 Μπροστινή όψη της κεραίας. | 44 |
| Σχήμα 3.2 Πλάγια όψη της κεραίας στην οποία φαίνονται τα pins για την τροφοδοσία με τάση DC. | 44 |
| Σχήμα 3.3 Οπίσθια όψη της κεραίας. | 45 |
| Σχήμα 3.4 Μεγέθυνση στις δομές των RF choke (αριστερά) και p-i-n diode (δεξιά). | 45 |
| Σχήμα 3.5 Συνδετήρας 0.42 End Launch της Amphenol™. | 48 |
| Σχήμα 3.6 Αναπαράσταση των κελιών mesh ως προς τον άξονα z. | 49 |
| Σχήμα 3.7 Αναπαράσταση των κελιών mesh ως προς τον άξονα x. | 49 |
| Σχήμα 3.8 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} . | 51 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 3.9 Διάγραμμα ισχύος στο οποίο απεικονίζονται η απώλεια στα διηλεκτρικά, η απώλεια στα lumped elements, η ισχύς που παραμένει στο σύστημα, αλλά και η ισχύς η οποία εκπέμπεται από το σύστημα. | 51 |
| Σχήμα 3.10 Διάγραμμα απεικόνισης του λόγου του στάσιμου κύματος (VSWR). | 52 |
| Σχήμα 3.11 Διάγραμμα απεικόνισης του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (Real). ... | 52 |
| Σχήμα 3.12 Διάγραμμα απεικόνισης του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (Imaginary). | 52 |
| Σχήμα 3.13 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή (3D). | 53 |
| Σχήμα 3.14 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή (polar). | 53 |
| Σχήμα 3.15 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} | 54 |
| Σχήμα 3.16 Διάγραμμα ισχύος. | 54 |
| Σχήμα 3.17 Διάγραμμα απεικόνισης του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (Real). ... | 55 |
| Σχήμα 3.18 Διάγραμμα απεικόνισης του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (Imaginary). | 55 |
| Σχήμα 3.19 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή (3D). | 56 |
| Σχήμα 3.20 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή (3D). | 56 |
| Σχήμα 3.21 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή (polar). | 57 |
| Σχήμα 3.22 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή (polar). | 57 |
| Σχήμα 3.23 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη(3D) και σε πολική μορφή (polar). | 58 |
| Σχήμα 3.24 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη(3D) και σε πολική μορφή (polar). | 58 |
| Σχήμα 4.1 Πρόσθια όψη της κεραίας. | 60 |
| Σχήμα 4.2 Οπίσθια όψη της κεραίας. | 60 |
| Σχήμα 4.3 Δίοδος p-i-n η οποία συνδέει το παρασιτικό στοιχείο με το επίπεδο της γείωσης μέσω της επιμεταλλωμένης οπής. | 61 |
| Σχήμα 4.4 Ομοαξονικό ημιάκαμπτο (semi-rigid) καλώδιο το οποίο προσκολλάται απευθείας πάνω στην κεραία. | 62 |
| Σχήμα 4.5 RF choke το οποίο συνδέει το παρασιτικό στοιχείο με την δίοδο p-i-n στο οποίο θα εφαρμοστεί τάση DC. | 63 |
| Σχήμα 4.6 Αναλυτική διακριτοποίηση της δομής της κεραίας. | 66 |
| Σχήμα 4.7 Αναλυτική διακριτοποίηση στα σημεία τα οποία συμβάλλουν στην αλλαγή της κατάστασης της κεραίας. | 66 |
| Σχήμα 4.8 Διακριτοποίηση του διηλεκτρικού υποστρώματος. | 67 |
| Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ακτινοβολίας για διάφορες αποστάσεις, αριστερά μικρή απόσταση και προς δεξιά μεγαλύτερη. | 68 |
| Σχήμα 4.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας για διάφορες αποστάσεις, αριστερά μικρή απόσταση και προς δεξιά μεγαλύτερη. | 68 |
| Σχήμα 4.11 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για διάφορες αποστάσεις. παρατηρείται ότι σχεδόν όλες οι αποστάσεις οδηγούν σε παρόμοιες τιμές του κατευθυντικού κέρδους. | 69 |
| Σχήμα 4.12 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για διάφορες αποστάσεις. παρατηρείται ότι σχεδόν όλες οι αποστάσεις οδηγούν σε παρόμοιες τιμές του κατευθυντικού κέρδους. Η γραμμή με μπλε χρώμα είναι η απόσταση των 33 χιλιοστών, όπου και επιλέχτηκε ως βέλτιστη. | 69 |
| Σχήμα 4.13 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για διάφορες αποστάσεις. παρατηρείται ότι από μία απόσταση και μετά επέρχεται ο κορεσμός. Η γραμμή με ροζ χρώμα είναι η απόσταση των 33 χιλιοστών που επιλέχτηκε ως βέλτιστη. | 70 |
| Σχήμα 4.14 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για όλες τις παραμετρικές δοκιμές. Η γραμμή με μπλε χρώμα είναι η απόσταση των 33 χιλιοστών, όπου και επιλέχτηκε ως βέλτιστη. | 70 |
| Σχήμα 4.15 Διάγραμμα ακτινοβολίας για διάφορες αποστάσεις, αριστερά προς δεξιά: α) ελάχιστη απόσταση 29mm, β) μεσαία απόσταση 33mm γ) μέγιστη απόσταση 36mm. | 70 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 4.16 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} της κατάστασης “ON-ON-ON-ON” | 71 |
| Σχήμα 4.17 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή της κατάστασης “ON-ON-ON-ON” | 72 |
| Σχήμα 4.18 Διάγραμμα απώλειας ισχύος στο οποίο φαίνεται αναλυτικά το ποσό της χαμένης αλλά και της εκπέμπουσας ισχύος. | 72 |
| Σχήμα 4.19 Διάγραμμα του λόγου του στάσιμου κύματος (VSWR) της κατάστασης “ON-ON-ON-ON”. | 73 |
| Σχήμα 4.20 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης “ON-ON-ON-ON”. | 73 |
| Σχήμα 4.21 Διάγραμμα του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης “ON-ON-ON-ON”. | 73 |
| Σχήμα 4.22 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για την κατάσταση “ON-OFF-ON-OFF”. | 74 |
| Σχήμα 4.23 Διάγραμμα ισχύος για την κατάσταση “ON-OFF-ON-OFF”. | 74 |
| Σχήμα 4.24 Διάγραμμα του λόγου του στάσιμου κύματος (VSWR) της κατάστασης “ON-OFF-ON-OFF”. | 75 |
| Σχήμα 4.25 Αριστερά φαίνεται το θεωρητικό μοντέλο του διαγράμματος Smith και δεξιά φαίνεται σε μεγέθυνση το διάγραμμα Smith της προσομοίωσης. | 75 |
| Σχήμα 4.26 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης..... | 76 |
| Σχήμα 4.27 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης..... | 76 |
| Σχήμα 4.28 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις καταστάσεις “ON-OFF-OFF-OFF” και “ON-ON-OFF-OFF” | 77 |
| Σχήμα 4.29 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις καταστάσεις “OFF-ON-OFF-OFF” και “OFF-ON-OFF-ON” | 77 |
| Σχήμα 4.30 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις καταστάσεις “OFF-OFF-OFF-ON” και “OFF-OFF-ON-ON” | 77 |
| Σχήμα 4.31 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις καταστάσεις “OFF-OFF-ON-OFF” και “ON-OFF-ON-OFF” | 78 |
| Σχήμα 4.32 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για τις καταστάσεις “ON-OFF-OFF-OFF” και “ON-ON-OFF-OFF” | 78 |
| Σχήμα 4.33 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για τις καταστάσεις “OFF-ON-OFF-OFF” και “OFF-ON-OFF-ON” | 78 |
| Σχήμα 4.34 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για τις καταστάσεις “OFF-OFF-OFF-ON” και “OFF-OFF-ON-ON” | 79 |
| Σχήμα 4.35 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για τις καταστάσεις “OFF-OFF-ON-OFF” και “ON-OFF-ON-OFF” | 79 |
| Σχήμα A1: Δομή κεραίας με εσοχές. | 84 |
| Σχήμα A2: Διάγραμμα σκέδασης S_{11} | 84 |
| Σχήμα A3: Διάγραμμα ακτινοβολίας | 85 |

Λίστα Πινάκων

| | |
|---|----|
| 3.1 Διαστάσεις RF choke..... | 46 |
| 3.2 Διαστάσεις διόδου p-i-n. | 46 |
| 3.3 Τιμές των παραμέτρων της κεραίας..... | 47 |
| 3.4 Τιμές της αντίστασης, του πηνίου και του πυκνωτή οι οποίες αντιστοιχούν στα ισοδύναμα κυκλώματα των δύο καταστάσεων της διόδου..... | 48 |
| 3.5 Αποτελέσματα παραμετρικής σάρωσης για την απόσταση των παρασιτικών στοιχείων από το ενεργό. | 50 |
| 4.1 Τιμές της αντίστασης, του πηνίου και του πυκνωτή οι οποίες αντιστοιχούν στα ισοδύναμα κυκλώματα των δύο καταστάσεων της διόδου..... | 63 |
| 4.2 Διαστάσεις του RF choke. | 64 |
| 4.3 Διαστάσεις της διόδου p-i-n..... | 64 |
| 4.4 Διαστάσεις της κεραίας. | 65 |

Συντομογραφίες

| | |
|-----------------------|------------------------------------|
| CST | Computer Simulation Technology |
| 3-D | Three Dimensions |
| BNC | Bayonet Neill–Concelman |
| BW | Bandwidth |
| c | Speed of light 3×10^8 m/s |
| cm | Centimeters |
| dB | Decibel |
| dB_i | Decibel isotropic |
| DC | Direct Current |
| E | Electric field |
| GEO | Geostationary Earth Orbit |
| GHz | Gigahertz |
| H | Magnetic Field |
| Km | Kilometers |
| LEO | Low earth orbit |
| LHCP | Left hand circular polarization |
| LNA | Low noise Amplifier |
| MHz | Megahertz |
| mm | Millimeters |
| nH | Nanohenry |
| PCB | Printed Circuit Board |
| pF | Picofarad |
| p-i-n | P-type region and N-type region |

| | |
|----------------------------|----------------------------------|
| RF | Radiofrequency |
| RHCP | Right Hand Circular Polarization |
| RLC | Resistor Inductor (L) Capacitor |
| RTT | Round Trip Time |
| SMA | SubMiniature version A |
| SMB | SubMiniature version B |
| SSPA | Solid State Power Amplifier |
| TM | Transverse mode |
| V | Volt |
| VNA | Vector Network Analyzer |
| VSWR | Voltage Standing Wave Ratio |
| W | Watts |
| I | Current |
| Ω | Ohms |

Λίστα Συμβόλων

| | |
|-----------------------|--|
| S₁₁ | Παράμετρος σκέδασης από την θύρα 1 στην θύρα 1 |
| a | Ακτίνα ομοαξονικού καλωδίου |
| c | Ταχύτητα του φωτός 3×10^8 m/s |
| D_f | Εισαγωγή απώλειας |
| f_a | Συχνότητα συντονισμού a |
| f_b | Συχνότητα συντονισμού b |
| f_r | Συχνότητα συντονισμού |
| h | Πάχος |
| L | Μήκος συντονισμού |
| ε_r | Διηλεκτρική σταθερά |
| Z | Σύνθετη αντίσταση εισόδου |
| λ₀ | μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο |
| λ_d | μήκος κύματος στην PCB πλακέτα |
| π | Τριγωνομετρικό $\pi = 3,14$ |

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Οι κεραιές στις τηλεπικοινωνίες είναι η αρχή και το τέλος μίας ασύρματης ζεύξης. Αρχικά, πριν μεταβούμε στο κομμάτι της αναλυτικής σχεδίασης των κεραιών, πρέπει να γίνει κατανοητό όλο το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2, με μία εκτενή αναφορά σε όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των κεραιών και πως αυτά καθορίζουν τον τελικό σχεδιασμό της κεραιάς. Στο αμέσως επόμενο στάδιο θα μελετηθεί και θα σχεδιαστεί με αναλυτικό τρόπο μία κεραιά επιθέματος με δύο παρασιτικά στοιχεία τα οποία θα ενώνονται με το επίπεδο της γείωσης χρησιμοποιώντας p-i-n διόδους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται στροφή του κύριου λοβού ακτινοβολίας κατά $\pm 20^\circ$ μοίρες ανάλογα με την θέση του δορυφόρου. Βέβαια δεν θα μπορούσαν να λείπουν και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως για παράδειγμα το διάγραμμα S_{11} , το εύρος ζώνης της κεραιάς αλλά και το διάγραμμα ακτινοβολίας τόσο σε δυσδιάστατη αλλά και σε τρισδιάστατη μορφή. Στη συνέχεια, θα σχεδιαστεί μία κεραιά με ένα ενεργό κυκλικό επίθεμα και τέσσερα παρασιτικά στοιχεία τα οποία, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, θα ενώνονται με το επίπεδο της γείωσης με την βοήθεια p-i-n διόδων, όπου με τον κατάλληλο συνδυασμό μπορούν να παραχθούν εννέα διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας. Ο τρόπος που επιτυγχάνεται η παραπάνω ιδιότητα περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 μαζί με όλα τα παραχθέντα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο παραπάνω κεραιές όλα τα απαραίτητα κυκλώματα αλλά και οι δίοδοι προσομοιώθηκαν με την βοήθεια των ισοδύναμων κυκλωμάτων τους (equivalent circuit). Όσον αφορά τον τρόπο τροφοδοσίας, η πρώτη κεραιά τροφοδοτήθηκε με έναν SMA συνδετήρα ενώ στην δεύτερη περίπτωση ως μέθοδος τροφοδοσίας επιλέχθηκε η απευθείας τροφοδοσία της κεραιάς από ένα ημιάκαμπτο ομοαξονικό καλώδιο (semi rigid). Τέλος, όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με έναν εξειδικευμένο ηλεκτρομαγνητικό επιλύτη, το CST, το οποίο παρέχει την δυνατότητα της τρισδιάστατης αναπαράστασης μίας κεραιάς αλλά και του αντίστοιχου διαγράμματος ακτινοβολίας της, και όχι μόνο. Μέσα από ένα πολύ φιλικό προς τον χρήστη, γραφικό περιβάλλον, δόθηκε η δυνατότητα να σχεδιαστούν με μεγάλη ακρίβεια οι κεραιές που εκπονούνται σε αυτή την διπλωματική εργασία.

1.2 Κίνητρα

Κινητήριοι παράγοντες συγγραφής αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε το ενδιαφέρον για κατανόηση των επίγειων δορυφορικών κεραιών με επαναπροσδιοριζόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας, αλλά και την δυνατότητα στρέψης του κύριου λοβού ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο (electronic scanning) και όχι με μηχανικό (mechanical beam-scanning). Είναι απαραίτητο για έναν δορυφόρο χαμηλής τροχιάς (LEO) η κεραία να έχει την δυνατότητα να τον στοχεύει κατά το μέγιστο δυνατό σε όλη την διάρκεια που παραμένει σε κοντινή απόσταση από την επιφάνεια της Γης. Η κεραία αυτή θα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι ικανή να εκπέμπει σε τόση μεγάλη απόσταση, δηλαδή χρειάζεται μεγάλο κατευθυντικό κέρδος αλλά και κυκλική πόλωση για την επικοινωνία αυτή. Η ενασχόληση με μία τέτοια κεραία όπως περιγράφηκε προηγουμένως αποτελεί μία πρόκληση, η οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστεί μέσα από μία εκτενή έρευνα και μελέτη για την συμπεριφορά τέτοιου είδους κεραιών.

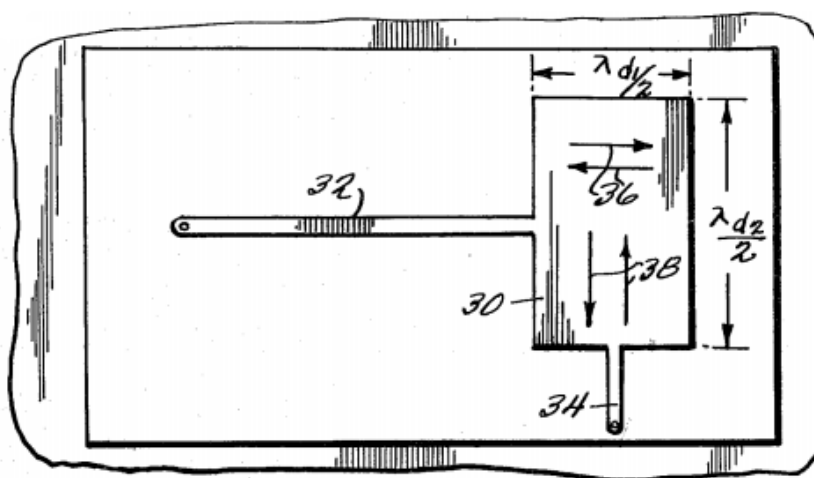
1.3 Στόχοι

Αρχικά, κύριος στόχος αποτελεί η κατανόηση των αναγκών μιας δορυφορικής ζεύξης ως προς το κομμάτι των κεραιών και πως αυτές μπορούν εν τέλει να σχεδιαστούν με την βοήθεια ενός ηλεκτρομαγνητικού προσομοιωτή (CST). Επιπλέον, στόχος αποτελεί η όσο το δυνατόν ακριβέστερη σχεδίαση των κεραιών με σκοπό να μην φέρουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με την πραγματικότητα, δηλαδή αν μια κεραία υλοποιηθεί και μετρηθεί μέσα σε έναν ανηχοϊκό θάλαμο να μην έχει σημαντικές αποκλίσεις σε κάποια βασικά χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα στην τιμή S_{11} και στο διάγραμμα ακτινοβολίας της.

1.4 Βιβλιογραφική έρευνα.

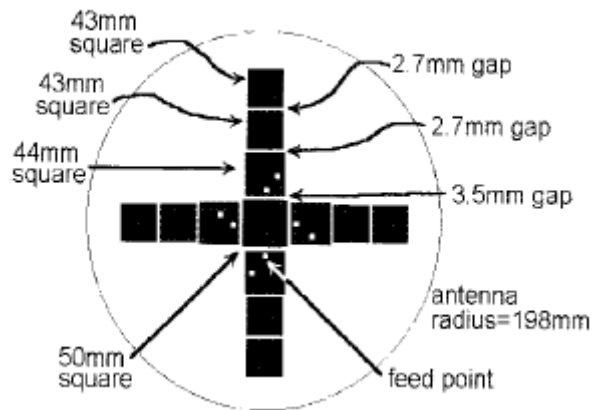
Στο παρελθόν, αρκετοί μεγάλοι επιστήμονες είχαν ασχοληθεί με τις μικροταινιακές κεραιές επιθέματος με σκοπό τις δορυφορικές, και όχι μόνο, επικοινωνίες. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαίο να γίνει μία σύντομη αναφορά στο σπουδαίο αυτό έργο που επιτελέσαν, κάνοντας γνωστή την συνεισφορά τους.

Αρχικά, ο πρώτος επιστήμονας όπου εισήγαγε τις κεραίες επιθέματος ήταν ο Dechamps [1] το έτος 1953, όμως ο επιστήμονας ο οποίος τις έκανε πραγματικότητα ονομάζεται Robert E. Munson [2], ο οποίος εργαζόταν στα αμερικάνικα αμυντικά συστήματα. Συγκεκριμένα, με την δημοσίευσή του, το έτος 1972 στην οποία παρουσιάζει την πρώτη κεραία επιθέματος η οποία θα τοποθετούνταν πάνω σε πύραυλο, λόγω της δομής της, η οποία ήταν αρκετά λεπτή χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στον περιορισμένο χώρο ενός πυραύλου, αλλά και στην αεροδυναμική του.



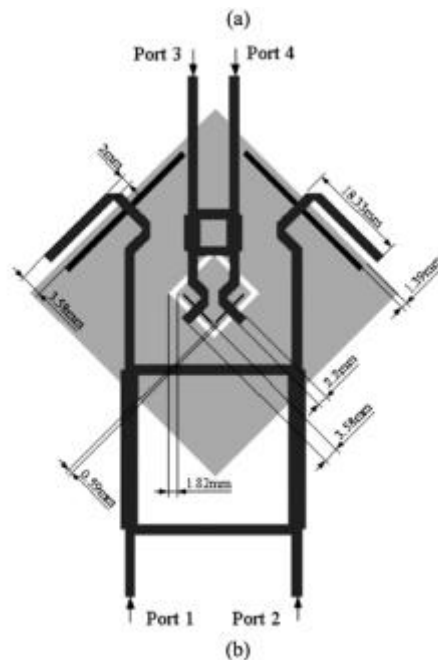
Σχήμα 1.1: Πρωταρχική[3] σχεδίαση κεραίας επιθέματος .

Το έτος 1998, οι επιστήμονες David Thiel, Derek Gray, Jun Wei Lu [4], κατάφεραν να σχεδιάσουν μία κεραία επιθέματος, η οποία βασίζεται στην δομή της γνωστής Yagi-Uda, δηλαδή ένα ενεργό στοιχείο περιτριγυρισμένο από παρασιτικά στοιχεία. Σκοπός αυτής της κεραίας ήταν να επιτευχθεί επίγεια επικοινωνία μέσω γεωστατικών δορυφόρων στην L και Ku μπάντα, για λογαριασμό της Αυστραλιανής εταιρίας Optus. Με την τοποθέτηση τριών παρασιτικών στοιχείων εκατέρωθεν του οριζόντιου και του κάθετου άξονα (σχήμα 1.2), ήταν δυνατή η στρέψη του κύριου λοβού ακτινοβολίας στο αζιμούθιο από 25° μέχρι και 75° μοίρες.



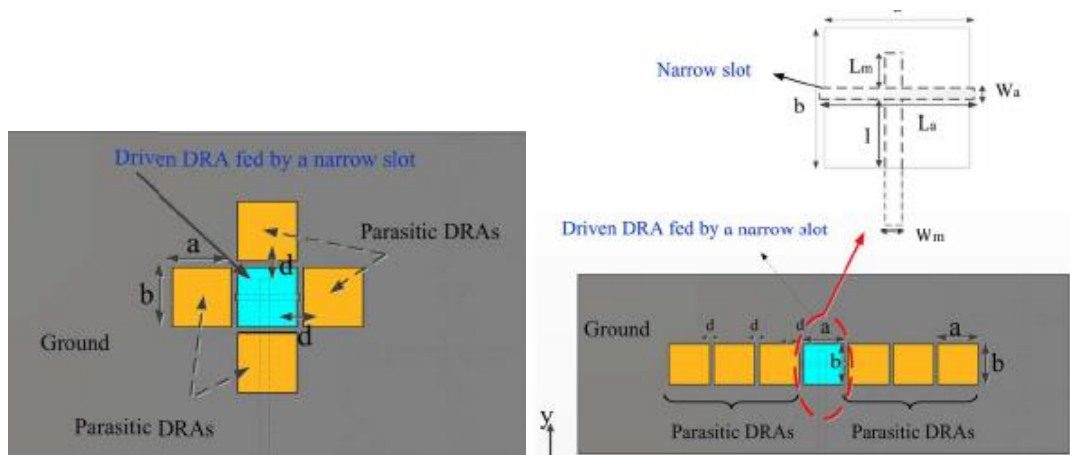
Σχήμα 1.2: Παρασιτική κεραία επιθέματος βασισμένη στην yagi-uda.

Στην συνέχεια, το έτος 2005, ο Γάλλος επιστήμονας Fabien Ferrero [5] μαζί με τους συνεργάτες του κατάφεραν να σχεδιάσουν μία κεραία η οποία είναι ικανή να λειτουργεί σε δύο διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων, στην X και στην L. Είναι ιδιαίτερα σπουδαίος ο τρόπος με τον οποίο σχεδίασε την κεραία, και αυτό γιατί τοποθέτησε δύο επιθέματα, το ένα μέσα στο άλλο (σχήμα 1.3), χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο τροφοδοσίας ισχύος της κεραίας με τέσσερις θύρες.



Σχήμα 1.3: Κεραία με δύο επιθέματα με σκοπό την λειτουργία σε 2 διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων.

Έπειτα, το έτος 2013 οι επιστήμονες Mohammad Ranjbar Nikkhah, J. Rashed-Mohassel, και Ahmed A. Kishk [6] σχεδίασαν μία κεραία επιθέματος η οποία δεν ήταν μία συνηθισμένη κεραία, και αυτό γιατί τοποθέτησαν πάνω στο ενεργό αλλά και στα παρασιτικά στοιχεία διηλεκτρικά υλικά (σχήμα 1.4), με πληθώρα θετικών αποτελεσμάτων, κάποια εκ των οποίων ήταν, η υψηλή απόδοση ακτινοβολίας και η αποφυγή επιφανειακών κυμάτων. Τα διηλεκτρικά αποτελούνταν από υλικό με υψηλή διηλεκτρική σταθερά ίση με 35,9 και διαστάσεις ίδιες με αυτές του εκάστοτε στοιχείου της κεραίας.



Σχήμα 1.4: αριστερά προς δεξιά, παρασιτική στοιχειοκεραία με τοποθέτηση ενός παρασιτικού στοιχείου σε κάθε πλευρά του ενεργού στοιχείου και τοποθέτηση εκατέρωθεν του ενεργού στοιχείου.

Το έτος 2014 οι επιστήμονες Dong Lee, Dae Chung και Seongmin Pyo [7] σχεδίασαν μία κεραία επιθέματος η οποία μπορεί να λειτουργεί με δύο πολώσεις, είτε LHCP είτε RHCP με την βοήθεια μίας διόδου p-i-n. Αναλυτικότερα, μέσα στην περιοχή του επιθέματος και συγκεκριμένα στις γωνίες του τοποθετήθηκαν ειδικά μπλοκ με το κάτω δεξιά να έχει ακόμη ένα μικρότερο μπλοκ μέσα του (σχήμα 1.5). Έτσι με τον κατάλληλο έλεγχο των δύο διόδων p-i-n καθίσταται δυνατή η αλλαγή στην πόλωση από RHCP σε LHCP και το αντίστροφο.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή στις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες

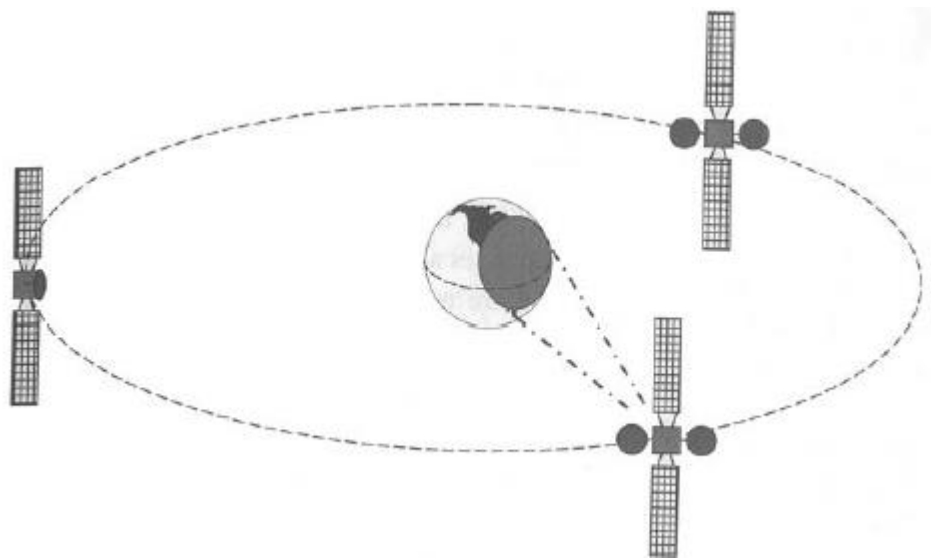
Οι δορυφορικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται πλέον σε καθημερινή βάση και αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι των ασύρματων επικοινωνιών, εξαιτίας της δυνατότητας ανταλλαγής πληροφορίας σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις, της τάξεως των χιλιάδων χιλιομέτρων. Σχεδόν όλη η τηλεοπτική κάλυψη παρέχεται από κάποιο δορυφόρο, φτάνοντας σήμερα απευθείας στο σπίτι από το διάστημα. Ακόμα και στην σημερινή εποχή των ευρυζωνικών καλωδίων οπτικών ινών και του Διαδικτύου, οι δορυφόροι εξακολουθούν να εξυπηρετούν τις βασικές τηλεπικοινωνιακές ανάγκες της πλειοψηφίας των χωρών σε όλο τον κόσμο. Για παράδειγμα, οι δορυφόροι έχουν βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα των υπηρεσιών του τηλεφωνικού συστήματος πετυχαίνοντας επικοινωνία σε περιπτώσεις που η κάλυψη κινητής τηλεφωνίας είναι αδύνατη. Ένα από τα κύρια οφέλη των δορυφορικών επικοινωνιών έχει αναπτυχθεί στον τομέα των έκτακτων αναγκών, όπως για παράδειγμα το 1985 λίγο μετά την εκτόξευση του Morelos 1, όπου ένας καταστροφικός σεισμός έπληξε την πόλη του Μεξικού με αποτέλεσμα οι επίγειες επικοινωνίες να διακοπούν ενώ οι δορυφόροι μετέδιδαν κανονικά. Οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών επικοινωνίας, έχοντας ως αποτέλεσμα ορισμένα αναγνωρισμένα πλεονεκτήματα. Αυτά προέρχονται από τη βασική φυσική του συστήματος, όπου συγκεκριμένα ένας δορυφόρος μπορεί να «βλέπει» μία σημαντική ποσότητα γεωγραφικής επιφάνειας. Επίσης, οι δορυφόροι χρησιμοποιούν μικροκυματικά ραδιοσήματα και ως εκ τούτου επωφελούνται από την ελευθερία των ασύρματων συνδέσεων. Αρκετά πλεονεκτήματα είναι αλληλένδετα, ενώ άλλα θα γίνουν πιο σημαντικά καθώς η τεχνολογία και οι εφαρμογές εξελίσσονται.

2.2 GEO και LEO τροχιές στις δορυφορικές επικοινωνίες

2.2.1 GEO δορυφόροι

Ένας δορυφόρος επικοινωνιών είναι ένας σταθμός αναμετάδοσης μικροκυμάτων που επιτρέπει σε δύο ή περισσότερους χρήστες, με κατάλληλους

επίγειους σταθμούς, την λήψη ή την αποστολή της πληροφορίας. Ένας δορυφόρος σε μια γεωστατική Γήινη τροχιά (GEO) περιστρέφεται γύρω από τη Γη στο επίπεδο της στον ισημερινό μία φορά ανά 24 ώρες, διατηρώντας τον ακριβή συγχρονισμό με τη περιστροφή της Γης. Επίσης, υπάρχουν δύο άλλες τάξεις 24ωρων τροχών: η γεωσύγχρονη τροχιά και η εξαιρετικά ελλειπτική σύγχρονη τροχιά. Και οι δύο περιλαμβάνουν δορυφόρους που φαίνεται να κινούνται σε σχέση με ένα σταθερό σημείο στη Γη. Είναι γνωστό ότι ένα σύστημα τριών δορυφόρων σε τροχιά GEO χωρισμένοι σε 120 μοίρες γεωγραφικού μήκους, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1, μπορούν να λαμβάνουν και να στέλνουν ραδιοσήματα σε όλα σχεδόν τα κατοικημένα τμήματα στην υδρόγειο, (οι μικρές περιοχές γύρω από τους Βόρειους και Νότιους πόλους - άνω των 81° NL και κάτω από 81° SL-δεν καλύπτονται). Ένας τυπικός δορυφόρος GEO έχει μια περιοχή κάλυψης, που απεικονίζεται από το σκιασμένο ωοειδές, μέσα στο οποίο μπορούν να επικοινωνούν οι επίγειοι σταθμοί με τον δορυφόρο. Η απόσταση του χρήστη με τον δορυφόρο είναι περίπου 36.000 χλμ., γεγονός που καθιστά τον σχεδιασμό της ραδιοσύζευξης αρκετά αυστηρή με σκοπό την παροχή επαρκούς ισχύος στο λαμβανόμενο σήμα.



Σχήμα 2.1: Γεωγραφικό αποτύπωμα γεωστατικών δορυφόρων στην επιφάνεια της Γης.

Επίσης, αυτή η απόσταση εισάγει καθυστέρηση διάδοσης περίπου ενός τετάρτου του δευτερολέπτου για μία μόνο αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ ενός ζεύγους χρηστών.

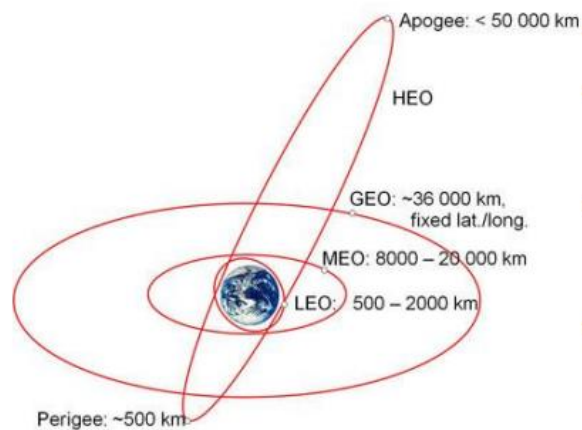
Η τροχιά τύπου GEO είναι η ιδανική περίπτωση ολόκληρης της κατηγορίας των γεωσυγχρονισμένων (ή σύγχρονων) τροχιών, οι οποίες έχουν όλοι περίοδο επανάληψης 24 ωρών, αλλά συνήθως έχουν κλίση σε σχέση με τον ισημερινό και / ή ελλειπτικό σχήμα. Όπως φαίνεται από τη Γη, ένας συγχρονισμένος δορυφόρος σε κεκλιμένη τροχιά φαίνεται να παρεκκλίνει κατά τη διάρκεια μιας ημέρας επάνω και κάτω από την κανονική του θέση στον ουρανό. Ενώ είναι ιδανικό, η κυκλική GEO δεν είναι σε σταθερή διάταξη και η κλίση αυξάνεται φυσικά με το χρόνο. Η κλίση ελέγχεται με τη χρήση ειδικού συστήματος προώθησης επί του οχήματος με αρκετό καύσιμο για διορθώσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του δορυφόρου. Ο δορυφόρος που δεν προορίζεται για λειτουργία GEO μπορεί να ξεκινήσει με σημαντικά λιγότερο βοηθητικό καύσιμο για το σκοπό αυτό. Κλίση τροχιάς μεγαλύτερη από 0,1 μοίρα συνήθως δεν είναι αποδεκτή για εμπορική χρήση εκτός εάν οι επίγειες κεραίες μπορούν αυτόματα να “στοχεύουν” τον δορυφόρο όπως μετακινείται. Η στόχευση με μηχανικό τρόπο είναι η πιο πρακτική προσέγγιση, αλλά υπάρχουν και συστήματα τα οποία στρέφουν τον λοβό ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται συστήματα διεύθυνσης και είναι διαθέσιμα για εξειδικευμένες εφαρμογές όπως τα αεροναυτικά κινητά τηλέφωνα.

2.2.2 LEO δορυφόροι

Οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς λειτουργούν σε αποστάσεις 1.500 km ή λιγότερο (εύρος από 1.500 έως περίπου 7.000 χλμ. δεν είναι κατάλληλοι για τηλεπικοινωνίες λόγω της ζώνης Van Allen), ενώ διαφέρουν αρκετά ως προς την λειτουργία τους σε σχέση με τους δορυφόρους σε τροχιά GEO. Κάποια από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά τους είναι τα εξής:

- Υψηλή ταχύτητα σε αποστάσεις κοντά στην Γη λόγω των επιδράσεων της βαρύτητας. Η ταχύτητα που μπορεί αναπτύξει ο δορυφόρος ανέρχεται στα 8 km/sec και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για μία πλήρη περιστροφή αγγίζει περίπου τα 90 λεπτά, συναρτήσκει βέβαια με την απόστασή του από την Γη.
- Στην χαμηλή τροχιά ο επίγειος σταθμός και ο δορυφόρος βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, γεγονός που καθιστά χαμηλότερες απώλειες διαδρομής σε σχέση με έναν GEO δορυφόρο.

- Η καθυστέρηση RTT για τα ραδιοσήματα είναι αισθητά λιγότερη συγκριτικά με δορυφόρους γεωστατικής τροχιάς, ωστόσο ο πραγματικός χρόνος καθυστέρησης εξαρτάται από κάποιες παραμέτρους όπως, α) η απόσταση του δορυφόρου και β) η θέση του χρήστη αναφορικά με την θέση του δορυφόρου.
- Λιγότερη ενέργεια απαιτείται για την ραδιοζεύξη μεταξύ δορυφόρων χαμηλής τροχιάς σε σχέση με αυτών των υψηλότερων τροχιών, οπότε αποφεύγεται η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 2.2 Σύγκριση αποστάσεων[35] των δορυφόρων από την επιφάνεια της Γης.

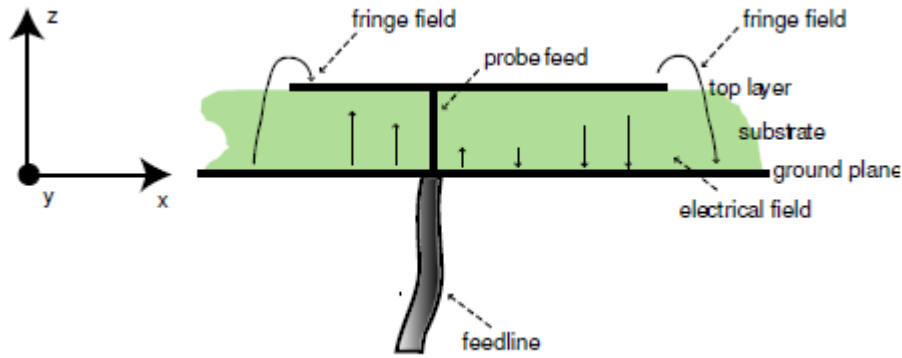
Οι δορυφόροι LEO μειώνουν την καθυστέρηση αλλά υπάρχει ένα τίμημα. Πρώτον, λόγω μικρής απόστασης από την Γη, τα αποτυπώματα των δορυφόρων είναι πολύ μικρά. π.χ. για το υψόμετρο των 1.200 χλμ και γωνία ανύψωσης 10 μοίρες, το ποσοστό κάλυψης είναι 4,2% [36]. Αυτό ωθεί στη χρήση ενός μεγαλύτερου αριθμού δορυφόρων. Αν θέλουμε να αποφύγουμε επίγεια δίκτυα επικοινωνίας μεταξύ δύο επίγειων σταθμών βάσεων, πρέπει να χρησιμοποιηθούν δια-δορυφορικοί σύνδεσμοι, δημιουργώντας ένα δίκτυο ενδομεταφορών. Δεύτερον, το χαμηλότερο υψόμετρο μειώνει την διάρκεια της τροχιάς, πράγμα που σημαίνει ότι οι δορυφόροι κινούνται συνεχώς σε σχέση με την επιφάνεια της γης και συνήθως με αντίθετη κατεύθυνση τροχιάς. Τα αποτελέσματα είναι συχνές μεταβιβάσεις, ακόμη και αν ο σταθμός είναι σταθερός, και υπάρχουν δυναμικές μεταβολές στις αποστάσεις μεταξύ των δορυφόρων. Αυτά τα πράγματα συγκαταλέγονται στις κυριότερες νέες προκλήσεις δικτύωσης στην δημιουργία δικτύου τηλεπικοινωνιών που συνδέει δορυφόρους LEO.

2.3 Μικροταινιακή τεχνολογία στις δορυφορικές επικοινωνίες.

Μία μικροταινιακή κεραία ή αλλιώς κεραία επιθέματος (patch) είναι μια κεραία χαμηλού προφίλ που έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες κεραίες: είναι ελαφριά, φθηνή, και ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως τα LNA και τα SSPA μπορούν να ενσωματωθούν με αυτές τις κεραίες αρκετά εύκολα. Ενώ η κεραία μπορεί να είναι σε 3-D δομή (τυλιγμένη γύρω από έναν κύλινδρο, για παράδειγμα), είναι συνήθως επίπεδη, οπότε για το λόγο αυτό οι κεραίες επιθέματος αναφέρονται μερικές φορές ως επίπεδες κεραίες.

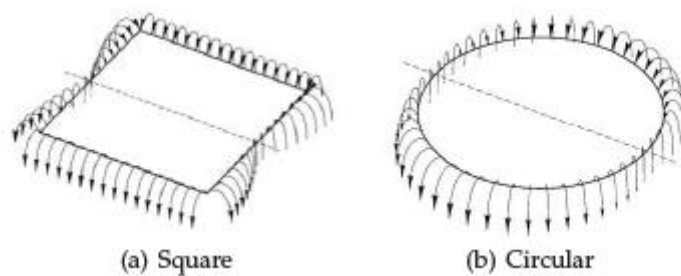
Το σχήμα 2.3 δείχνει μια κεραία επιθέματος στη βασική της μορφή: ένα επίπεδο υπόστρωμα πάνω από ένα επίπεδο γείωσης. Αυτή η κεραία είναι κατασκευασμένη από υλικό τυπωμένου κυκλώματος (χαλκός) και το υπόστρωμα αποτελεί το διηλεκτρικό της κεραίας. Η απόσταση μεταξύ του επιθέματος και του επιπέδου γείωσης h καθορίζει το εύρος ζώνης. Ένα παχύτερο υπόστρωμα αυξάνει το κέρδος σε κάποιο βαθμό, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα όπως, η διέγερση επιφανειακών κυμάτων, τα οποία μειώνουν την απόδοση και διαταράσσουν το διάγραμμα ακτινοβολίας. Το επίπεδο της γείωσης θα πρέπει να εκτείνεται πέρα από τις άκρες του επιθέματος τουλάχιστον κατά 2 έως 3 φορές το πάχος της πλακέτας για την σωστή λειτουργία. Κάνοντας το επίπεδο γείωσης μεγαλύτερο αυξάνεται επίσης το κέρδος, αλλά αυξάνοντας το μέγεθος ενός ήδη "μεγάλου" επιπέδου γείωσης, επιτυγχάνεται πολύ μικρή επίδραση στο κέρδος.

Στην κεραία του σχήματος 2.3, ο κεντρικός αγωγός μιας ομοαξονικής γραμμής χρησιμεύει ως γραμμή μεταφοράς της ραδιοσυχνότητας (RF) ισχύος για την ζεύξη της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσα από την κεραία. Ο κεντρικός αγωγός του ομοαξονικού καλωδίου τοποθετείται κάθετα ως προς την διάταξη της κεραίας, περνώντας ουσιαστικά μέσα από το διηλεκτρικό υπόστρωμα με κατάληξη στην πλευρά που βρίσκεται τυπωμένη η κεραία. Το σημείο στο οποίο θα γίνει η επαφή είναι προκαθορισμένο και όχι τυχαίο διότι από αυτό εξαρτώνται σημαντικά γνωρίσματα / χαρακτηριστικά για την σωστή λειτουργία της κεραίας όπως η πόλωση και η σύνθετη αντίσταση εισόδου.



Σχήμα 2.3 Παράδειγμα δομής μίας τυπικής κεραίας επιθέματος.

Μία κεραία επιθέματος μισού μήκους κύματος $\lambda/2$ λειτουργεί σε αυτό που ονομάζουμε θεμελιώδη λειτουργία, το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν στο κέντρο του επιθέματος, μέγιστο (θετικό) στη μία πλευρά και ελάχιστο (αρνητικό) στην αντίθετη πλευρά. Αυτά τα ελάχιστα και τα μέγιστα αλλάζουν συνεχώς πλευρά όπως η φάση του ραδιοσυχνοτικού (RF) σήματος. Το ηλεκτρικό πεδίο δεν σταματάει απότομα κοντά στις άκρες του επιθέματος, αλλά εκτείνεται πέρα από την εξωτερική περιφέρεια. Αυτές οι επεκτάσεις πεδίων είναι γνωστές ως πεδία κροσσών (fringing fields) τα οποία κάνουν το επίθεμα να ακτινοβολεί, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 2.4 Αναπαράσταση των fringing fields σε τετράγωνο αλλά και σε κυκλικό επίθεμα.

Η θεμελιώδη λειτουργία του ορθογώνιου επιθέματος συχνά συμβολίζεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία των κοιλοτήτων όπως η λειτουργία TM_{10} . Αυτός ο συμβολισμός TM συχνά οδηγεί σε σύγχυση και αυτό συμβαίνει διότι όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 χρησιμοποιείται ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπου οι

άξονες x και y είναι παράλληλοι με το επίπεδο της γείωσης και ο άξονας z είναι κάθετος σε αυτό. Το TM αντιπροσωπεύει μια κατανομή μαγνητικού πεδίου μεταξύ του επιθέματος και του επιπέδου της γείωσης που είναι εγκάρσια στον άξονα z της κεραίας. Αυτό το «εγκάρσιο» σε σχέση με τον άξονα z συνήθως ταυτίζονται επειδή τα μαγνητικά πεδία στις κεραίες είναι πάντα εγκάρσια ως προς τον άξονα z τους. Έτσι, μπορούμε να απλοποιήσουμε τα πράγματα και να εξετάσουμε μόνο τρία χαρακτηριστικά του πεδίου αντί για έξι, το ηλεκτρικό πεδίο στην κατεύθυνση z, και τα χαρακτηριστικά του μαγνητικού πεδίου στις κατευθύνσεις x και y.

2.3.1 Διαστάσεις κεραίας επιθέματος

Το μήκος συντονισμού (ο άξονας x στο σχήμα 2.3) καθορίζει τη συχνότητα συντονισμού και είναι $\lambda_d/2$ για μία ορθογώνια κεραία επιθέματος που διεγείρεται στη θεμελιώδη λειτουργία, όπου το λ_d είναι το μήκος κύματος στην PCB πλακέτα. Το επίθεμα στην πραγματικότητα είναι λίγο μεγαλύτερο ηλεκτρικά σε σχέση με τις φυσικές του διαστάσεις λόγω των πεδίων κροσσών. Η διαφορά μεταξύ του ηλεκτρικού και του φυσικού μεγέθους είναι κυρίως εξαρτημένη από το πάχος της PCB πλακέτας και την διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υποστρώματος.

Μια καλή προσέγγιση για το μήκος συντονισμού είναι:

$$L \approx 0.49 \lambda_d = 0.49 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} .$$

σχέση 2.1

Αυτός ο τύπος περιλαμβάνει μια διόρθωση πρώτης τάξης για την επέκταση άκρου λόγω των πεδίων κροσσών, με:

- L = μήκος συντονισμού
- λ_d = μήκος κύματος στην PCB πλακέτα
- λ_0 = μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο
- ϵ_r = διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υποστρώματος

Άλλες παράμετροι που έχουν μικρότερη επιρροή στη συχνότητα συντονισμού είναι:

- Το μέγεθος του επιπέδου της γείωσης
- Το πάχος του χαλκού και του διηλεκτρικού υποστρώματος
- Πλάτος του επιθέματος.

2.3.2 Συχνότητα συντονισμού

Γενικά, οι μικροταινιακές κεραίες είναι δομές μισού μήκους κύματος και λειτουργούν στη θεμελιώδη λειτουργία συντονισμού TM₀₁ ή TM₁₀, με συχνότητα συντονισμού που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}}$$

σχέση 2.2

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει μόνο για ορθογώνια μικροταινιακή κεραία με ένα λεπτό διηλεκτρικό υπόστρωμα, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, L είναι το μήκος της κεραίας, και ϵ_r είναι η σχετική επιτρεπτότητα του διηλεκτρικού υποστρώματος. Από την σχέση (από πάνω) διαπιστώνεται ότι το μήκος συντονισμού είναι αντιστρόφως ανάλογο με την επιτρεπτότητα του υλικού που απαρτίζει το διηλεκτρικό υπόστρωμα, ως εκ τούτου η χρήση διηλεκτρικών υποστρωμάτων με σχετικά μεγάλη επιτρεπτότητα μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερου φυσικού μήκους κεραίες σε σταθερή συχνότητα λειτουργίας. Αν η μικροταινιακή κεραία είναι κυκλική και με a συμβολίσουμε την ακτίνα του επιθέματος, h το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος τότε η συχνότητα συντονισμού προσαρμόζεται ως εξής:

$$f_r \cong \frac{\chi_{11}c}{2a_{eff}\sqrt{\epsilon_r}}$$

σχέση 2.3

όπου,

$$a_{eff} = L \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

σχέση 2.4

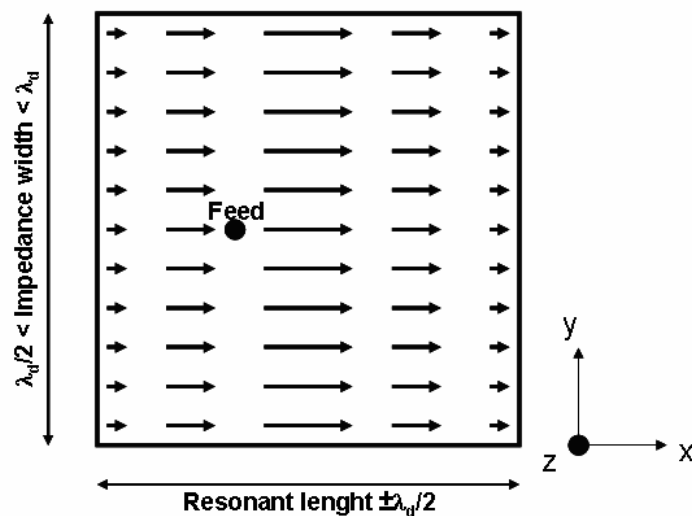
και

$$\chi_{11} = 1.841$$

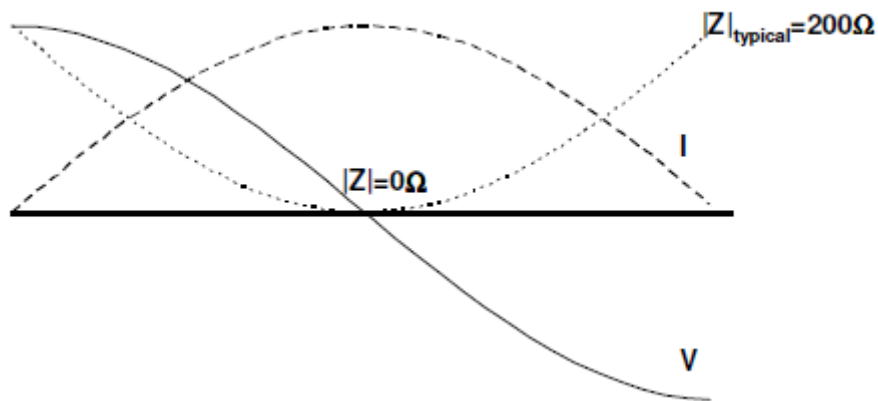
σχέση 2.5

2.3.2 Προσαρμογή της σύνθετης χαρακτηριστικής αντίστασης

Η θέση τροφοδοσίας μίας κεραίας επίθεματος που διεγείρεται στη βασική της λειτουργία είναι συνήθως τοποθετημένη στο κέντρο της κατεύθυνσης του πλάτους (άξονας y) και κάπου κατά μήκος του διαστήματος συντονισμού στην κατεύθυνση του μήκους (άξονας x). Η ακριβής θέση κατά μήκος του μήκους συντονισμού είναι καθορισμένη από την κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο επίθεμα. Κοιτάζοντας το μαγνητικό πεδίο και το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του επιθέματος, το ρεύμα έχει μέγιστο στο κέντρο και ελάχιστο κοντά στην αριστερή και δεξιά άκρη, καθώς το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν στο κέντρο, μέγιστο κοντά στα αριστερά άκρα και ελάχιστο κοντά στα δεξιά άκρα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η κατανομή πεδίων συνεχώς μεταβάλλεται σε πλάτος. Τα σχήματα 2 και 3 παρακάτω διευκρινίζουν τα εξής:



Σχήμα 2.5 Τετράγωνο επίθεμα το οποίο τροφοδοτείται με την τεχνική probe fed στο κατάλληλο σημείο με στόχο την επίτευξη της καλής προσαρμογής της κεραίας με την γραμμή μεταφοράς.



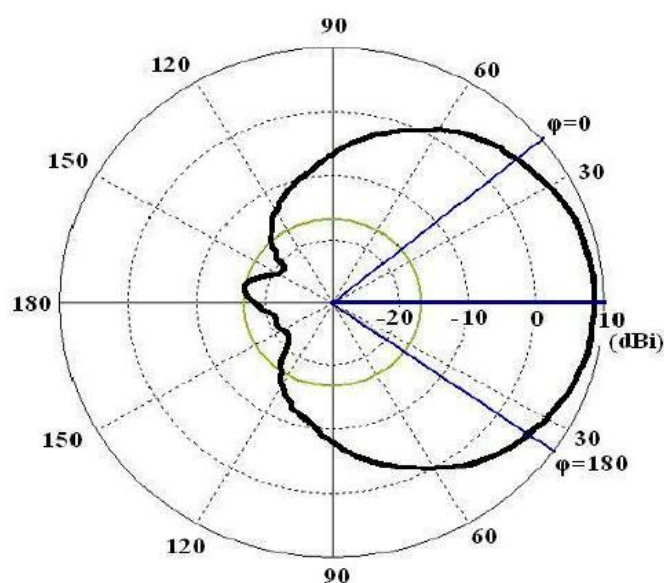
Σχήμα 2.6 Γραφική αναπαράσταση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης.

Από το μέγεθος του ρεύματος και της τάσης, μπορούμε να αντιληφθούμε ότι η σύνθετη αντίσταση είναι ελάχιστη (θεωρητικά μηδέν Ω) στο κέντρο του επιθέματος και μέγιστη κοντά στις άκρες του. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν δύο σημεία όπου η αντίσταση είναι 50Ω κάπου κατά μήκος του άξονα συντονισμού (x) του στοιχείου και αυτό είναι συνήθως το σημείο τροφοδοσίας της κεραίας. Η δυνατότητα να συνδεθεί στο επίθεμα σε άλλα σημεία με άλλη τιμή σύνθετης αντίστασης είναι πολύ χρήσιμο, ενώ αντίσταση μέχρι και 200Ω είναι πολύ συχνή. Για παράδειγμα, μπορεί να τροφοδοτηθεί μία στοιχειοκεραία δύο στοιχείων με μια απλή παράλληλη τροφοδοσία προσαρμόζοντας τα μεμονωμένα στοιχεία στα 100Ω , έχοντας ως αποτέλεσμα τα μεμονωμένα στοιχεία να είναι στα 50Ω , συνδέοντάς τα παράλληλα, χωρίς την ανάγκη μετατροπών σύνθετης αντίστασης. Το ίδιο ισχύει για μια συστοιχία 4 στοιχείων με τα στοιχεία να συνδέονται στα σημεία που υπάρχει 200Ω αντίσταση. Εάν θέλαμε να συνδέσουμε την τροφοδοσία στην άκρη της κεραίας και αναζητούσαμε συγκεκριμένη αντίσταση, θα μπορούσαμε να τροποποιήσουμε το πλάτος της κεραίας για να αποδοθεί η σύνθετη αντίσταση που επιθυμούμε, οπότε με αυτό τον τρόπο η αύξηση του πλάτους μειώνει τη σύνθετη αντίσταση.

2.4 Παράμετροι κεραιών επιθέματος

2.4.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Μια κεραία επιθέματος ακτινοβολεί την ισχύ σε ορισμένες κατευθύνσεις και λέμε ότι η κεραία έχει κατευθυντικότητα (συνήθως εκφράζεται σε dBi). Αν η κεραία είχε 100% απόδοση ακτινοβολίας, όλη η κατευθυντικότητα θα μετατρεπόταν σε κέρδος. Τα τυπικά $\lambda/2$ επιθέματα έχουν καλή απόδοση, η οποία κυμαίνεται πάνω από το 90%. Η ορθογώνια κεραία επιθέματος που έχει διεγερθεί στη βασική της λειτουργία έχει μέγιστη κατευθυντικότητα στην κατεύθυνση που είναι κάθετη προς το επίπεδο του επιθέματος (άξονας z). Η κατευθυντικότητα μειώνεται όταν μετακινούμαστε σε χαμηλότερες ανυψώσεις (elevations). Το εύρος δέσμης 3 dB είναι το πλάτος στο οποίο το κέρδος της ακτίνας μειώνεται κατά 3 dB σε σχέση με το κέρδος της κύριας ακτίνας.



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας επιθέματος.

Μέχρι στιγμής, η κατευθυντικότητα έχει οριστεί σε σχέση με έναν ισότροπο ακτινοβολητή. Ένας ισότροπος ακτινοβολητής εκπέμπει ίσες ποσότητες ενέργειας προς όλες τις κατευθύνσεις και δεν έχει κατευθυντικότητα. Η κατευθυντικότητα της κεραίας μπορεί επίσης να καθοριστεί σε σχέση με αυτή του δίπολου. Ένα δίπολο έχει 2,15 dBi κατευθυντικότητα σε σχέση με έναν ισοτροπικό ακτινοβολητή.

2.4.2 Πόλωση

Το επίπεδο στο οποίο μεταβάλλεται το ηλεκτρικό πεδίο είναι επίσης γνωστό ως το επίπεδο πόλωσης. Μέχρι στιγμής, γίνεται ανάλυση στη βασική δομή της κεραίας επιθέματος η οποία είναι γραμμικά πολωμένη αφού το ηλεκτρικό πεδίο ποικίλλει σε μόνο μία κατεύθυνση. Αυτή η πόλωση μπορεί να είναι είτε κάθετη είτε οριζόντια ανάλογα τον προσανατολισμό της κεραίας. Το επίπεδο πόλωσης είναι το επίπεδο xz στο σχήμα 2.3. Για την μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος, οι κεραίες μετάδοσης και λήψης πρέπει να έχουν την ίδια ακριβώς πόλωση. Η κεραία που περιεγράφηκε παραπάνω έχει οριζόντια πόλωση και όταν περιστρεφεί κατά 90° , το ρεύμα ρέει στο κατακόρυφο επίπεδο και η κεραία γίνεται κατακόρυφα πολωμένη.

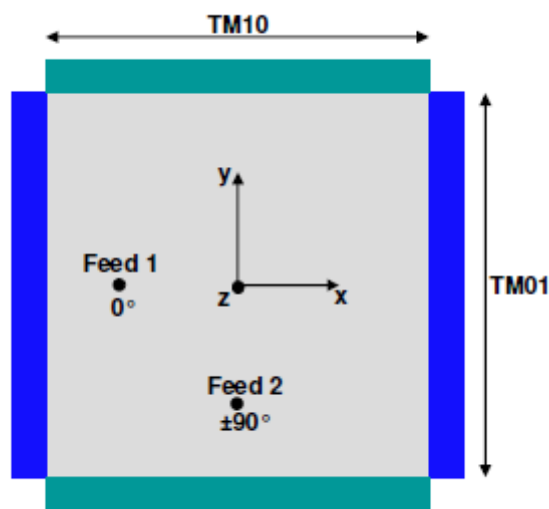
Σε έναν μεγάλο αριθμό ασύρματων εφαρμογών, όπως οι δορυφορικές επικοινωνίες, οι κεραίες δεν λειτουργούν σωστά με την γραμμική πόλωση επειδή ο σχετικός προσανατολισμός των κεραιών είναι άγνωστος αλλά και λόγω της περιστροφής του Faraday. Αναφορικά έχει παρατηρηθεί ότι όταν ένα επίπεδο πολωμένο φως υπάρχει σε ένα οπτικά λεπτό υλικό και παραμένει μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο παράλληλο ως προς την διάδοση του φωτός, το επίπεδο της πόλωσης μεταβάλλεται. Σε τέτοιες δορυφορικές εφαρμογές, όπως οι δορυφορικές επικοινωνίες, η κυκλική πόλωση είναι η πιο αποτελεσματική, διότι είναι ανεξάρτητη από τον γεωγραφικό προσανατολισμό της κεραίας. Σε μια κυκλικά πολωμένη κεραία, το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται σε δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις (x και y) με το ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης 90° . Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η ταυτόχρονη διέγερση δύο λειτουργιών (TM modes), δηλαδή της TM_{10} (x διεύθυνση) και της λειτουργίας TM_{01} (κατεύθυνση y). Μία από τις δύο λειτουργίες είναι διεγερμένη με διαφορά φάσης 90° σε σχέση με την άλλη λειτουργία. Μια κεραία κυκλικά πολωμένη μπορεί επίσης να είναι δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένη (RHCP) ή αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένη (LHCP). Η κεραία είναι δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένη (RHCP) όταν οι φάσεις είναι 0° και -90° για την κεραία στο Σχήμα 2.5 όταν αυτή είναι ακτινοβολεί προς τον άξονα z , ενώ είναι αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένη (LHCP) όταν οι φάσεις είναι 0° και $+90^\circ$.

Για να πετύχουμε κυκλική πόλωση σε μία κεραία επιθέματος πρέπει να πληρούνται τα παρακάτω κριτήρια:

- Διαχωρισμός του σήματος σε δύο ίσα μέρη.

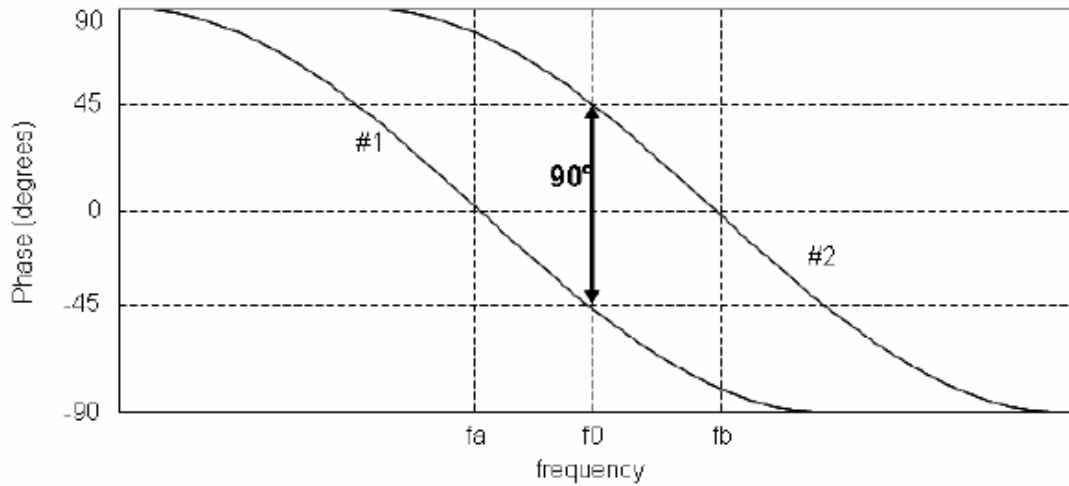
- Τροφοδοσία ενός σήματος στον οριζόντιο άξονα (άξονας x) και το άλλο στον κάθετο άξονα (άξονας y).
- Αλλαγή της φάση ενός εκ των δύο σημάτων κατά 90° .

Η διάσπαση του σήματος σε δύο ίσα μέρη μπορεί να επιτευχθεί με έναν διαίρετη ισχύος Wilkinson ή κάποιον άλλο διαχωριστή. Αν μία τετράγωνη κεραία επιθέματος τροφοδοτείται με δύο σημεία τροφοδοσίας όπως στο σχήμα 2.8 και με μία διαφορά φάσης 90° σε μία από τις δύο γραμμές τροφοδοσίας, επιτυγχάνεται μια κυκλικά πολωμένη κεραία.

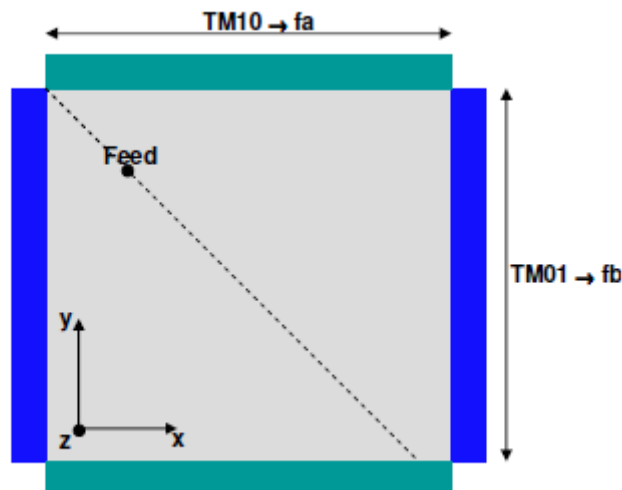


Σχήμα 2.8 Επίτευξη κυκλικής πόλωσης με την τροφοδοσία της κεραίας σε δύο σημεία.

Παρόλο που το προαναφερθέν σύστημα λειτουργεί καλά, ο διαχωριστής και η γραμμή καθυστέρησης καταλαμβάνουν πολύτιμο χώρο, εισάγουν απώλειες, τείνουν να ακτινοβολούν και μπορεί να μεταβάλλουν αρνητικά το διάγραμμα ακτινοβολίας. Μια διαφορετική προσέγγιση βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε λειτουργία (TM10, TM01) συμπεριφέρεται όπως ένα παράλληλο κύκλωμα συντονισμού RLC. Αν τροποποιηθούν κατάλληλα οι διαστάσεις x και y του επιθέματος, θα υπάρξουν δύο διαφορετικές συχνότητες συντονισμού f_a και f_b και θα προκύψουν δύο διαφορετικά κυκλώματα RLC. Αυτό δημιουργεί μια αλλαγή μετατόπισης φάσης σε σχέση με τη συχνότητα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Επίσης, αν επιλεγθούν με προσοχή αυτές οι δύο συχνότητες συντονισμού, θα υπάρξει μία μπάντα συχνοτήτων στην οποία η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυκλωμάτων RLC θα είναι 90° .



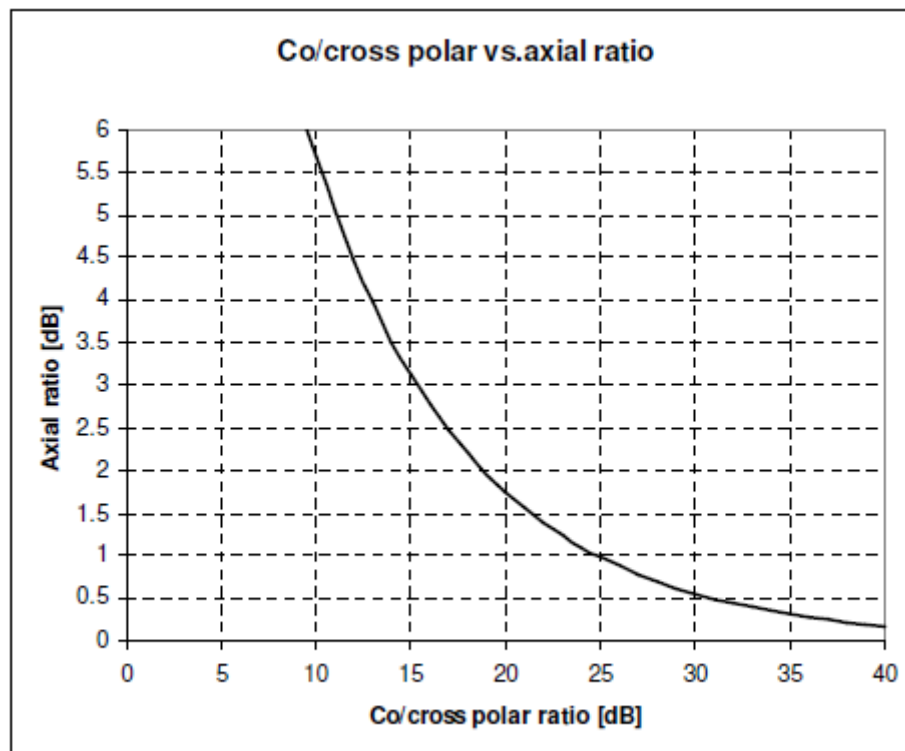
Σχήμα 2.9 Γραφική αναπαράσταση της φάσης με την συχνότητα, στην οποία φαίνεται ότι μεταξύ των συχνοτήτων f_a και f_b επιτυγχάνεται διαφορά φάσης 90° .



Σχήμα 2.10 Επίτευξη κυκλικής πόλωσης και την τροφοδοσία της κεραίας στην διαγώνιο.

Ένας τρόπος να εφαρμοστεί αυτό είναι όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10, δηλαδή αυτό το σχεδόν τετραγωνικό επίθεμα έχει ελαφρώς διαφορετικές διαστάσεις στον άξονα x και y . Αυτό προκαλεί τη διέγερση δύο ορθογώνιων λειτουργιών μαζί με την απαιτούμενη μετατόπιση φάσης 90° . Τροφοδοτώντας την κεραία κοντά στη διαγώνιο χωρίζεται στο μισό η ισχύ μεταξύ των δύο ορθογώνιων λειτουργιών, οπότε με αυτόν τον τρόπο και οι τρεις απαραίτητες απαιτήσεις ικανοποιούνται ώστε να επιτευχθεί κυκλική πόλωση.

Η ποιότητα της κυκλικής πόλωσης εκφράζεται συνήθως ως η αξονικός λόγος (AR) και εκφράζεται σε dB. Μια αξονική αναλογία 3 dB θεωρείται επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές. Δεδομένου ότι η διαφορά φάσης μεταξύ των λειτουργιών διαφέρει ανάλογα με τη συχνότητα, είναι σαφές ότι ο λόγος της αξονικής αναλογίας ποικίλει με τη συχνότητα, και έχει επίσης ένα θεωρητικό βέλτιστο 0 dB ακριβώς μεταξύ των δύο συχνοτήτων συντονισμού των δύο ορθογώνιων λειτουργιών. Η ποιότητα της κυκλικής πόλωσης μπορεί εξίσου να εκφραστεί με την εμφάνιση των co/cross πολικά προτύπων ακτινοβολίας. Το μοντέλο συν-πολωτικής ακτινοβολίας είναι το διάγραμμα ακτινοβολίας της επιθυμητής πόλωσης και το διάγραμμα σταυρωτής πολικής (ορθοπολωτικής) ακτινοβολίας είναι το διάγραμμα της ανεπιθύμητης αντίθετης πόλωσης. Η συμπεριφορά τους συχνά ποσοτικοποιείται με την χρήση του λόγου co / cross polar ($20\log(\text{co} / \text{cross})$) και εκφράζεται σε dB.



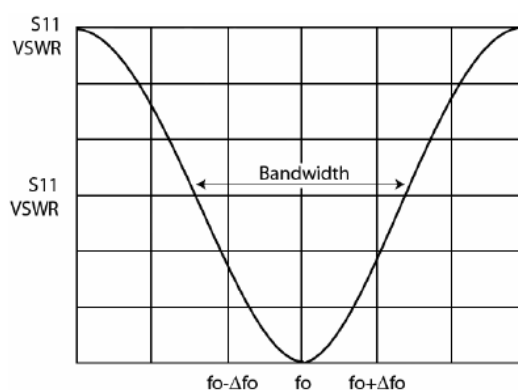
Σχήμα 2.11 Διάγραμμα co/cross polar vs axial ratio στο οποίο φαίνεται κατά το πόσο η κεραία έχει κυκλική πόλωση.

2.4.3 Εύρος ζώνης λειτουργίας

Μια άλλη εξίσου σημαντική παράμετρος μιας κεραίας είναι το εύρος ζώνης που καλύπτει. Βέβαια τις περισσότερες φορές μόνο η αντίσταση ή ο λόγος του

στάσιμου κύματος (VSWR) λαμβάνονται υπόψιν. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι υπάρχουν αρκετοί άλλοι ορισμοί του εύρους ζώνης: εύρος ζώνης κατευθυντικότητας, εύρος ζώνης πόλωσης και εύρος ζώνης απόδοσης. Η κατευθυντικότητα και η αποδοτικότητα συχνά συνδυάζονται με σκοπό να επιτευχθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Το εύρος ζώνης της σύνθετης αντίστασης εισόδου μιας κεραίας εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων που σχετίζονται με το επίθεμα, όπως ο συντελεστής ποιότητας Q και ο τύπος τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται. Στο σχήμα 2.12 φαίνεται ο λόγος του στάσιμου κύματος μιας κεραίας επιθέματος. Το εύρος ζώνης σύνθετης αντίστασης ενός τετράγωνου και $\lambda/2$ επιθέματος περιορίζεται συνήθως από 1 έως 5% και αυτό είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα κεραιών τέτοιου είδους.



Σχήμα 2.12 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} , όπου απεικονίζεται το εύρος ζώνης, το οποίο αποτελείται από όλες τις συχνότητες στις οποίες η τιμή της σκέδασης είναι < -10 dB.

2.4.3 Μέθοδοι τροφοδοσίας της κεραίας.

Μέχρι στιγμής ο τρόπος που τροφοδοτείται η κεραία είναι με την απευθείας σύνδεση του ομοαξονικού καλωδίου στην κεραία, πχ στην διαγώνιό της, όμως υπάρχουν και εναλλακτικοί τρόποι για να τροφοδοτηθεί μία κεραία με RF ισχύ. Ένας άλλος τρόπος είναι η τροφοδοσία της κεραίας με μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς στην άκρη του επιθέματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.14. Βέβαια με αυτή τη μέθοδο παρουσιάζεται υψηλή αντίσταση λόγω του ότι η τροφοδοσία πραγματοποιείται στα άκρα της κεραίας και μπορεί να φτάσει έως και μερικές εκατοντάδες Ohms. Από την άλλη, η θετική πλευρά της μεθόδου αυτής είναι ότι παρέχεται η δυνατότητα να τοποθετηθούν αρκετά κοντά, διάφορα κυκλώματα στο

ίδιο διηλεκτρικό υπόστρωμα και να αποφευχθεί η χρήση πολλαπλών διηλεκτρικών, αλλά παρέχεται και η δυνατότητα τα στοιχεία της κεραίας να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να συγκροτήσουν μία στοιχειοκεραία.



Σχήμα 2.13 Τροφοδοσία με κάθετη προβολή του ομοαξονικού καλωδίου στο επίθεμα (probe fed).

Μία άλλη πιο αποτελεσματική μέθοδος τροφοδοσίας της κεραίας αποτελεί η προσθήκη μίας μικροταινιακής γραμμής μεταφοράς είτε με εσοχή, είτε χωρίς, όπως ακριβώς φαίνεται και στο σχήμα 2.14β. Αναλυτικότερα, το σημείο τροφοδοσίας παραμένει το ίδιο όπως και στην πρώτη περίπτωση, και αυτό επιτυγχάνεται με δύο μικρές εσοχές αριστερά και δεξιά από την γραμμή μεταφοράς, βελτιώνοντας σημαντικά έτσι, την προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης της μικροταινιακής γραμμής με την σύνθετη αντίσταση εισόδου του επιθέματος.



Σχήμα 2.14 Τροφοδοσία επιθέματος με μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς, αριστερά χωρίς εσοχή, δεξιά με εσοχή.

Επίσης, μία ακόμη μέθοδος τροφοδοσίας αποτελεί η τεχνική της σύζευξης μέσω ανοίγματος / σχισμής, κατά την οποία απαιτούνται δύο διηλεκτρικά υποστρώματα, ένα στο οποίο είναι τυπωμένο το επίθεμα και ένα για την γραμμή μεταφοράς. Στο επίπεδο της γείωσης υπάρχει ένα κενό με την μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς να είναι κάθετη ως προς το κενό αυτό, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.15. Με την τεχνική αυτή αυξάνεται το εύρος ζώνης της σύνθετης αντίστασης.



Σχήμα 2.15 Τροφοδοσία με άνοιγμα σύζευξης, κατά την οποία δεν έρχονται σε άμεση επαφή η γραμμή μεταφοράς και το επίθεμα.

2.4.3.1 Ομοαξονικό καλώδιο μεταφοράς

Το ομοαξονικό καλώδιο αποτελείται από ένα μονωμένο κεντρικό σύρμα (εσωτερικός αγωγός ο οποίος φέρει ισχύ RF), τοποθετημένο μέσα σε ένα σωληνοειδή εξωτερικό αγωγό όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.16. Όπως είπαμε, ο εσωτερικός αγωγός είναι μονωμένος από τον εξωτερικό με κάποιου είδους μονωτικού υλικού όπως Pyrex, πολυστυρένιο, πλαστικό πολυαιθυλένιο ή και άλλα υλικά τα οποία παρέχουν καλά χαρακτηριστικά μόνωσης και χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες εξαιτίας της υψηλής συχνότητας λειτουργίας, σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.



Σχήμα 2.16 Ομοαξονικό καλώδιο.

Με σκοπό να εξασφαλιστεί η καλή απόδοση, χρησιμοποιείται συχνά μονή θωράκιση ή και διπλή θωράκιση. Αυτού του είδους η γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται συχνά στην μηχανική των RF αλλά και στις μετρήσεις των κεραιών μεταξύ της κεραίας και του VNA. Τα ομοαξονικά καλώδια διαιρούνται σε τρεις κατηγορίες, α) εύκαμπτα, β) ημιάκαμπτο και γ) άκαμπτο, με τα άκαμπτα καλώδια να παρέχουν την μέγιστη απόδοση και για αυτό τον σκοπό να χρησιμοποιούνται σε απαιτητικές εφαρμογές. Αν συμβολίσουμε με a την εσωτερική διάμετρο του καλωδίου και με b την εξωτερική αντίστοιχα, και την σχετική επιτρεπτότητα του αγωγίμου υλικού ϵ_r , τότε οι παράμετροι ανά μονάδα μήκους ορίζονται ως εξής:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad R = \sqrt{\frac{f\mu}{\pi\sigma_2}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad \text{σχέση 2.6}$$

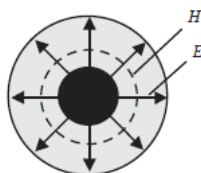
$$C = 2\pi\epsilon / \ln \frac{b}{a} \quad G = 2\pi\sigma_1 / \ln \frac{b}{a}$$

Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής, δεδομένου πως οι απώλειες είναι αμελητέες δίνεται από την σχέση:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{2\pi} \ln \frac{b}{a} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad \text{σχέση 2.7}$$

Οι πιο συνηθισμένες τιμές της αντίστασης είναι 50Ω ή 75Ω .

Η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου φαίνεται στο σχήμα, με το μαγνητικό πεδίο H να είναι κάθετο ως προς την κατεύθυνση διάδοσης, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο E να είναι κάθετο στο μαγνητικό με φορά από τον κεντρικό αγωγό προς τα έξω. Πάλι ο ρυθμός του πεδίου είναι **TEM**.



Σχήμα 2.17 Αναπαράσταση ηλεκτρικού E και μαγνητικού H πεδίου μέσα στο ομοαξονικό καλώδιο.

2.4.3.2 Μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς

Μια μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς μπορεί να νοηθεί ως μία γραμμή μεταφοράς δύο συρμάτων και ίσως αποτελεί την πιο ευρέως εφαρμόσιμη επίπεδη γραμμή μεταφοράς. Λόγω της πολυπλοκότητας της δομής, οι αναλυτικές εκφράσεις των παραμέτρων ανά μονάδα μήκους είναι δύσκολο να υπολογιστούν. Η πραγματική διηλεκτρική σταθερά προσεγγίζεται ως:

$$\varepsilon_{re} \approx \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12d/W}} \quad \text{σχέση 2.8}$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί μία εμπειρική προσέγγιση και εκφράζει πως η ενεργός διηλεκτρική σταθερά είναι ανάλογη με τις ιδιότητες του υλικού αλλά και του λόγου W/d . W είναι το πλάτος της γραμμής και d είναι το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος, το οποίο έχει διηλεκτρική σταθερά ε_r . Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{\nu C} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{re}}}{cC} \quad \text{σχέση 2.9}$$

Όπου ν είναι η ταχύτητα διάδοσης η οποία συνδέεται με την αγωγιμότητα και την χωρητικότητα με τον τύπο:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} \quad \text{σχέση 2.10}$$

Ως εκ τούτου, για να υπολογίσουμε την χαρακτηριστική εμπέδηση, πρέπει να γνωρίζουμε την χωρητικότητα C αφού μας γίνει γνωστή η ενεργός διηλεκτρική σταθερά. Αυτή η προσέγγιση μετατρέπει ένα δύσκολο γεγονός σε ένα ευκολότερο. Όταν το πάχος της μεταλλικής γραμμής μπορεί να αγνοηθεί, έχει βρεθεί ότι:

✚ Αν $W/d < 1$, η χαρακτηριστική εμπέδηση της γραμμής είναι:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d}\right) > \frac{126}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \text{σχέση 2.11}$$

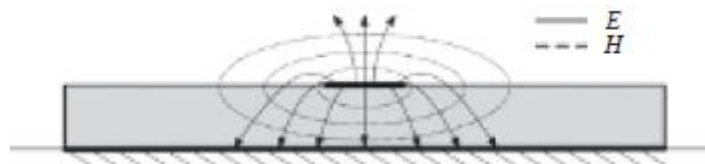
✚ Αν $W/d < 1$, η χαρακτηριστική εμπέδηση της γραμμής είναι:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_r} (W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.44))} < \frac{126}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \text{σχέση 2.12}$$

Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος W/d , τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης, και όσο μεγαλύτερη είναι η επιτρεπτότητα, τόσο χαμηλότερη είναι η χαρακτηριστική αντίσταση. Βέβαια υπάρχουν και πρακτικοί περιορισμοί στο εύρος τιμών της αντίστασης που μπορεί να επιτευχθεί κατά την υλοποίηση λόγω διάφορων παραγόντων όπως η διηλεκτρική σταθερά, το ύψος διηλεκτρικού υποστρώματος και η ικανότητα κατασκευής.

Και το ηλεκτρικό αλλά και το μαγνητικό πεδίο βρίσκονται μέσα στο εγκάρσιο επίπεδο. Όμως περίπου μισό από το κύμα οδεύει προς τον ελεύθερο χώρο, το οποίο είναι γρηγορότερο από το άλλο μισό το οποίο οδεύει μέσα στο διηλεκτρικό υπόστρωμα, έτσι αυτό το πεδίο είναι μέσα σε αυτό που καλείται quasi-TEM ρυθμός.

Ως αποτέλεσμα της γραμμής να έχει ανοιχτή δομή είναι το γεγονός ότι τα κυκλώματα υπόκεινται σε ακτινοβολία, χωρίς να σημαίνει ότι είναι επικίνδυνο να πλησιάσουν, αλλά η απόδοση της συσκευής ή του κυκλώματος μπορεί να επηρεαστεί. Στην πραγματικότητα αυτές οι δυναμικές γραμμές τερματίζουν σε οτιδήποτε είναι κοντά στην γραμμή.



Σχήμα 2.18 Αναπαράσταση των fringing fields μέσα στο διηλεκτρικό υπόστρωμα.

Η επόμενη μεγαλύτερη λειτουργία σε μία μικροταινιακή γραμμή είναι η εγκάρσια ηλεκτρική TE_{10} λειτουργία, όπου είναι το αποκομμένο μήκος κύματος το οποίο είναι διπλάσιο από το πλάτος της γραμμής. Έχοντας υπόψιν το υλικό και τις διαστάσεις των δυναμικών γραμμών, τότε το μήκος κύματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\lambda_c \approx \sqrt{\varepsilon_r} (2W + 0.8d) \quad \text{σχέση 2.13}$$

Βέβαια, η ανάλυση της λειτουργίας μίας μικροταινιακής γραμμής είναι αρκετά πολύπλοκη. Επιπρόσθετα, στις υψηλότερες τάξεις λειτουργίας, η επιφανειακή λειτουργία μπορεί να οριστεί, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη της μεταλλικής γραμμής, δηλαδή είναι απαραίτητα μόνο το διηλεκτρικό υπόστρωμα και το επίπεδο της γείωσης. Η χαμηλότερη εγκάρσια ηλεκτρική λειτουργία είναι η TE_1 και η συχνότητα αποκοπής δίνεται από τον εξής τύπο:

$$(f_c)TE_1 = \frac{3c\sqrt{2}}{8d\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad \text{σχέση 2.14}$$

Ο χαμηλότερος εγκάρσιος μαγνητικός ρυθμός είναι TM_0 και η συχνότητα αποκοπής είναι:

$$(f_c)TM_0 = \frac{c\sqrt{2}}{4d\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad \text{σχέση 2.15}$$

Είναι προφανές ότι $(f_c)TE_1 = 1.5 \cdot (f_c)TM_0 > (f_c)TM_0$, ως εκ τούτου, για να διατηρήσουμε την διάδοση σε λειτουργία quasi-TEM, η συχνότητα λειτουργίας μίας μικροταινιακής γραμμής πρέπει να είναι μικρότερη από την συχνότητα αποκοπής της λειτουργίας TE_{10} και TM_0 . Υψηλότερες τάξεις λειτουργίας θα προκαλέσουν σημαντικές απώλειες λόγω αγωγιμότητας και λόγω ακτινοβολίας. Η επιφανειακή λειτουργία μπορεί να προκαλέσει την ακτινοβολία της ισχύος σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, το οποίο δεν είναι καθόλου επιθυμητό.

2.4.3.2 Συνδετήρες

Όλες σχεδόν οι γραμμές μεταφοράς πρέπει να καταλήγουν σε συνδετήρες, οι οποίοι θα κάνουν την διασύνδεση της κεραίας αρκετά πιο εύκολη. Υπάρχουν αρκετά είδη συνδετήρων διαθέσιμα στην αγορά, για παράδειγμα το καλώδιο τύπου RG58 μπορεί να συνδεθεί με τους συνδετήρες SMA, SMB, BNC και Type N. Οι συνδετήρες κατασκευάζονται ως ζευγάρι, δηλαδή θηλυκό και αρσενικό, βέβαια μερικοί συνδετήρες δεν έχουν διάκριση όπως ο APC-7 και ο General Radio GR874. Είναι πολύ σημαντικό να επιλεγθεί ο κατάλληλος συνδετήρας για την εφαρμογή, αφού η επίδραση του συνδετήρα στην επίδοση του συστήματος και των μετρήσεων

μπορεί να είναι σημαντική. Αυτό αληθεύει εξαιρετικά στην περίπτωση των μετρήσεων των κεραιών.



Σχήμα 2.19 Συνδετήρας SMA.

Κεφάλαιο 3 : Παρασιτική στοιχειοκεραία επιθέματος με 2 παρασιτικά στοιχεία στη κεντρική συχνότητα των 3GHz

3.1 Σχεδίαση-Παράμετροι

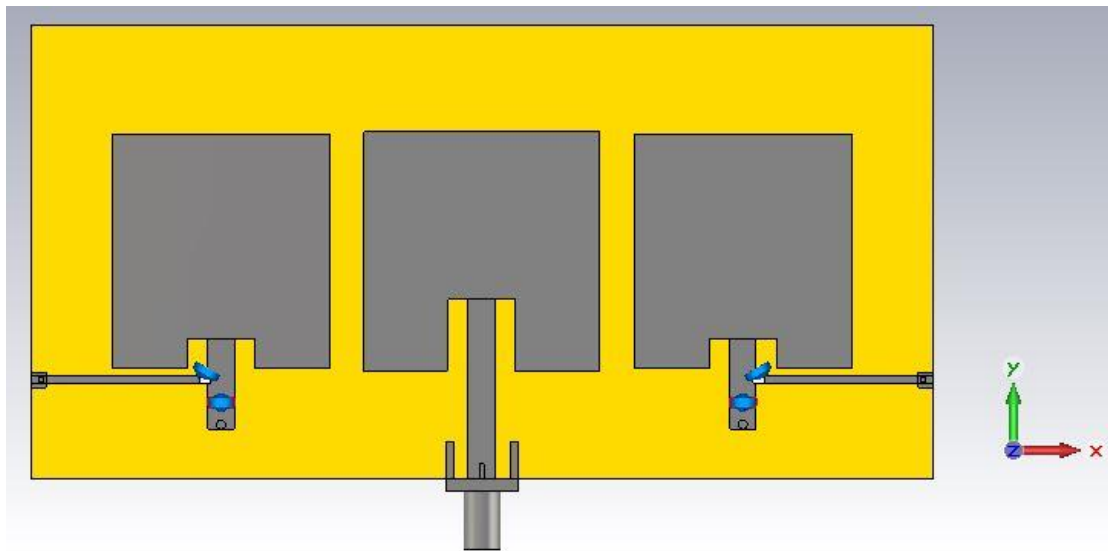
Η κεραία επιθέματος χρησιμοποιείται ευρέως στις δορυφορικές επικοινωνίες, έχοντας πολλά θετικά χαρακτηριστικά, όπως παραδείγματος χάριν, μεγάλο κέρδος, μικρό μέγεθος, ευκολία στην κατασκευή και πολλά ακόμη. Έτσι, με την τοποθέτηση δύο παρασιτικών στοιχείων, η κεραία αποκτάει ακόμη ένα σημαντικό στοιχείο, αυτό του επαναπροσδιοριζόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας. Με την προσθήκη p-i-n διόδων καθίσταται δυνατή η στρέψη του κύριου λοβού ακτινοβολίας, ανάλογα με το ποιο παρασιτικό έρχεται σε επαφή με το επίπεδο της γείωσης. Η κεραία δύναται να έχει τρεις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας, α) “OFF-OFF”, β) “ON-OFF”, γ) “OFF-ON”.

Πρώτο βήμα για την σχεδίαση της κεραίας αποτελεί η επιλογή του κατάλληλου διηλεκτρικού υποστρώματος, το οποίο ικανοποιεί τις ανάγκες οι οποίες έχουν τεθεί στο στάδιο της έρευνας. Για παράδειγμα, ανάγκη μπορεί επίσης να αποτελεί και ο χώρος που καταλαμβάνει μία κεραία. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε το διηλεκτρικό υπόστρωμα RO4725JXR της RogersTM με διηλεκτρική σταθερά ίση με 2,55, και αρκετά χαμηλή εφαπτομένη απωλειών (Df) ίση με 0.0022. Το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος είναι ίσο με 0,78 mm το οποίο είναι σχετικά λεπτό για μία κεραία η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για δορυφορική επικοινωνία, και αυτό γιατί όσο πιο λεπτό είναι το πάχος τόσο πιο μικρό γίνεται και το εύρος ζώνης (bandwidth) της κεραίας. Στο επόμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί διηλεκτρικό υπόστρωμα μεγαλύτερου πάχους με σκοπό να γίνει σύγκριση και να εξάγουμε κατάλληλα συμπεράσματα.

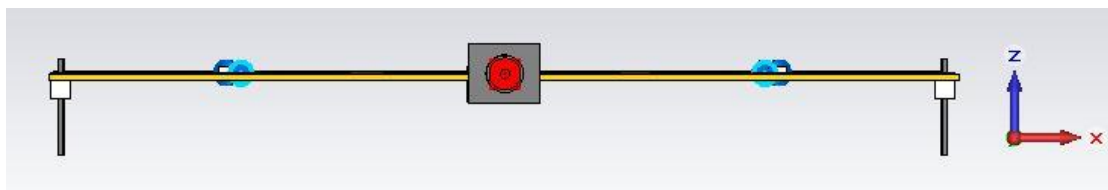
Ξεκινώντας την σχεδίαση της κεραίας, δημιουργούμε το διηλεκτρικό υπόστρωμα με διαστάσεις 120cm x 60cm x 0.78cm πάνω στο οποίο θα τοποθετηθούν στη συνέχεια τα τρία ορθογώνια επιθέματα, το στρώμα της γείωσης πάχους 0,035mm, η γραμμή μεταφοράς και τέλος ο SMA συνδετήρας. Στη συνέχεια αφού τοποθετηθεί το ενεργό ορθογώνιο επίθεμα με διαστάσεις 31,4cm x 31.7cm, αλλά και η μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς συνίσταται να πραγματοποιείται προσομοίωση της

κεραίας είτε με θύρα κυματοδηγού (waveguide port) είτε με διακριτή θύρα (discrete port) με σκοπό την διαβεβαίωση ότι η κεραία έχει ξεκινήσει να σχεδιάζεται σωστά. Εκτός αυτού, αυτή η μέθοδος βοηθάει να αναγνωρίζονται σχετικά γρήγορα τα όποια λάθη έχουν γίνει κατά το αρχικό στάδιο σχεδίασης της κεραίας.

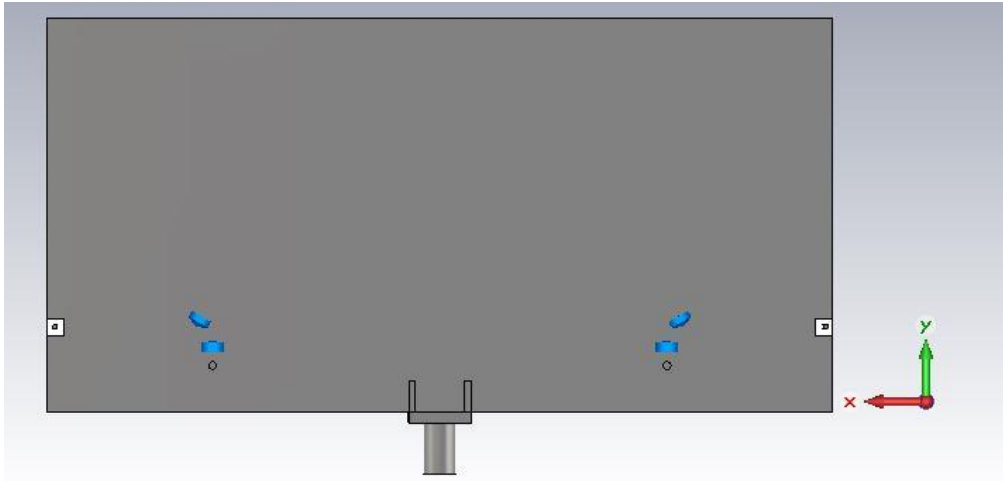
Αφού σιγουρέψουμε ότι η κεραία έχει την αναμενόμενη απόδοση, τότε τοποθετούμε και τα δύο ορθογώνια παρασιτικά επιθέματα εκατέρωθεν του ενεργού, με την μόνη διαφορά ότι το βάθος εισχώρησης της γραμμής μεταφοράς είναι μικρότερο από αυτού του ενεργού στοιχείου. Οι διαστάσεις και των δύο στοιχείων είναι ακριβώς οι ίδιες και είναι ίσες με 29cm x 31cm οι οποίες είναι ελάχιστα μικρότερες από αυτές του ενεργού στοιχείου, και αυτό διότι τα παρασιτικά στοιχεία λειτουργούν ως οδηγητές (directors) του κύματος που εκπέμπεται από την κεραία.



Σχήμα 3.1 Μπροστινή όψη της κεραίας.

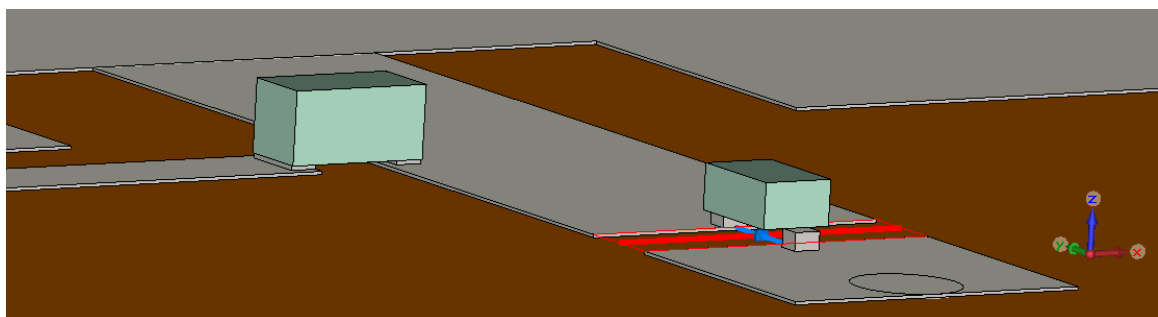


Σχήμα 3.2 Πλάγια όψη της κεραίας στην οποία φαίνονται τα pins για την τροφοδοσία με τάση DC.



Σχήμα 3.3 Οπίσθια όψη της κεραίας.

Στο επόμενο στάδιο πρέπει να ενωθούν τα παρασιτικά στοιχεία με το επίπεδο της γείωσης με σκοπό να γειώνονται κάθε φορά που πρέπει να ενεργοποιηθεί κάποιο από αυτά. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση διόδων p-i-n και επιμεταλλωμένων οπών (via) οι οποίες θα συνδέουν το επίπεδο της γείωσης με την γραμμή μεταφοράς, η οποία θα αποτελείται από δύο τμήματα, ένα μικρό στο οποίο θα είναι η επιμεταλλωμένη οπή και ένα μεγάλο το οποίο θα καταλήγει στο επίθεμα όπως άλλωστε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Για να λειτουργήσουν οι διόδοι, δηλαδή να μεταβούν από την κατάσταση “OFF” και “ON”, και το αντίστροφο, πρέπει να τροφοδοτηθούν με τάση ± 5 V. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη λεπτών γραμμών συνεχούς ρεύματος (DC lines) οι οποίες θα συνδέονται μέσω των RF chokes με την γραμμή μεταφοράς. Τα RF chokes (σχήμα 3.4) χρησιμοποιούνται για την αποφυγή διέλευσης του ραδιοσυχνωτικού κύματος προς τις DC γραμμές και την πηγή του ρεύματος, και τοποθετούνται όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Μεγέθυνση στις δομές των RF choke (αριστερά) και p-i-n diode (δεξιά).

| Όνομα μεταβλητής | Τιμή | Μονάδα μέτρησης | Περιγραφή |
|------------------|------|-----------------|--|
| length | 1.6 | mm | Μήκος του choke |
| width | 0.8 | mm | Πλάτος του choke |
| t | 0.05 | mm | Ύψος των μεταλλικών συνδετήρων (pad) του choke |
| h | 0.8 | mm | Ύψος του choke |
| Pad_w | 0.74 | mm | Πλάτος των μεταλλικών συνδετήρων του choke |
| Pad_center | 0.65 | mm | Απόσταση από το κέντρο των μεταλλικών συνδετήρων του choke |
| Pad_l | 0.3 | mm | Μήκος των μεταλλικών συνδετήρων του choke |

3.1 Διαστάσεις RF choke.

| Όνομα μεταβλητής | Τιμή | Μονάδα μέτρησης | Περιγραφή |
|------------------|------|-----------------|---|
| length | 1.2 | mm | Μήκος της διόδου |
| width | 0.8 | mm | Πλάτος της διόδου |
| t | 0.2 | mm | Ύψος των μεταλλικών συνδετήρων της διόδου |
| h | 0.5 | mm | Ύψος της διόδου |
| Pad_w | 0.3 | mm | Πλάτος των μεταλλικών συνδετήρων της διόδου |
| Pad_center | 0.71 | mm | Απόσταση από το κέντρο των μεταλλικών συνδετήρων της διόδου |
| Pad_l | 0.25 | mm | Μήκος των μεταλλικών συνδετήρων της διόδου |

3.2 Διαστάσεις διόδου p-i-n.

| Όνομα μεταβλητής | Τιμή | Μονάδα μέτρησης | Περιγραφή |
|------------------|-------|-----------------|----------------------------------|
| sx | 120 | mm | Μήκος διηλεκτρικού υποστρώματος |
| sy | 60 | mm | Πλάτος διηλεκτρικού υποστρώματος |
| sh | 0.78 | mm | Ύψος διηλεκτρικού υποστρώματος |
| copper_layer | 0.035 | mm | Πάχος στρώματος χαλκού |
| patch_x | 31.4 | mm | Μήκος ενεργού επιθέματος |
| patch_y | 31.7 | mm | Πλάτος ενεργού επιθέματος |
| line_x | 3.7 | mm | Πλάτος μικροταινιακής γραμμής |
| vac_gap_x | 9 | mm | Κενό γραμμής μεταφοράς |

| | | | |
|-------------------|-----------------|------------|--|
| vac_gap_y | 9.5 | mm | Κενό γραμμής μεταφοράς |
| f_center | 3 | GHz | Κεντρική συχνότητα |
| parasitic_patch_x | 29 | mm | Μήκος παρασιτικού επιθέματος |
| parasitic_patch_y | 31 | mm | Πλάτος παρασιτικού επιθέματος |
| space_gap | 6+factor | mm | Κενό μεταξύ ενεργού και παρασιτικού στοιχείου |
| par_line_x | 3.5 | mm | Πλάτος παρασιτικής γραμμής μεταφοράς |
| par_line_y | 6 | mm | Μήκος παρασιτικής γραμμής μεταφοράς |
| par_vac_x | 9 | mm | Κενό παρασιτικής γραμμής μεταφοράς |
| par_vac_y | 4 | mm | Κενό παρασιτικής γραμμής μεταφοράς |
| line_pad_x | par_line_x | mm | Μήκος του δεύτερου τμήματος της παρασιτικής γραμμής μεταφοράς |
| par_pad_gap | 1 | mm | Κενό μεταξύ των τμημάτων της παρασιτικής γραμμής μεταφοράς |
| line_pad_y | 3 | mm | Πλάτος του δεύτερου τμήματος της παρασιτικής γραμμής μεταφοράς |
| dc_line_x | 21.17-factor | mm | Μήκος της γραμμής τροφοδοσίας DC |
| dc_gap | 1 | mm | Τετραγωνικό επίπεδο στο οποίο συνδέονται τα DC pins |
| dc_line_y | 1 | mm | Πλάτος της γραμμής τροφοδοσίας DC |
| factor | -4 ¹ | mm | Ρυθμιστικός παράγοντας απόστασης |

3.3 Τιμές των παραμέτρων της κεραίας.

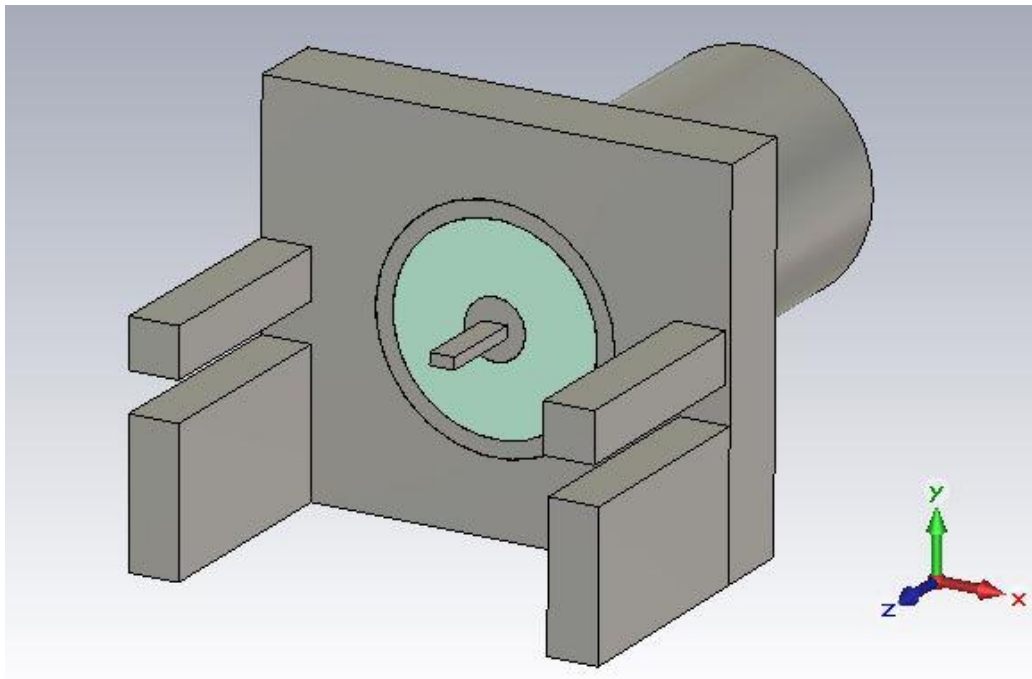
Οι δίοδοι p-i-n (SC079 LF SKYWORKS™) και τα RF chokes σχεδιάστηκαν με την βοήθεια των κυκλωμάτων RLC τα οποία παρέχονται από το CST. Αναλυτικότερα, οι δίοδοι προσομοιώθηκαν με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα τους, το οποίο για την κατάσταση “ON” αποτελείται από ένα πηνίο και μία αντίσταση συνδεδεμένα σε σειρά των οποίων οι τιμές αναγράφονται στον πίνακα 3.4. Η κατάσταση “OFF” αποτελείται από ένα πηνίο, μία αντίσταση και έναν πυκνωτή, εκ των οποίων τα δύο τελευταία είναι συνδεδεμένα παράλληλα.

¹ Δεν υφίσταται αρνητική μονάδα μέτρησης της απόστασης, αλλά σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται για την κατατόπιση των σχημάτων στους άξονες x και y.

| RLC | Δίοδος OFF | Δίοδος ON | RF CHOKE |
|-----|---------------|--------------|----------|
| R | 1000 Ω | 0.9 Ω | - |
| L | 0.7 nH | 0.7 nH | 5.6 nH |
| C | 0.3 pF | - | - |

3.4 Τιμές της αντίστασης, του πηνίου και του πυκνωτή οι οποίες αντιστοιχούν στα ισοδύναμα κυκλώματα των δύο καταστάσεων της διόδου.

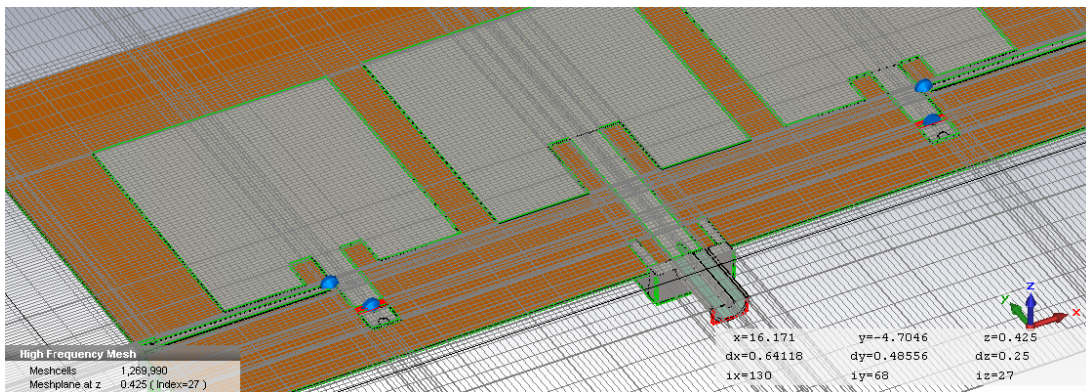
Στο τελευταίο βήμα τοποθετείται ο συνδετήρας SMA ο οποίος είναι ο 0.42 End Launch της Amphenol™, με διαστάσεις όπως ακριβώς παρουσιάζονται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι ο συνδετήρας πρέπει να έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εισάγει κατά το μέγιστο δυνατό λιγότερες απώλειες. Στην πίσω πλευρά του συνδετήρα, στη σημείο που συνδέεται το ομοαξονικό καλώδιο, έχει τοποθετηθεί μία θύρα κυματοδηγού (waveguide port) με την οποία θα διεγερθεί η κεραία.



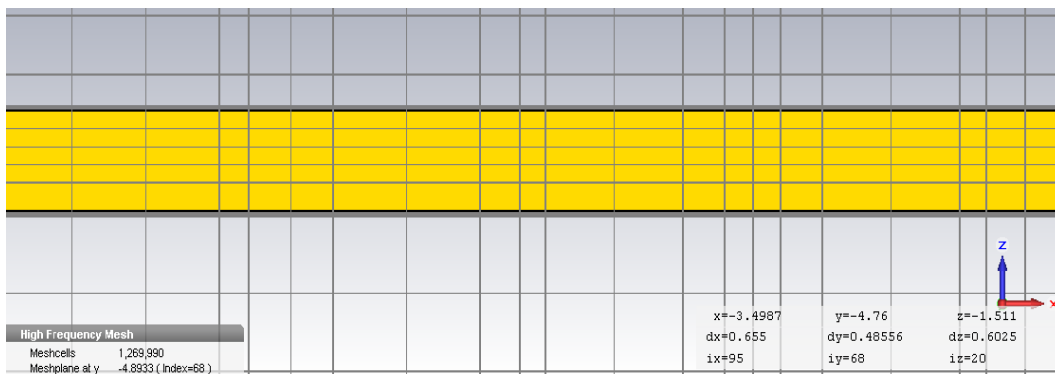
Σχήμα 3.5 Συνδετήρας 0.42 End Launch της Amphenol™.

Πριν από την έναρξη των προσομοιώσεων, είναι απαραίτητη η σωστή διακριτοποίηση της κεραίας για την παραγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Μια φτωχή διακριτοποίηση προκαλεί την ψευδή εντύπωση στον προσομοιωτή ότι η κεραία αποτελείται από μικρό αριθμό κελιών υπολογισμού (mesh cells) ενώ στην

πραγματικότητα αποτελείται από πολλά περισσότερα. Μια καλή διακριτοποίηση για το διηλεκτρικό υπόστρωμα αποτελεί η διαίρεση του σε τουλάχιστον 5 κελιά ενώ για τα επιθέματα και τις περιοχές όπου διαδραματίζονται σημαντικές ενέργειες χρειάζεται ακόμη μεγαλύτερος αριθμός mesh κελιών, ανάλογα βέβαια με τις εκάστοτε διαστάσεις της κεραίας. Επειδή ποτέ δεν είναι γνωστό εξ' αρχής πόσα κελιά είναι αρκετά για να παραχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα, κρίνεται άκρως αναγκαία η προσαρμοστική διακριτοποίηση, κατά την οποία πραγματοποιούνται πολλαπλές προσομοιώσεις με αυξανόμενο αριθμό κελιών κάθε φορά έως ότου να είναι αρκετά. Ως κριτήριο τερματισμού τίθεται η διαφορά στην ενέργεια από την προηγούμενη και την επόμενη κάθε φορά προσομοίωση. Στην συγκεκριμένη κεραία χρειάστηκαν 1.269.990 mesh κελιά.



Σχήμα 3.6 Αναπαράσταση των κελιών mesh ως προς τον άξονα z.



Σχήμα 3.7 Αναπαράσταση των κελιών mesh ως προς τον άξονα x.

3.2 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

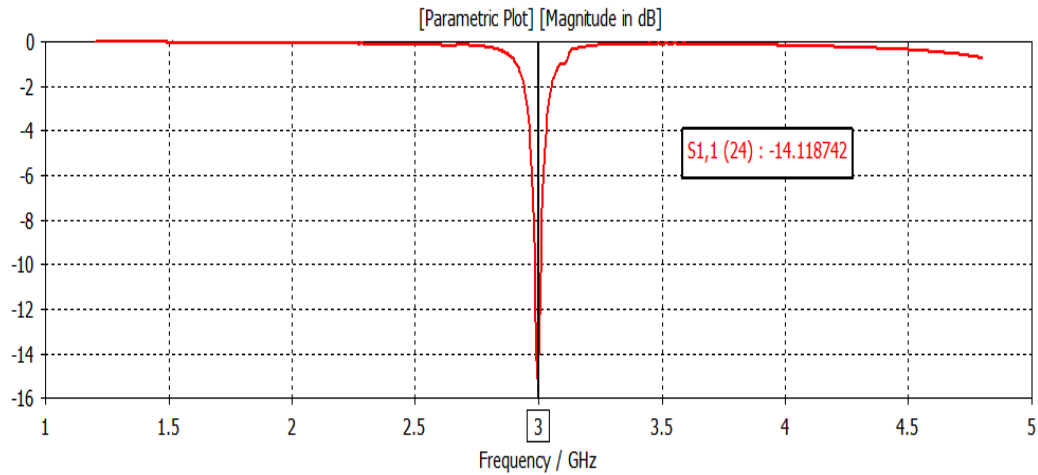
Σε μία κεραία πολλαπλών καταστάσεων είναι δύσκολο να βρεθεί ποια ή ποιες παραμετρικές τιμές οδηγούν στην συμβιβαστική αποδοχή των καταστάσεων. Δηλαδή, στην κατάσταση όπου ο κύριος λοβός έχει στραφεί ως προς μία μέγιστη γωνία² ακτινοβολίας δεν μπορεί να έχει την ίδια απόδοση και στην περίπτωση όπου βρίσκεται κατακόρυφος με το επίπεδο της Γης. Οπότε απαιτούνται πολυάριθμες προσομοιώσεις αλλά και πολλές παραμετρικές αλλαγές έως ότου βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός που προσφέρει την μέγιστη απόδοση της κεραίας τόσο στην κατάσταση “OFF” όσο και στην κατάσταση “ON”. Στις πρώτες κιόλας προσομοιώσεις επιτευχθήκαν ικανοποιητικά διαγράμματα σκέδασης S_{11} , VSWR, και σύνθετης αντίστασης, ωστόσο ο κύριος λοβός ακτινοβολίας μεταβλήθηκε μόνο κατά $\pm 15^\circ$ μοίρες, το οποίο δεν είναι αρκετό για δορυφόρο χαμηλής τροχιάς. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε παραμετρική σάρωση (parametric sweep) στην μεταβλητή της απόστασης των παρασιτικών στοιχείων από το ενεργό, και συγκεκριμένα από $\lambda/10$ μέχρι και $\lambda/2$, των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5. Επιλέχτηκε η απόσταση $\lambda/5$ ως ιδανικότερη απόσταση, διότι με βάση την παραμετρική σάρωση στις υπόλοιπες αποστάσεις είτε δεν θα είχε ως αποτέλεσμα αποδεκτό διάγραμμα ακτινοβολίας, είτε διάγραμμα σκέδασης S_{11} τόσο στην OFF-OFF όσο και στην OFF-ON/ON-OFF κατάσταση :

| Απόσταση | 1 cm $\approx \lambda/10$ | 2 cm $\approx \lambda/5$ | 3 cm $\approx \lambda/3$ | 4 cm $\approx 2\lambda/5$ | 5 cm $\approx \lambda/2$ |
|----------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Μοίρες | 14° | 18° | 16° | 22° | 19° |
| S_{11} | -20 dB | -17 dB | -17 dB | -18 dB | -22 dB |

3.5 Αποτελέσματα παραμετρικής σάρωσης για την απόσταση των παρασιτικών στοιχείων από το ενεργό.

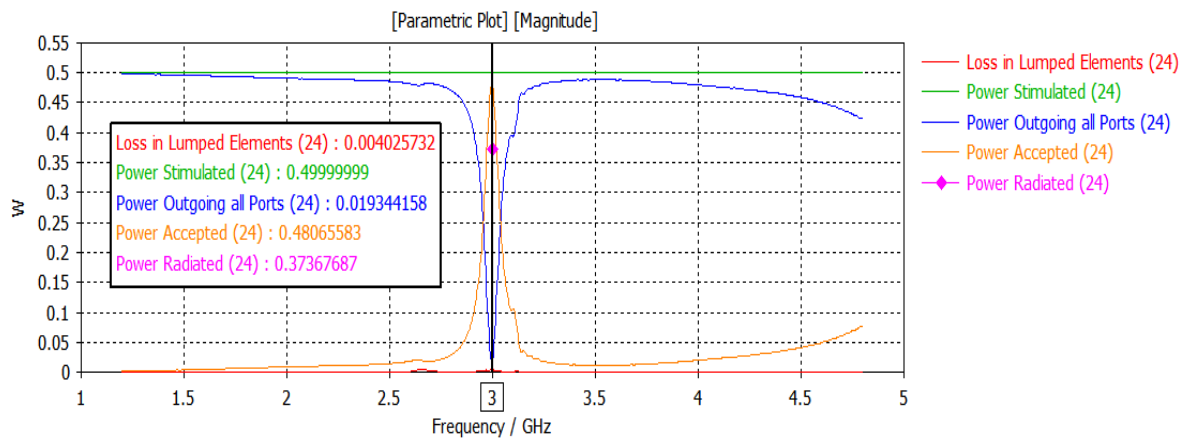
Πρώτο και πιο σημαντικό αποτέλεσμα των προσομοιώσεων αποτελεί το διάγραμμα σκέδασης S_{11} (scattering parameter) ως προς τη συχνότητα, και όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες μπορεί να διαπιστώσει κανείς ότι οι ελάχιστες τιμές των S_{11} βρίσκονται ακριβώς στην κεντρική συχνότητα λειτουργίας. Αρχικά στην κατάσταση “OFF” η παράμετρος σκέδασης έχει τιμή ίση με -14,11 dB ενώ παρατηρείται εξαιρετικά στενό εύρος ζώνης (bandwidth) το οποίο είναι ίσο με 0,02 GHz δηλαδή 20 MHz.

² Θεωρούμε πως η κεραία είναι τοποθετημένη οριζόντια ως προς το έδαφος της Γης.



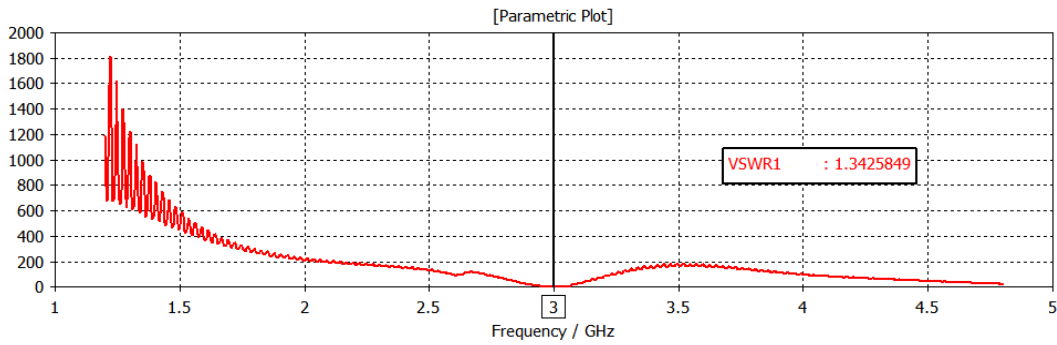
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} .

Συνεχίζοντας στο διάγραμμα ισχύος παρατηρείται ότι από τα 0,5 W τα οποία εισήλθαν στην κεραία, τα 0,37 W εκπέμφθηκαν ενώ από την άλλη πλευρά, στα κυκλώματα RLC σημειώθηκαν απώλειες μόλις 0,004 W. Τέλος υπήρξαν και μικρές απώλειες λόγω κακής προσαρμογής της κεραίας (mis-match).



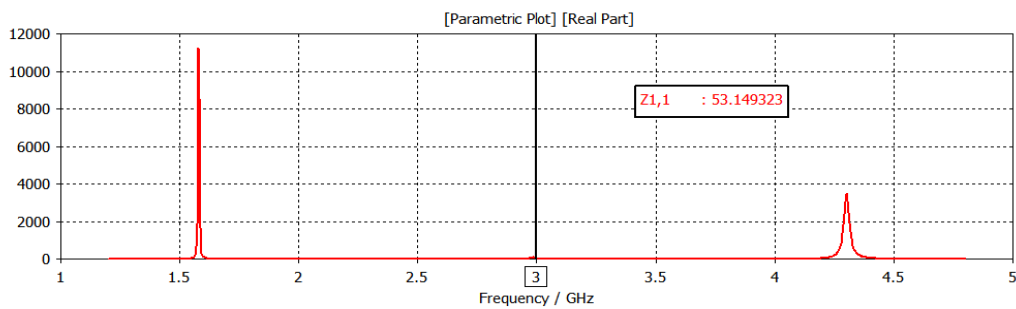
Σχήμα 3.9 Διάγραμμα ισχύος στο οποίο απεικονίζονται η απώλεια στα διηλεκτρικά, η απώλεια στα lumped elements, η ισχύς που παραμένει στο σύστημα, αλλά και η ισχύς η οποία εκπέμπεται από το σύστημα.

Στο διάγραμμα λόγου του στάσιμου κύματος (VSWR) στα 3GHz σημειώθηκε τιμή ίση με 1,34 η οποία είναι αποδεκτή, αν αναλογιστεί κανείς ότι ιδανική-θεωρητική τιμή είναι ίση με 1.

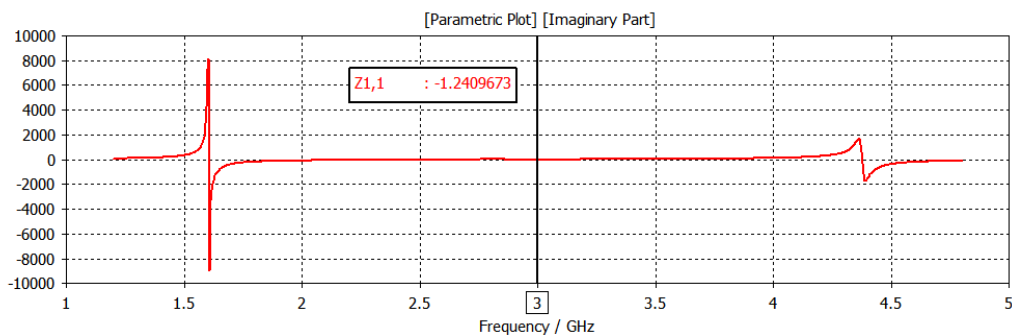


Σχήμα 3.10 Διάγραμμα απεικόνισης του λόγου του στάσιμου κύματος (VSWR).

Όσον αφορά την σύνθετη αντίσταση εισόδου (input impedance) ή αλλιώς εμπέδηση, παρατηρούνται αρκετά ικανοποιητικές τιμές τόσο στο πραγματικό μέρος της όσο και στο φανταστικό. Συγκεκριμένα, το πραγματικό μέρος είναι ίσο με 53Ω ενώ το φανταστικό ίσο με -1.2 . Το πρόσημο στο φανταστικό μέρος δηλώνει την μορφή της ενέργειας η οποία αποθηκεύτηκε στο σύστημα μας. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί να δει κανείς σε ένα διάγραμμα Smith.

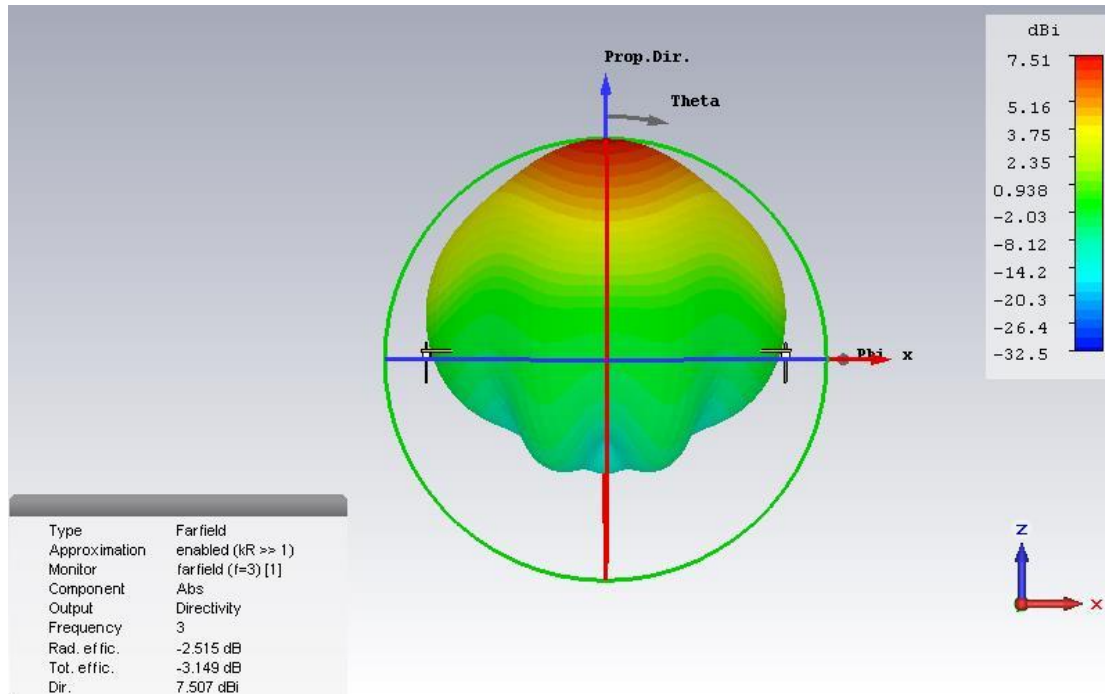


Σχήμα 3.11 Διάγραμμα απεικόνισης του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (Real).

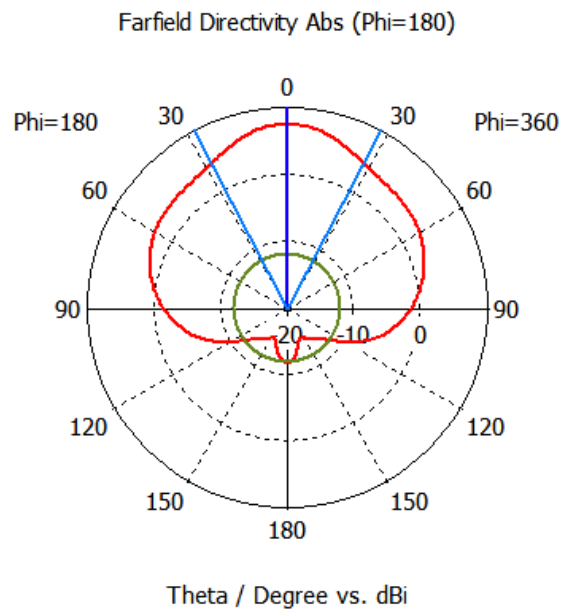


Σχήμα 3.12 Διάγραμμα απεικόνισης του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (Imaginary).

Τέλος στο παραχθέν διάγραμμα ακτινοβολίας παρατηρείται κατευθυντικό κέρδος ίσο με 7,51 dBi.



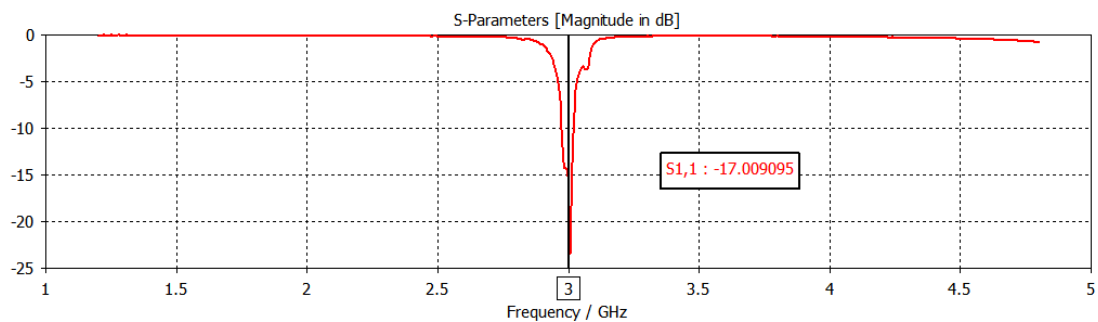
Σχήμα 3.13 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή (3D).



Σχήμα 3.14 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή (polar).

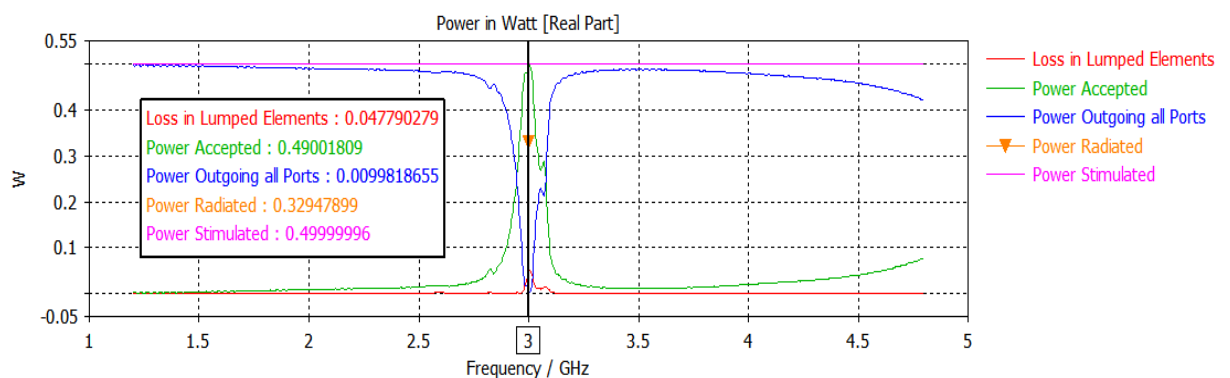
Ενεργοποιώντας την δίοδο με την εφαρμογή τάσης ίσης με +5V DC, δηλαδή αλλαγή κατάστασης από “OFF”-“OFF” σε “ON”-“OFF”, πετυχαίνουμε την αλλαγή της κατεύθυνσης του κύριου λοβού ακτινοβολίας. Σημειώνεται επίσης ότι λόγω της απόλυτης συμμετρίας της κεραίας ως προς τον άξονα x, όλα τα παραχθέντα αποτελέσματα τόσο της “ON-OFF” όσο και της “OFF-ON”, ταυτίζονται, με εξαίρεση το διάγραμμα ακτινοβολίας (-18° σε $+18^\circ$).

Το διάγραμμα σκέδασης S_{11} είναι λίγο καλύτερο σε σχέση με την προηγούμενη κατάσταση και αυτό άλλωστε φαίνεται στο διάγραμμα 3.16, όπου αγγίζει τιμή ίση με -17 dB ενώ το εύρος ζώνης (bandwidth) είναι ελάχιστα μεγαλύτερο και ίσο με 30 MHz.



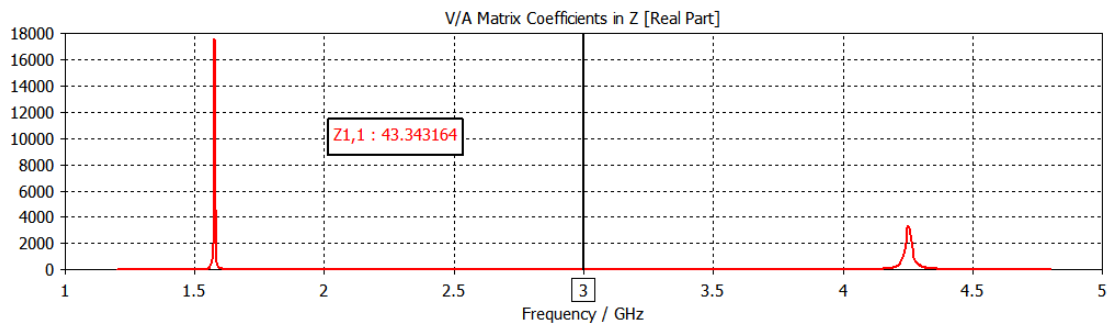
Σχήμα 3.15 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} .

Συνεχίζοντας, στο διάγραμμα ισχύος παρατηρούμε ότι περίπου το 70% της ενέργειας, με την οποία τροφοδοτήθηκε το σύστημα, εκτέμφθηκε.

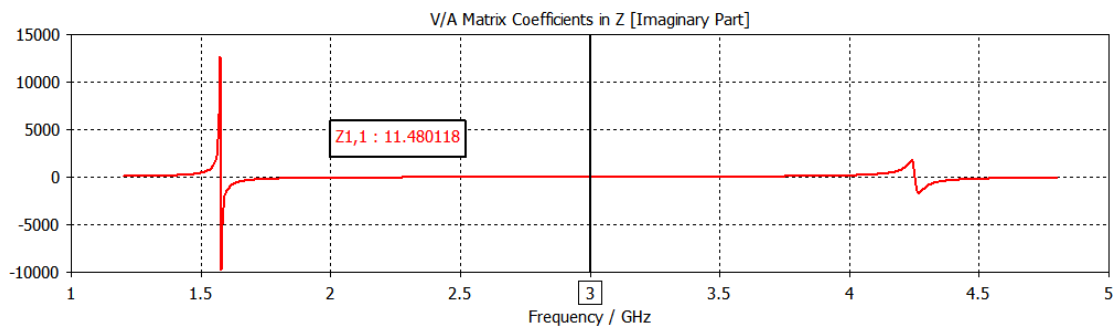


Σχήμα 3.16 Διάγραμμα ισχύος

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου έχει τιμές 43 Ω στο πραγματικό της μέρος και 11,4 στο φανταστικό, οι οποίες είναι αποδεκτές. Θυμίζουμε ότι $Z = R + I$, οπότε όσο πιο κοντά στα 50 Ω βρίσκεται το πραγματικό μέρος αλλά και το φανταστικό μέρος κοντά στην τιμή μηδέν, τόσο καλύτερα προσαρμοσμένη είναι η κεραία.



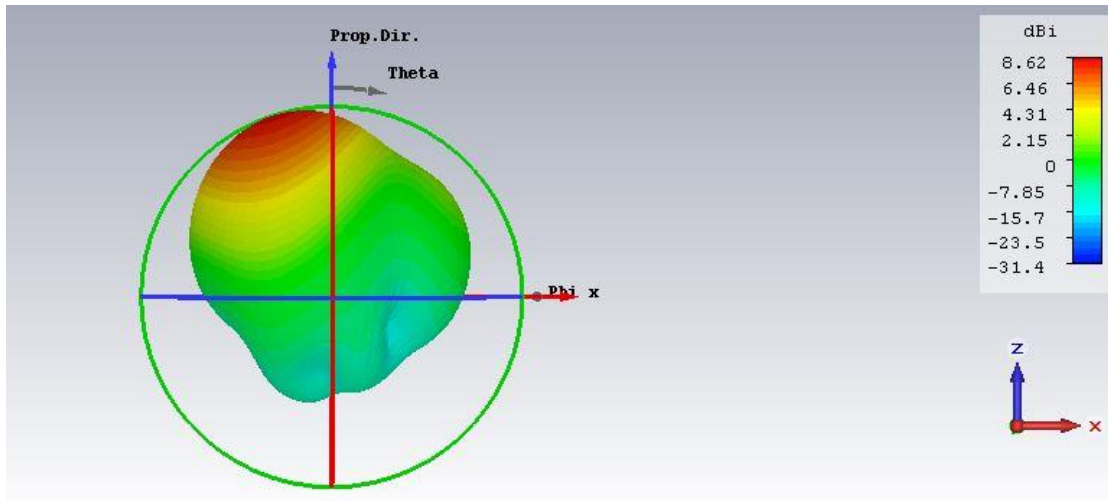
Σχήμα 3.17 Διάγραμμα απεικόνισης του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (Real).



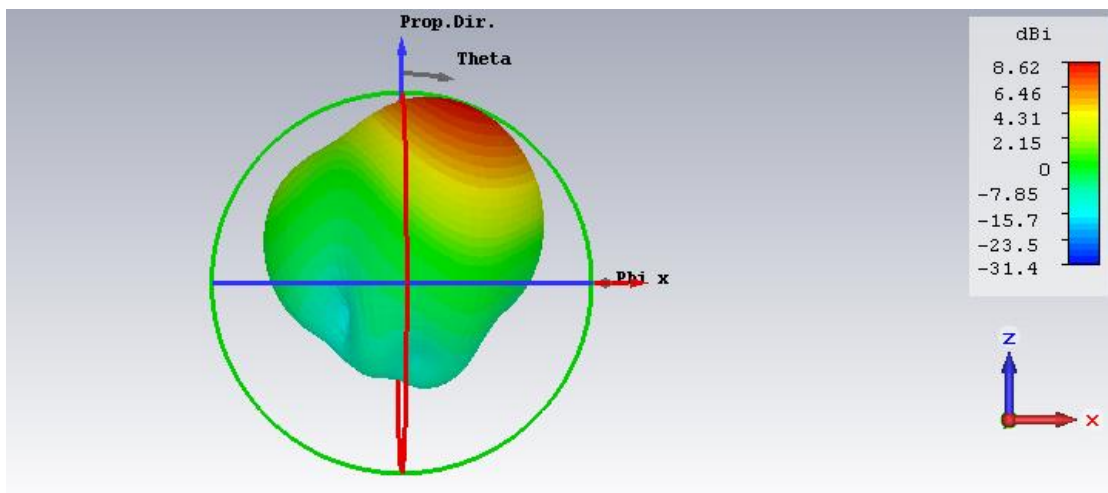
Σχήμα 3.18 Διάγραμμα απεικόνισης του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (Imaginary).

Η κεραία στις δύο ενεργές της καταστάσεις δηλαδή την “ON-OFF” και την “OFF-ON” έχει κατευθυντικό κέρδος ίσο με 8.62 dBi, ενώ ο κύριος λοβός ακτινοβολίας στρέφεται στις -18° και αντίστοιχα $+18^\circ$.

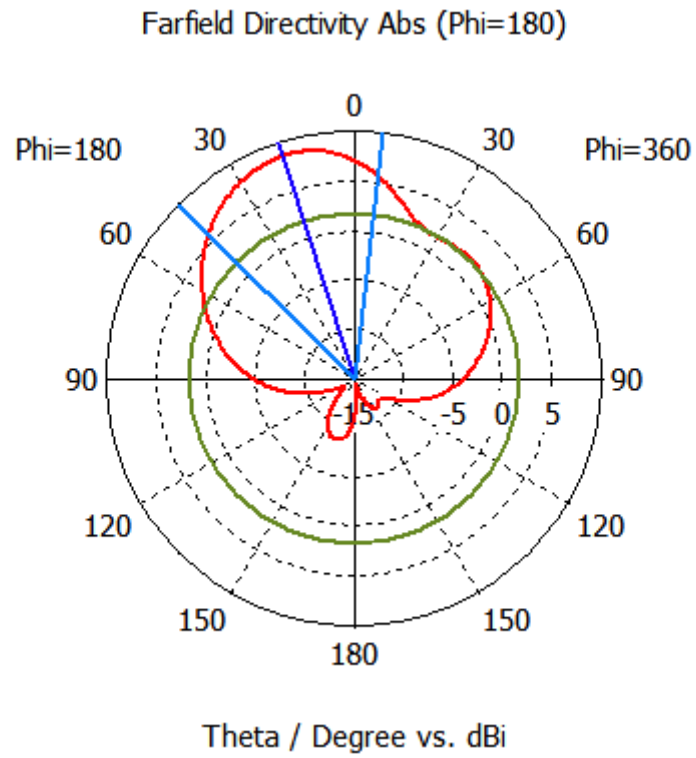
Όσον αφορά τα διαγράμματα ακτινοβολίας παρατηρήθηκε ότι από ένα σημείο και έπειτα καθώς μεγάλωνε η απόσταση μεταξύ των παρασιτικών στοιχείων και του ενεργού στοιχείου μεγάλωνε και η γωνία εκτομής του κύριου λοβού αλλά με κόστος έναν δεύτερο μικρότερο λοβό από την αντίθετη κατεύθυνση. Για την λύση αυτού του προβλήματος επιλέχθηκαν οι κατάλληλες παραμετρικές τιμές που οδηγούσαν στον κορεσμό του διαγράμματος ακτινοβολίας.



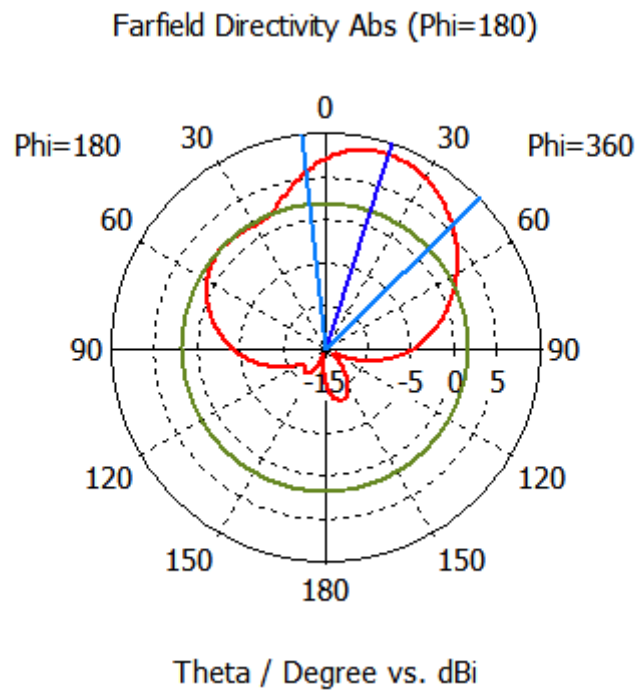
Σχήμα 3.19 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή (3D).



Σχήμα 3.20 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή (3D).

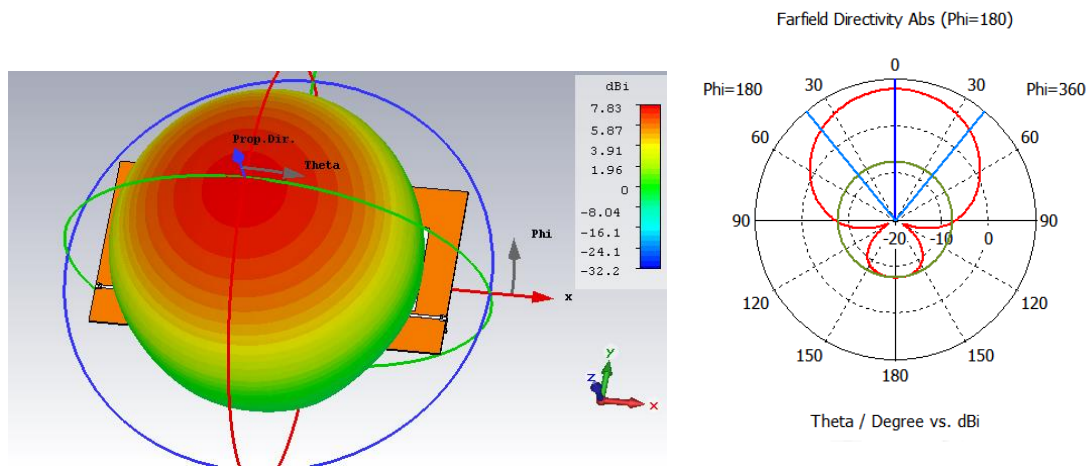


Σχήμα 3.21 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή (polar).

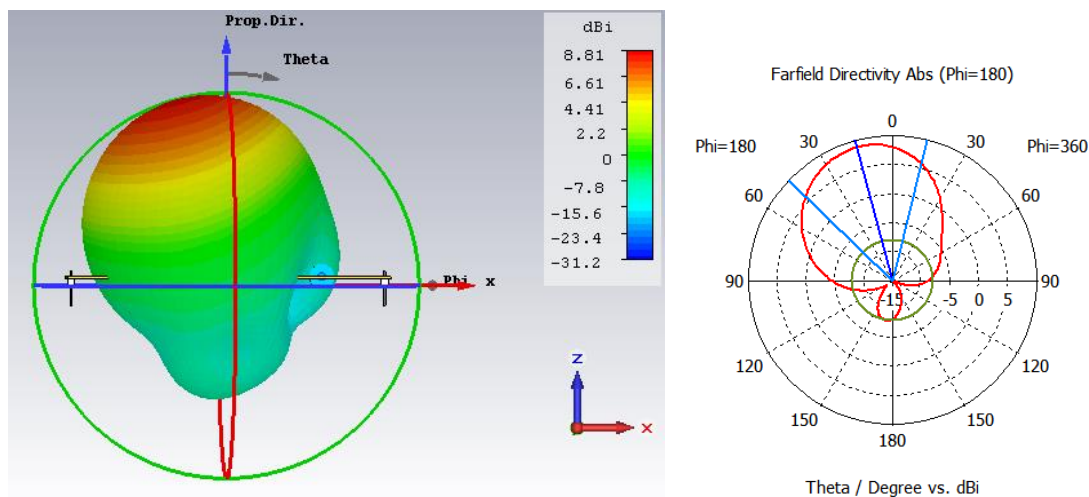


Σχήμα 3.22 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή (polar).

Ωστόσο, αξίζει να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της περίπτωσης με την στρέψη του κύριου λοβού κατά $\pm 15^\circ$, με κύριο σκοπό την ανάδειξη της συσχέτισης της απόστασης, των παρασιτικών στοιχείων από το ενεργό, με την επίδραση στο διάγραμμα ακτινοβολίας τόσο στην “OFF”, όσο και στις “ON” καταστάσεις. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα, ο κύριος λοβός ακτινοβολίας στην κατάσταση “OFF-OFF”, έχει πιο ελλειπτικό σχήμα σε σχέση με τα προηγούμενα αποτελέσματα, και σχεδόν ίδιο κατευθυντικό κέρδος.



Σχήμα 3.23 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη(3D) και σε πολική μορφή (polar).



Σχήμα 3.24 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη(3D) και σε πολική μορφή (polar).

Κεφάλαιο 4 : Παρασιτική στοιχειοκεραία με 4 κυκλικά παρασιτικά στοιχεία στη κεντρική συχνότητα των 3GHz

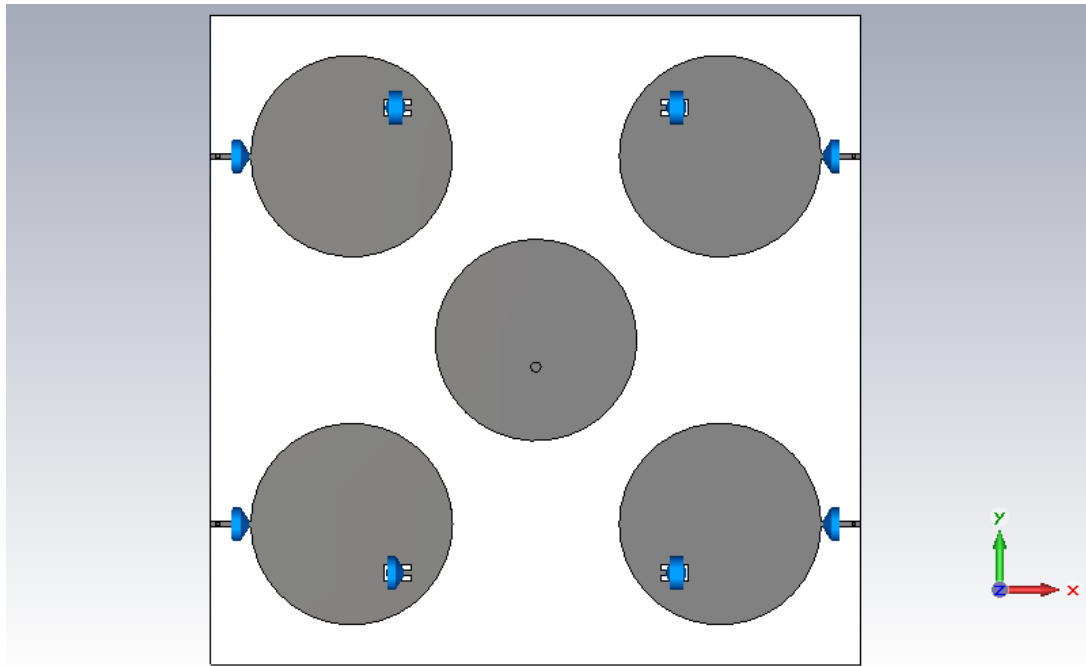
4.1 Σχεδίαση-Παράμετροι

Κύριος γνώμονας για την σχεδίαση αυτής της στοιχειοκεραίας αποτέλεσε το γεγονός ότι έπρεπε να σχεδιαστεί μία κεραία με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ευελιξία ως προς το διάγραμμα ακτινοβολίας. Έπειτα από εκτενή έρευνα διαπιστώθηκε ότι το κυκλικό σχήμα αποτελεί την ιδανική επιλογή, τόσο για το ενεργό στοιχείο όσο και για τα παρασιτικά στοιχεία της κεραίας, τοποθετημένα με κατάλληλη διάταξη πάνω στο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Με αυτό τον τρόπο θα γινόταν δυνατό να “στραφεί” το διάγραμμα ακτινοβολίας προς την επιθυμητή κατεύθυνση με τον κατάλληλο συνδυασμό των καταστάσεων των διόδων p-i-n.

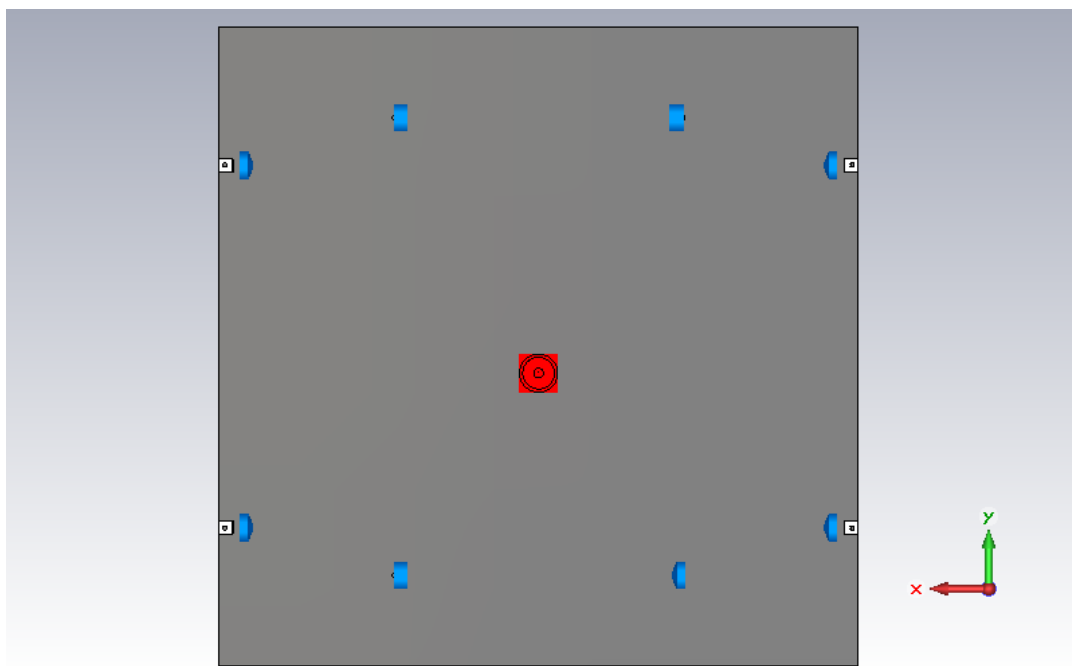
Όπως είναι γνωστό, η επιλογή του διηλεκτρικού υποστρώματος μπορεί να επηρεάσει την συμπεριφορά και την επίδοση της κεραίας, όπως παραδείγματος χάριν το διάγραμμα ακτινοβολίας, το εύρος ζώνης (bandwidth) της κεραίας αλλά και την ανεπιθύμητη δημιουργία επιφανειακών κυμάτων (surface waves). Οπότε επιλέχθηκε ένα σχετικά πιο παχύ διηλεκτρικό υπόστρωμα, σε σχέση με την προηγούμενη κεραία, το οποίο είναι το TLY-5 της Taconic, πάχους 1,6mm με διηλεκτρική σταθερά 2,2.

Ο καλύτερος τρόπος για την σωστή σχεδίαση της κεραίας είναι να αποτελείται από μικρές κινήσεις-προσθήκες στοιχείων (μικρά βήματα σχεδίασης) στην κύρια δομή της κεραίας με σκοπό να προσομοιώνεται και να εντοπίζονται σχετικά γρήγορα τυχόν σφάλματα κατά το στάδιο της σχεδίασης.

Το διηλεκτρικό υπόστρωμα έχει διαστάσεις 12x12 cm², το οποίο λόγω της συμμετρίας του, παρέχει την καλύτερη απόδοση στο διάγραμμα ακτινοβολίας, κάνοντας το συμμετρικό σε όλες τις πιθανές κατευθύνσεις ακτινοβολίας της κεραίας.



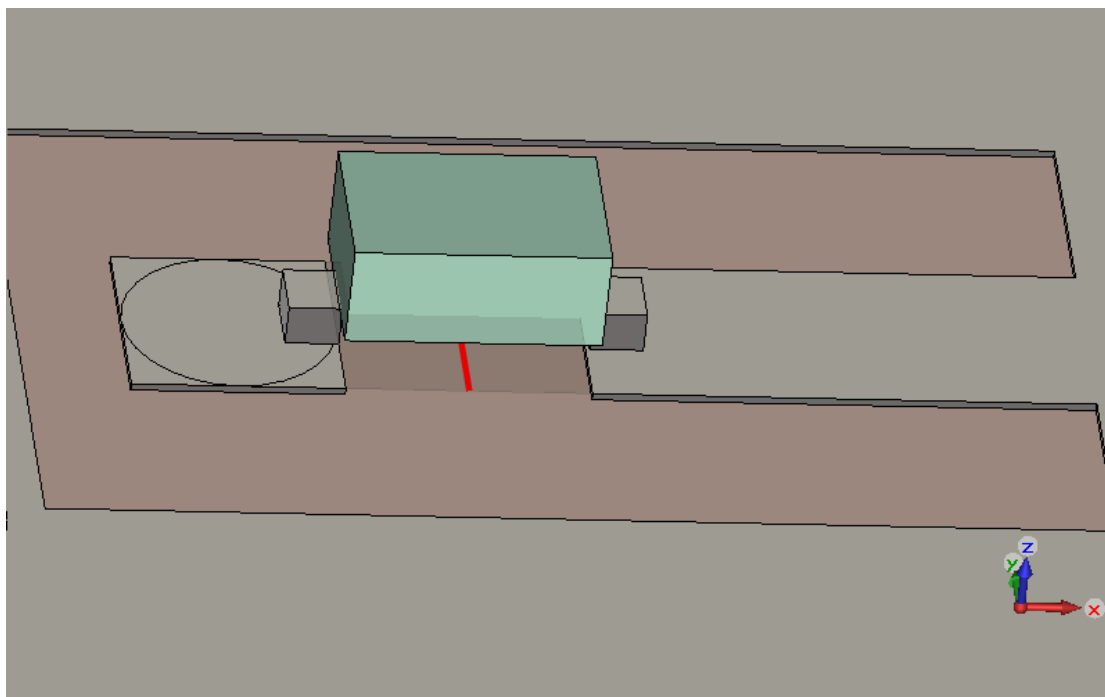
Σχήμα 4.1 Πρόσθια όψη της κεραίας.



Σχήμα 4.2 Οπίσθια όψη της κεραίας.

Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα παρασιτικά στοιχεία με το επίπεδο της γείωσης είναι μέσω κατάλληλων επιμεταλλωμένων οπών (VIA), όμως για την ευκολία στην σχεδίαση τοποθετήθηκαν κύλινδροι με ακτίνα όση θα ήταν και η ακτίνα της πραγματικής οπής. Βέβαια όταν η κεραία φτάσει στο στάδιο της κατασκευής, οι

κύλινδροι θα αντικατασταθούν από κενό υλικό (VACUM), ώστε να παραχθούν τα σχέδια χάραξης της κεραίας (Gerber). Οι επιμεταλλωμένες οπές θα συνδέονται ηλεκτρικά με το παρασιτικό στοιχείο, διαμέσου της διόδου p-i-n όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 4.3.

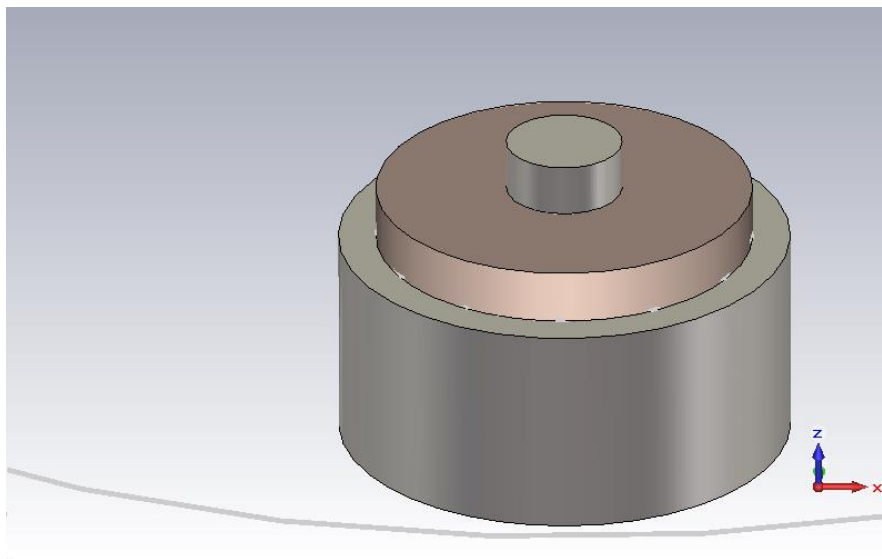


Σχήμα 4.3 Δίοδος p-i-n η οποία συνδέει το παρασιτικό στοιχείο με το επίπεδο της γείωσης μέσω της επιμεταλλωμένης οπής.

Η δίοδος η οποία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι η SMP1321-079LFTM της SkyworksTM με $L_s=0.7\text{nH}$, στην οποία εφαρμόζοντας τάση DC +5V ή -5V μπορεί να επιτευχθεί εξαιρετικά γρήγορη εναλλαγή μεταξύ της κατάστασης ON-OFF, και το αντίστροφο, με σκοπό την γρήγορη “σάρωση” του χώρου, έτσι ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο διάγραμμα ακτινοβολίας που εξυπηρετεί την εκάστοτε χρονική στιγμή. Η δίοδος PIN τοποθετήθηκε στην κεραία με την μορφή ισοδύναμου κυκλώματος (equivalent circuit), όμως για την προσομοίωση της τοποθετήθηκε επίσης και η τρισδιάστατη δομή της διόδου όπως ακριβώς περιγράφεται λεπτομερώς στο έγγραφο των τεχνικών προδιαγραφών (datasheet).

Ο τρόπος με τον οποίο τροφοδοτείται η κεραία είναι απευθείας (probe fed) με ημιάκαμπτο (semirigid) ομοαξονικό καλώδιο .141 Military (MIL-C-17) M17/130-0005 με αντίσταση ίση με 50 Ohm, όπου το .141 δηλώνει την διάμετρο του εσωτερικού αγωγού. Η δομή του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο λόγος για τον

οποίο δεν είναι στο ίδιο επίπεδο τα διάφορα κυλινδρικά του μέρη είναι διότι ο εσωτερικός αγωγός τερματίζει στο ενεργό στοιχείο της κεραίας, ο μεσαίος κύλινδρος ο οποίος αποτελείται από μη-αγώγιμο υλικό (Teflon) τερματίζει στο επίπεδο του διηλεκτρικού υποστρώματος. Τέλος, ο εξωτερικός αγωγός τερματίζει στο επίπεδο της γείωσης.



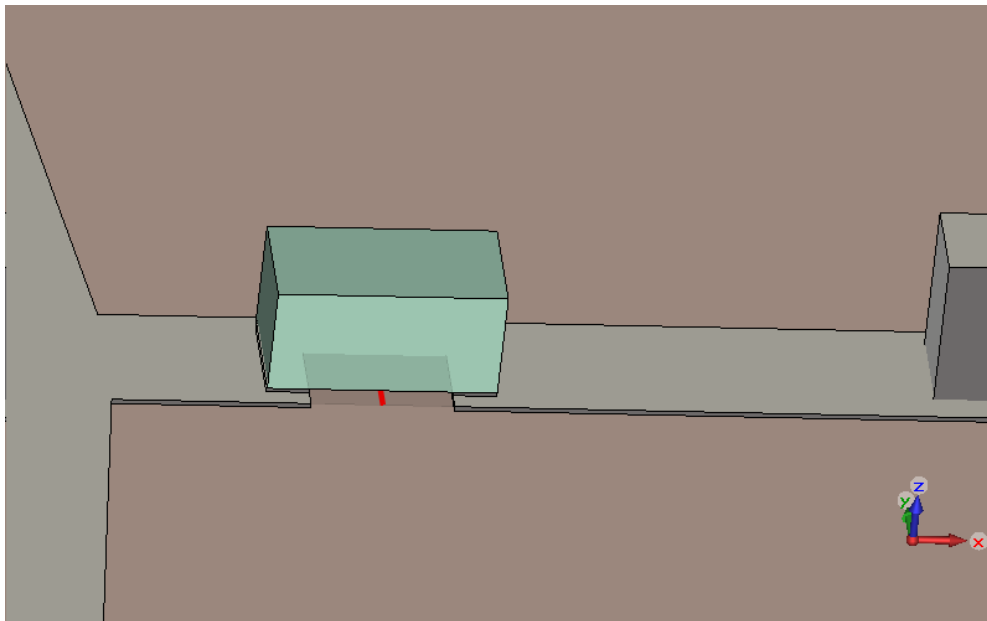
Σχήμα 4.4 Ομοαξονικό ημιάκαμπτο (semi-rigid) καλώδιο το οποίο προσκολλάται απευθείας πάνω στην κεραία.

Σε τελευταίο στάδιο τοποθετήθηκαν οι DC γραμμές, τα p-i-n τροφοδοσίας, και τα RF chokes τα οποία είναι απαραίτητα για την πόλωση της διόδου με σκοπό να πραγματοποιούνται οι εναλλαγές στις δύο πιθανές καταστάσεις της, την ON και την OFF, αντίστοιχα. Ο λόγος ύπαρξης των RF choke είναι για την αποφυγή της διέλευσης του ραδιοσυχνотικού (RF) σήματος προς την πηγή DC, έτσι ώστε να μην χαθεί πολύτιμη ενέργεια. Το τσιπ αυτό δεν είναι τίποτα άλλο παρά μία αντίσταση για το σήμα, το οποίο αποτελείται από ένα πηνίο με υψηλή τιμή, για την ακρίβεια ίση με 5,6 nH. Για τον ίδιο λόγο που τοποθετήθηκε η τρισδιάστατη δομή της διόδου, έτσι και εδώ τοποθετείται και η δομή του RF choke πάνω στην κεραία, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Τόσο στην περίπτωση της διόδου, όσο και στην περίπτωση του choke, όπως προαναφέρθηκε νωρίτερα, χρησιμοποιήθηκαν τα ισοδύναμα κυκλώματα τους, με τις τιμές που αναγράφονται στα σχετικά εγχειρίδια των τεχνικών προδιαγραφών σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Αναλυτικότερα, για την διόδο έχουμε τις εξής τιμές:

| RLC | Δίοδος OFF | Δίοδος ON | RF CHOKE |
|-----|---------------|--------------|----------|
| R | 1000 Ω | 0.9 Ω | - |
| L | 0.7 nH | 0.7 nH | 5.6 nH |
| C | 0.3 pF | - | - |

4.1 Τιμές της αντίστασης, του πηνίου και του πυκνωτή οι οποίες αντιστοιχούν στα ισοδύναμα κυκλώματα των δύο καταστάσεων της διόδου.



Σχήμα 4.5 RF choke το οποίο συνδέει το παρασιτικό στοιχείο με την διόδο p-i-n στο οποίο θα εφαρμοστεί τάση DC.

Αναλυτικότερα, παρατίθενται όλες τις μεταβλητές τιμές των μεγεθών της δομής κεραίας αλλά και των κυκλωμάτων στους παρακάτω πίνακες.

| Όνομα μεταβλητής | Τιμή | Μονάδα μέτρησης | Περιγραφή |
|------------------|------|-----------------|--|
| length | 1.6 | mm | Μήκος του choke |
| width | 0.8 | mm | Πλάτος του choke |
| t | 0.05 | mm | Ύψος των μεταλλικών συνδετήρων του choke |
| h | 0.8 | mm | Ύψος του choke |
| Pad_w | 0.74 | mm | Πλάτος των μεταλλικών συνδετήρων του choke |
| Pad_center | 0.65 | mm | Απόσταση από το κέντρο των μεταλλικών συνδετήρων του choke |

| | | | |
|-------|-----|-----------|---|
| Pad_1 | 0.3 | mm | Μήκος των μεταλλικών συνδετήρων του choke |
|-------|-----|-----------|---|

4.2 Διαστάσεις του RF choke.

| Όνομα μεταβλητής | Τιμή | Μονάδα μέτρησης | Περιγραφή |
|------------------|------|-----------------|---|
| length | 1.2 | mm | Μήκος της διόδου |
| width | 0.8 | mm | Πλάτος της διόδου |
| t | 0.2 | mm | Ύψος των μεταλλικών συνδετήρων της διόδου |
| h | 0.5 | mm | Ύψος της διόδου |
| Pad_w | 0.3 | mm | Πλάτος των μεταλλικών συνδετήρων της διόδου |
| Pad_center | 0.71 | mm | Απόσταση από το κέντρο των μεταλλικών συνδετήρων της διόδου |
| Pad_l | 0.25 | mm | Μήκος των μεταλλικών συνδετήρων της διόδου |

4.3 Διαστάσεις της διόδου p-i-n.

| Όνομα μεταβλητής | Τιμή | Μονάδα μέτρησης | Περιγραφή |
|-------------------|------------------|-----------------|---|
| sub_x | 120 | mm | Μήκος του διηλεκτρικού υποστρώματος |
| sub_y | 120 | mm | Πλάτος του διηλεκτρικού υποστρώματος |
| h | 1.6 | mm | Ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος |
| copper_layer | 0.035 | mm | Ύψος του στρώματος χαλκού |
| par_rad | 18.62 | mm | Ακτίνα παρασιτικών στοιχείων |
| par_x | -33 ³ | mm | Καρτεσιανές συντεταγμένες του κέντρου του παρασιτικού στοιχείου |
| par_y | -33 | mm | Καρτεσιανές συντεταγμένες του κέντρου του παρασιτικού στοιχείου. |
| feed_x | 0 | mm | Καρτεσιανές συντεταγμένες τροφοδοσίας του ενεργού στοιχείου |
| feed_y | -5 | mm | Καρτεσιανές συντεταγμένες τροφοδοσίας του ενεργού στοιχείου |
| x_vac_from_center | 6 | mm | Οριζόντια απόσταση του ορθογωνίου κενού από το κέντρο του παρασιτικού στοιχείου |

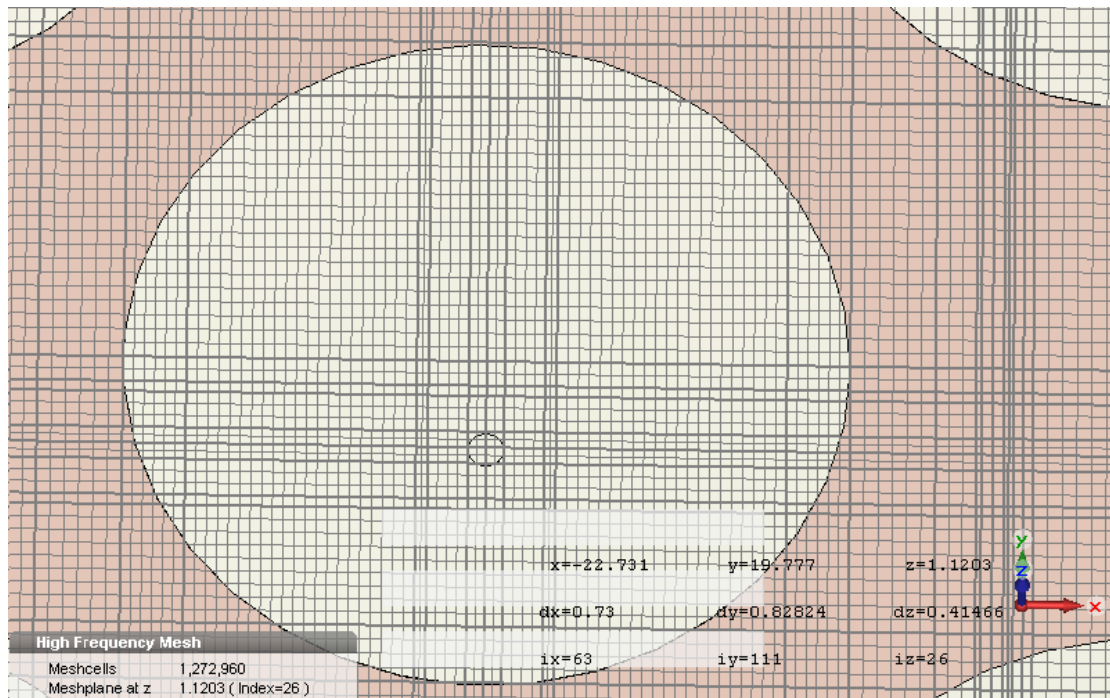
³ Δεν υφίσταται αρνητική μονάδα μέτρησης της απόστασης, αλλά σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται για την κατατόπιση των σχημάτων στους άξονες x και y.

| | | | |
|------------------|------|-----------|--|
| vac_l | 5 | mm | Μήκος του ορθογώνιου κενού |
| pin_vac_y | 3 | mm | Πλάτος του ορθογώνιου κενού |
| vac_gap | 9 | mm | Κάθετη απόσταση του ορθογώνιου κενού από το κέντρο του παρασιτικού στοιχείου |
| pin_line_x | 2.35 | mm | Μήκος της γραμμής που συνδέει το παρασιτικό στοιχείο με την δίοδο |
| pin_line_y | 1 | mm | Πλάτος της γραμμής που συνδέει το παρασιτικό στοιχείο με την δίοδο |
| via_pad_gap | 0.5 | mm | Απόσταση μεταξύ της οπής και της γραμμής της διόδου |
| via_pad_y | 1 | mm | Πλάτος της επιφάνειας που βρίσκεται πάνω από την οπή |
| via_pad_x | 1 | mm | Μήκος της επιφάνειας που βρίσκεται πάνω από την οπή |
| choke_line_x | 5 | mm | Μήκος της γραμμής του choke |
| choke_line_pos_y | 0 | mm | Κάθετη απόσταση από το κέντρο του παρασιτικού |
| choke_line_y | 1 | mm | Πλάτος της γραμμής του choke |

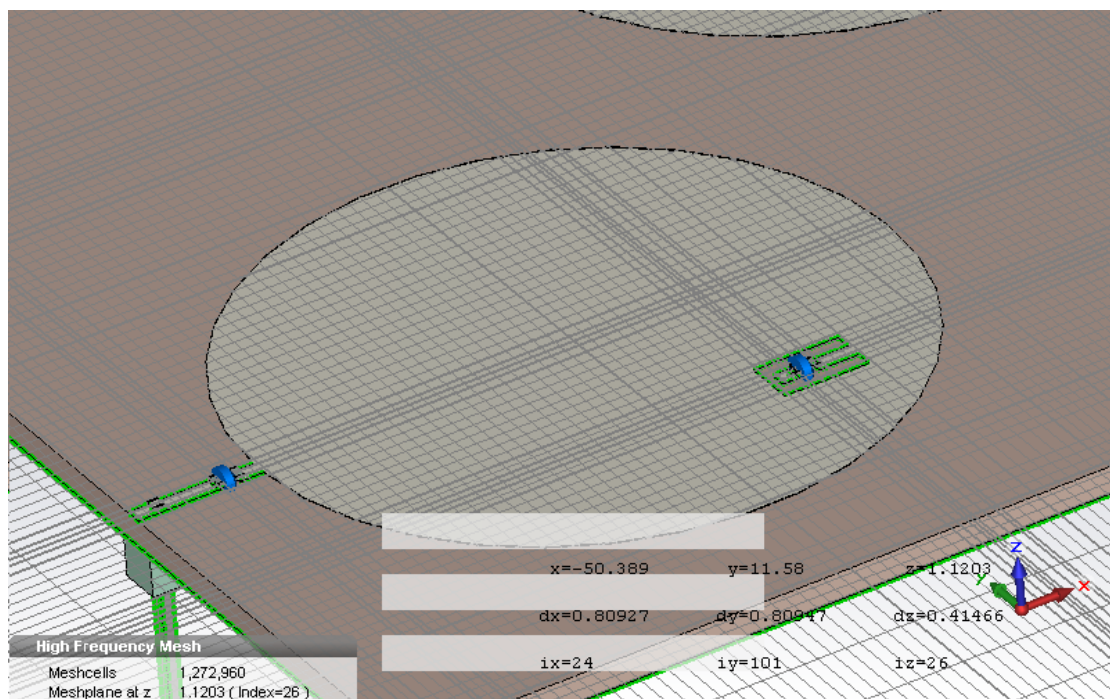
4.4 Διαστάσεις της κεραίας

Το τελευταίο και πιο σημαντικό σημείο της σχεδίασης αποτελεί η σωστή διακριτοποίηση του συνόλου της κεραίας. Φτωχή διακριτοποίηση έχει ως αποτέλεσμα και φτωγά-λανθασμένα αποτελέσματα προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει διότι η κεραία διακριτοποιείται σε πολύ μεγάλα mesh κελιά και ο προσομοιωτής καταλαβαίνει σαν μία περιοχή προσομοίωσης όλο το κελί, ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να συμβαίνουν δραματικές αλλαγές σε αυτή την περιοχή της κεραίας.

Με το παραπάνω σκεπτικό, εφαρμόστηκε διακριτοποίηση της κεραίας με αποτέλεσμα ο αριθμός των mesh κελιών να φτάσει τα 1.272.960 εκατομμύρια. Ο αριθμός αυτός προέκυψε έπειτα από την στοχευμένη διακριτοποίηση στα επίμαχα σημεία της κεραίας όπως, α) το σημείο τροφοδοσίας της, β) στα σημεία όπου υπάρχουν δίοδοι και chokes αλλά και γ) στις περιοχές γύρω από το ενεργό και τα παρασιτικά στοιχεία της κεραίας. Έπειτα από όλα τα παραπάνω, εφαρμόστηκε και προσαρμοστική διακριτοποίηση για να γίνει γνωστό μέχρι ποιον αριθμό κελιών είναι απαραίτητο να φτάσουμε, έτσι ώστε και να αυξηθεί περισσότερο ο αριθμός τους να έχει αμετάβλητη συμπεριφορά η κεραία. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η διακριτοποίηση της κεραίας.

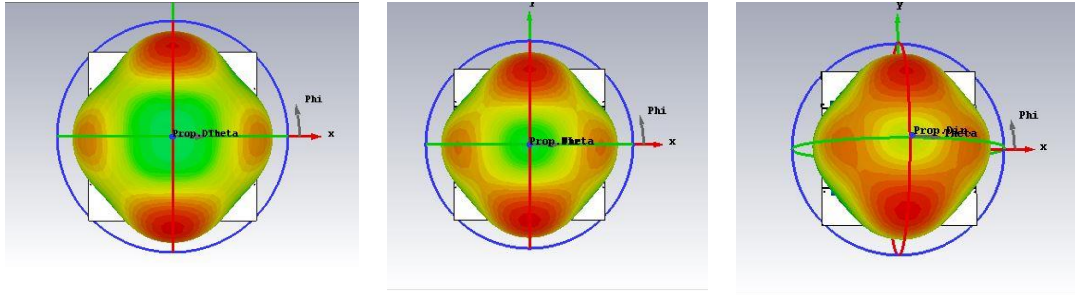


Σχήμα 4.6 Αναλυτική διακριτοποίηση της δομής της κεραίας.

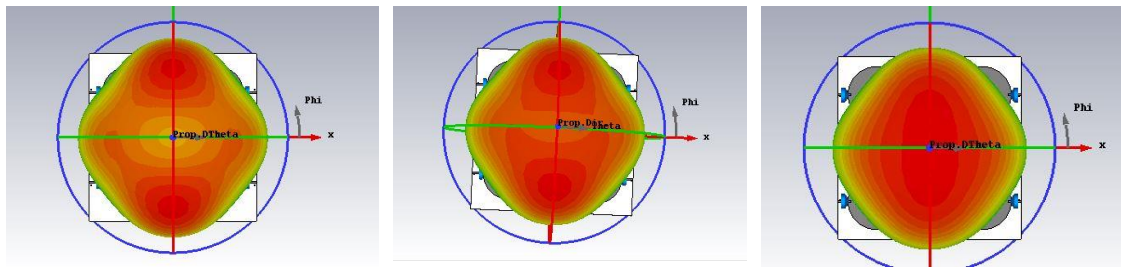


Σχήμα 4.7 Αναλυτική διακριτοποίηση στα σημεία τα οποία συμβάλλουν στην αλλαγή της κατάστασης της κεραίας.

οι κατάλληλες τιμές που ικανοποιούσαν τόσο την ακτινοβολία της κεραίας στις 0° μοίρες για $\phi=180^\circ$, όσο και στις υπόλοιπες πιθανές καταστάσεις της κεραίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών δοκιμών αλλά και η επιλογή της ιδανικότερης απόστασης.

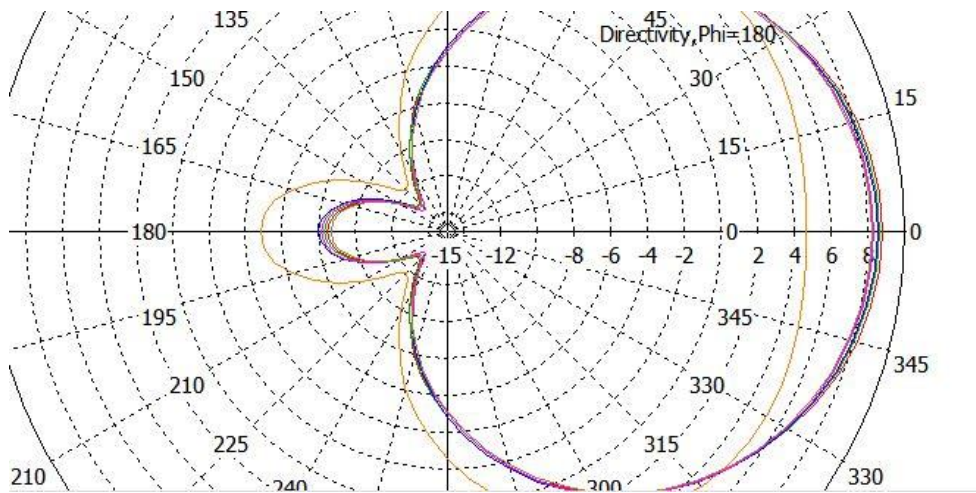


Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ακτινοβολίας για διάφορες αποστάσεις, αριστερά μικρή απόσταση και προς δεξιά μεγαλύτερη.

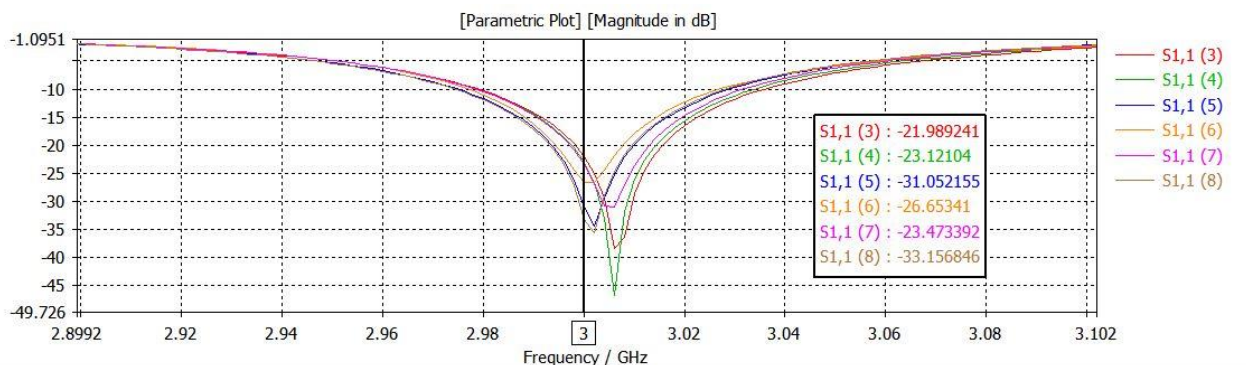


Σχήμα 4.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας για διάφορες αποστάσεις, αριστερά μικρή απόσταση και προς δεξιά μεγαλύτερη.

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας, σε κοντινή απόσταση από το ενεργό στοιχείο, δημιουργούνται πολλαπλοί ανεπιθύμητοι λοβοί ακτινοβολίας. Ωστόσο, σε μεγάλη απόσταση το φαινόμενο αυτό εξαλειφόταν, με κόστος στις ενεργές καταστάσεις της κεραίας. Το πρόβλημα λύθηκε με την επιλογή της κατάστασης “ON-ON-ON-ON”, όπου σε όλες τις παραμετρικές δοκιμές είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα, τόσο σε διάγραμμα ακτινοβολίας, κατευθυντικό κέρδος όσο και στο διάγραμμα σκέδασης S_{11} , όπως φαίνεται εξάλλου και στα παρακάτω σχήματα.

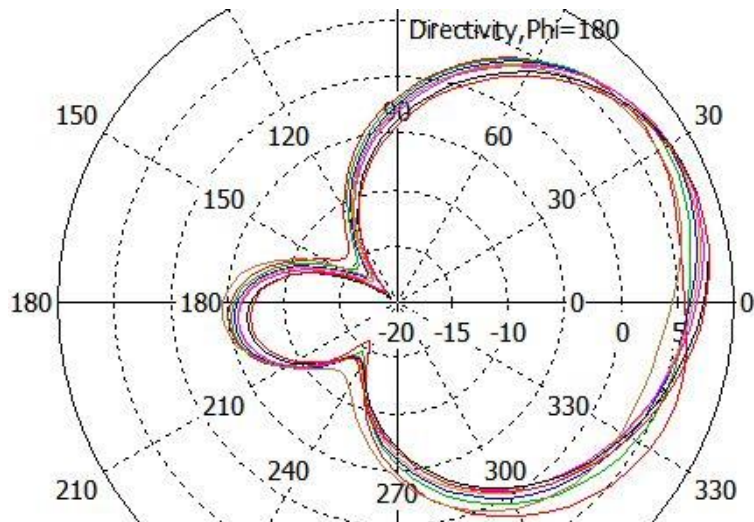


Σχήμα 4.11 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για διάφορες αποστάσεις. παρατηρείται ότι σχεδόν όλες οι αποστάσεις οδηγούν σε παρόμοιες τιμές του κατευθυντικού κέρδους.

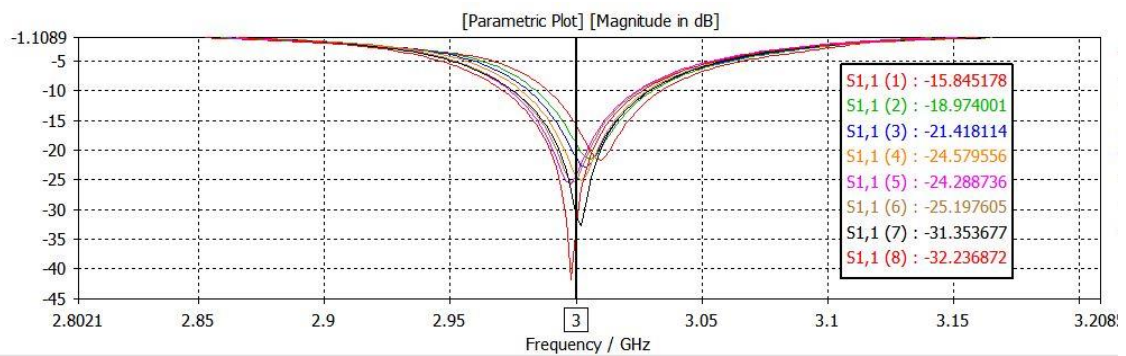


Σχήμα 4.12 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για διάφορες αποστάσεις. παρατηρείται ότι σχεδόν όλες οι αποστάσεις οδηγούν σε παρόμοιες τιμές του κατευθυντικού κέρδους. Η γραμμή με μπλε χρώμα είναι η απόσταση των 33 χιλιοστών, όπου και επιλέχτηκε ως βέλτιστη.

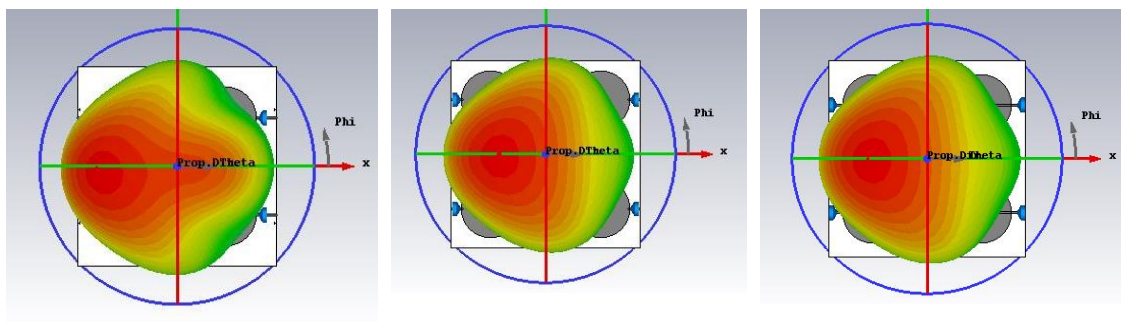
Οπότε η τιμή η οποία ικανοποιεί το παραπάνω πρόβλημα είναι η απόσταση των 33 χιλιοστών από το κέντρο του ενεργού στοιχείου ή αλλιώς 14,38 χιλιοστά από το άκρο του παρασιτικού μέχρι του ενεργού στοιχείου. Η επιλογή αυτή πάρθηκε και σε συναρτήσει με τα αποτελέσματα της κατάστασης “ON-OFF-ON-OFF” η οποία είναι άκρως ικανοποιητική και οδηγεί στον συμβιβασμό μεταξύ των ενεργών καταστάσεων της κεραίας αλλά και της κατάστασης “ON-ON-ON-ON”, όπως άλλωστε φαίνεται και στα σχήματα 4.13 και 4.14.



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολική μορφή για διάφορες αποστάσεις. παρατηρείται ότι από μία απόσταση και μετά επέρχεται ο κορεσμός. Η γραμμή με ροζ χρώμα είναι η απόσταση των 33 χιλιοστών που επιλέχτηκε ως βέλτιστη.



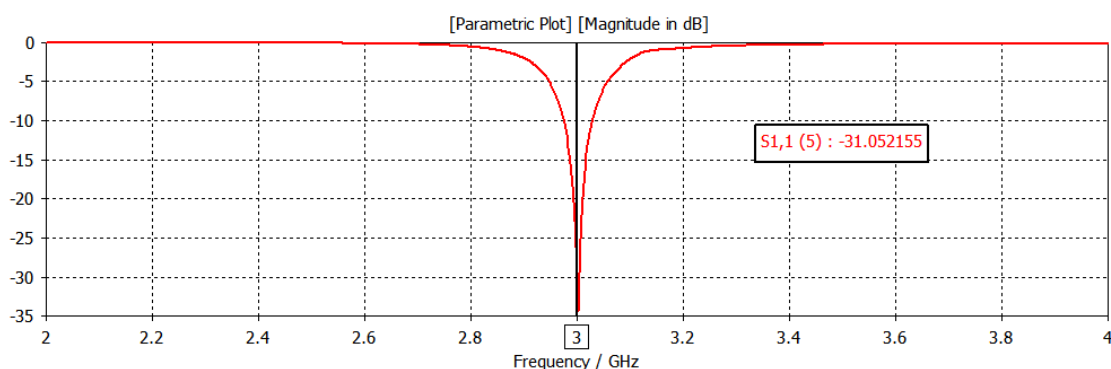
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για όλες τις παραμετρικές δοκιμές. Η γραμμή με μπλε χρώμα είναι η απόσταση των 33 χιλιοστών, όπου και επιλέχτηκε ως βέλτιστη.



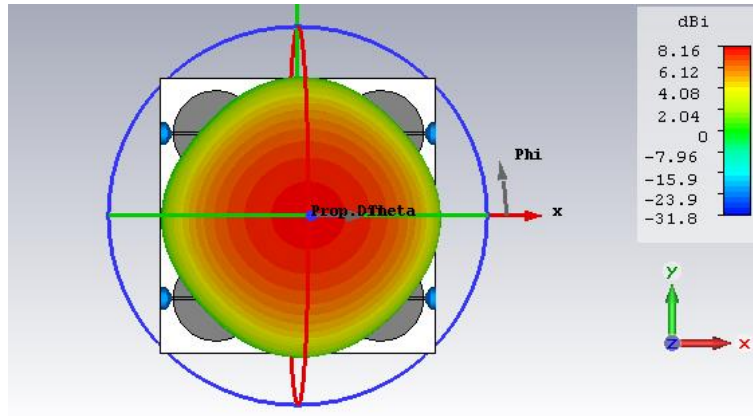
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα ακτινοβολίας για διάφορες αποστάσεις, αριστερά προς δεξιά: α) ελάχιστη απόσταση 29mm, β) μεσαία απόσταση 33mm γ) μέγιστη απόσταση 36mm

Αναλυτικότερα, το πρώτο πράγμα που μας ενδιαφέρει παράλληλα με το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι και το παραχθέν διάγραμμα S_{11} ως προς τη συχνότητα. Όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα S_{11} , όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των καταστάσεων των διόδων, δηλαδή των ON-OFF, δεν οδήγησαν σε μεγάλες μετακινήσεις του ελάχιστου σημείου. Ουσιαστικά, μέσα από αυτό το διάγραμμα βλέπουμε την απώλεια επιστροφής της θύρας 1 από την θύρα 1, δηλαδή τον συντελεστή ανάκλασης. Η επιλογή ενός παχύτερου διηλεκτρικού υποστρώματος οδήγησε σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth) λειτουργίας της κεραίας σε σχέση με την προηγούμενη. Αρχικά, προσομοιώθηκε η κεραία με όλες τις διόδους σε κατάσταση ON με σκοπό την επίτευξη διαγράμματος ακτινοβολίας μίας τυπικής κεραίας επιθέματος.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα S_{11} επιτεύχθηκε $-31,05$ db στην κεντρική συχνότητα λειτουργίας των 3 GHz, και εύρος ζώνης λειτουργίας (bandwidth) περίπου ίσο με 50 MHz, κάνοντας έτσι την κεραία αρκετά αποτελεσματική. Βέβαια η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τι σκοπό έχει να εξυπηρετήσει η εκάστοτε κεραία. Όσον αφορά το διάγραμμα ακτινοβολίας, είναι αρκετά κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή να είναι όπως αυτό, ενός τυπικού επιθέματος. Η κατευθυντικότητα σε αυτή την κατάσταση αγγίζει τα 8,16 dBi.

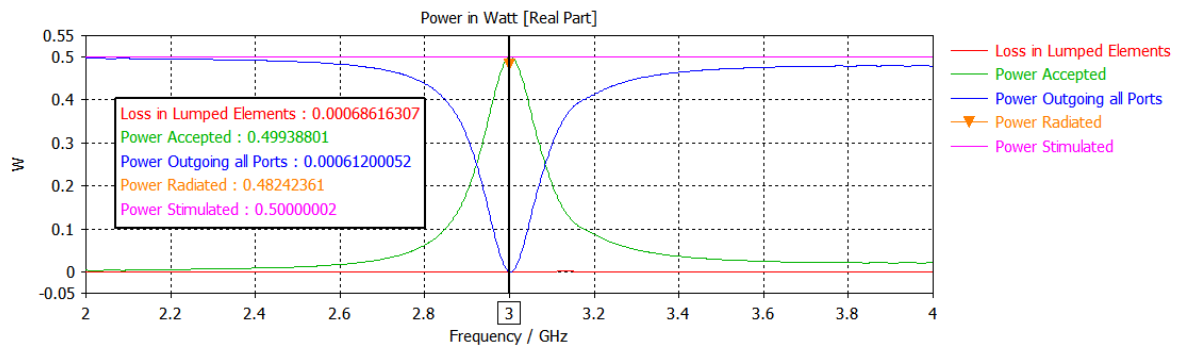


Σχήμα 4.16 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} της κατάστασης “ON-ON-ON-ON”.



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή της κατάστασης “ON-ON-ON-ON”

Συνεχίζοντας με τα αποτελέσματα, παρουσιάζεται το διάγραμμα απώλειας ισχύος. Παρατηρείται εξαιρετικά χαμηλή η απώλεια στην ισχύ, όπου τελικά εξέπεμψε η κεραία ισχύ ίση με 0,48 W (radiated) σε σχέση με τα 0,5 W (stimulated) που ήταν η τροφοδοσία της. Οι απώλειες ήταν διάφορων αιτιών όπως, α) απώλεια στα συγκεντρωτικά στοιχεία και β) στην μη τέλεια προσαρμογή της κεραίας.



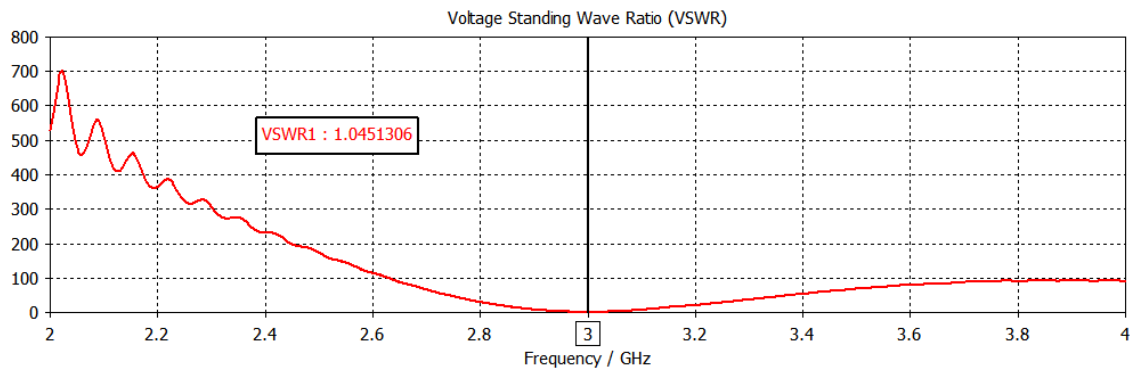
Σχήμα 4.18 Διάγραμμα απώλειας ισχύος στο οποίο φαίνεται αναλυτικά το ποσό της χαμένης αλλά και της εκπέμπουσας ισχύος.

Έπειτα, μέσα από το διάγραμμα στάσιμου κύματος (VSWR) μπορούμε να δούμε ότι στα 3GHz η τιμή είναι ίση με 1,04 η οποία είναι αρκετά κοντινή στην τιμή 1 αποφεύγοντας έτσι την άσκοπη δημιουργία στάσιμων κυμάτων. Αρκετά ικανοποιητικό θα μπορούσε να πει κανείς ότι είναι δε, το διάγραμμα που απεικονίζεται η σύνθετη αντίσταση. Το πραγματικό μέρος φαίνεται να είναι ίσο με 52,2 Ω, όπου είναι κοντά στην ιδανική τιμή των 50 Ω ενώ το φανταστικό μέρος είναι ίσο με -0,46 το οποίο είναι πολύ κοντά στην τιμή 0, η οποία αποτελεί την ιδανική τιμή για το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης. Αυτό προκύπτει από το

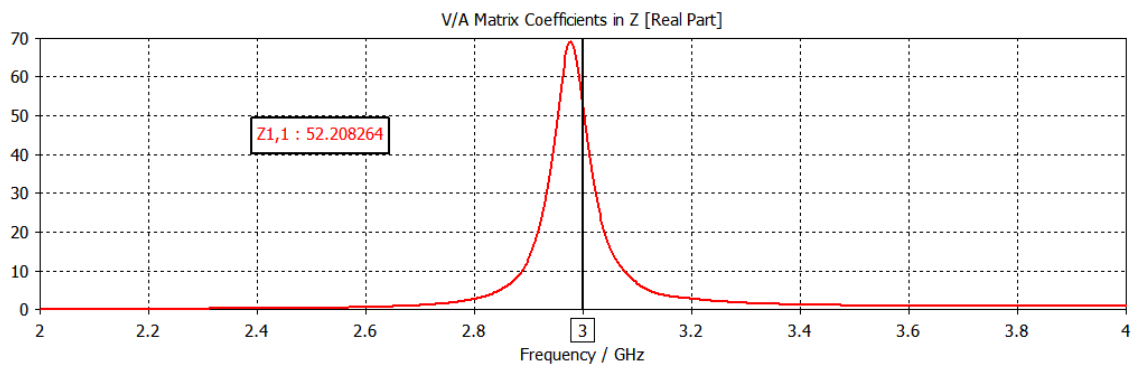
γεγονός ότι θέλουμε το δεύτερο αθροιστικό μέρος της εξίσωσης να έχει τιμή όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μηδέν.

$$Z=R+jX$$

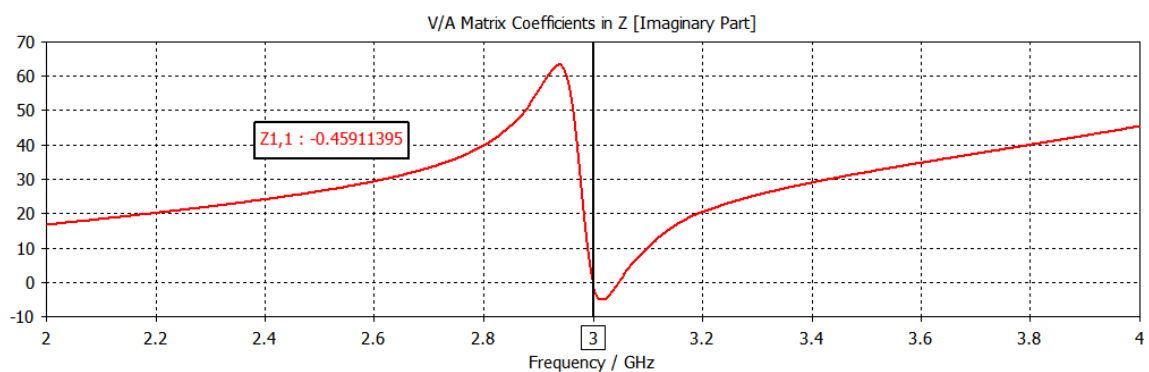
σχέση 4.1



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα του λόγου του στάσιμου κύματος (VSWR) της κατάστασης "ON-ON-ON-ON".



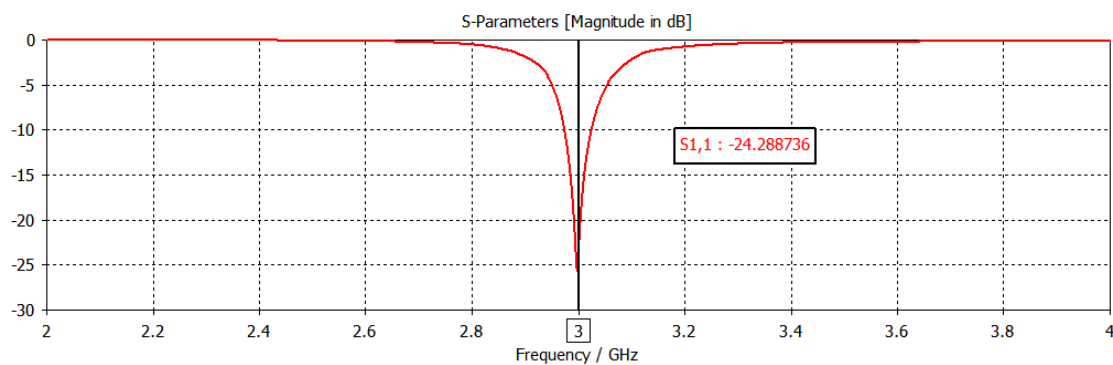
Σχήμα 4.20 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης "ON-ON-ON-ON".



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης "ON-ON-ON-ON".

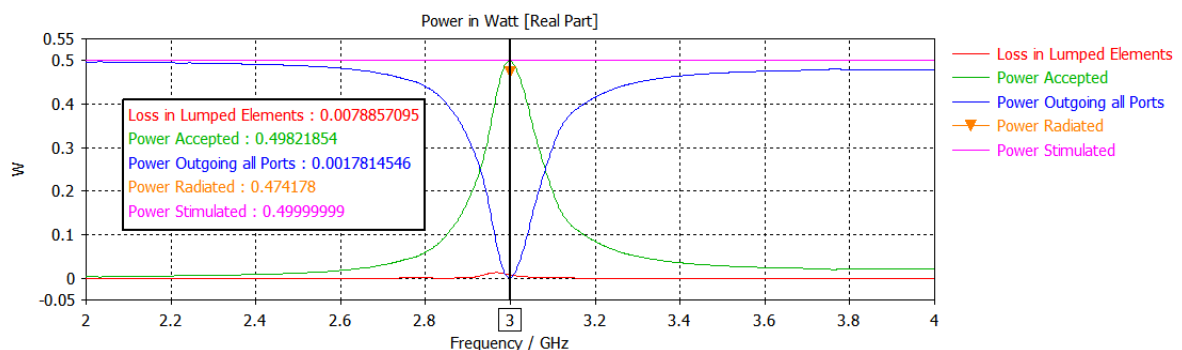
Συνεχίζοντας με τα αποτελέσματα στις υπόλοιπες καταστάσεις της κεραίας παρατηρήθηκε ότι δεν έχουν τεράστιες διαφορές ως προς τον συντελεστή ανάκλασης, το κατευθυντικό κέρδος, την απώλεια ισχύος αλλά και στην τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης. Οπότε για τον παραπάνω λόγο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε μία πιθανή κατάσταση της κεραίας τα οποία είναι πανομοιότυπα με αυτά και των υπόλοιπων καταστάσεων.

Ξεκινώντας με το διάγραμμα σκέδασης S_{11} , παρατηρούμε πως αγγίζει την τιμή των $-24,28$ dB , γεγονός που το καθιστά αρκετά ικανοποιητικό, ενώ το εύρος ζώνης είναι περίπου 11 MHz, το οποίο είναι αισθητά μικρότερο από την περίπτωση όπου όλες οι διόδους p-i-n είναι ενεργοποιημένες.



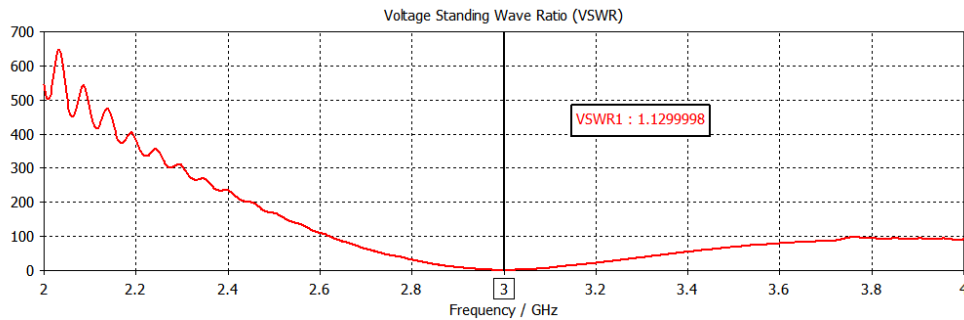
Σχήμα 4.22 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για την κατάσταση "ON-OFF-ON-OFF".

Έπειτα, στο διάγραμμα απώλειας ισχύος είναι φανερό πως μόλις $0,026$ W από την αρχική ισχύ χάθηκαν στα RLC, στο διηλεκτρικό υλικό αλλά και στην ατελή προσαρμογή της κεραίας.



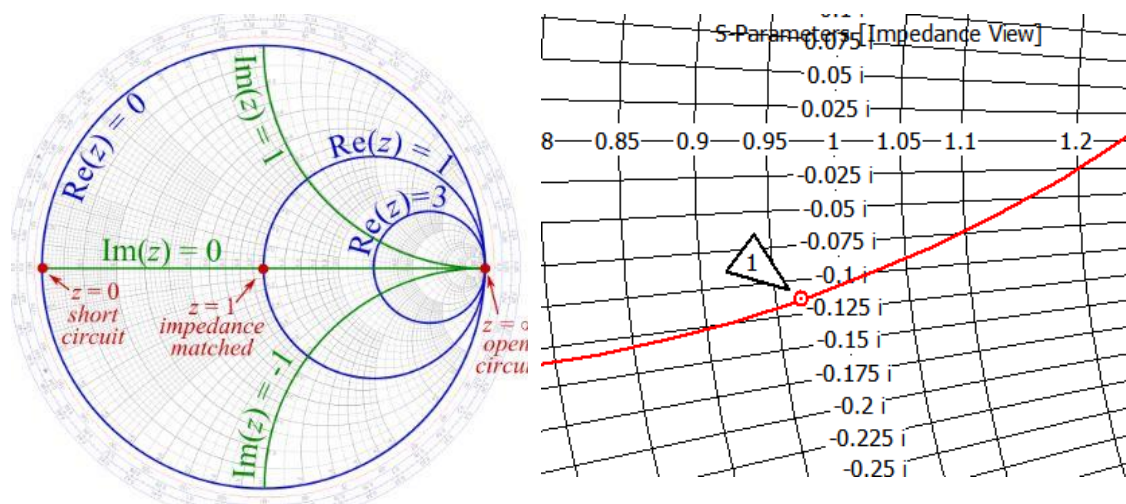
Σχήμα 4.23 Διάγραμμα ισχύος για την κατάσταση "ON-OFF-ON-OFF".

Ικανοποιητικό είναι επίσης και το διάγραμμα του λόγου του στάσιμου κύματος (VSWR), όπως φαίνεται και στο σχήμα έχει ως αποτέλεσμα τιμή ίση με 1,13, η οποία είναι εξαιρετικά κοντά στην βέλτιστη θεωρητική τιμή που είναι η μονάδα.

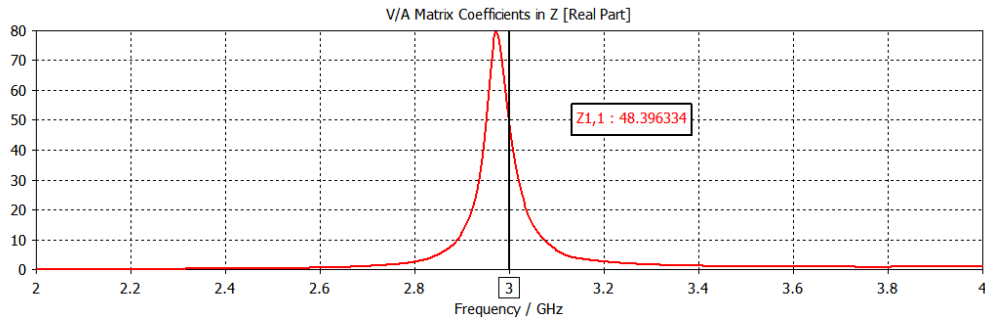


Σχήμα 4.24 Διάγραμμα του λόγου του στάσιμου κύματος (VSWR) της κατάστασης “ON-OFF-ON-OFF”.

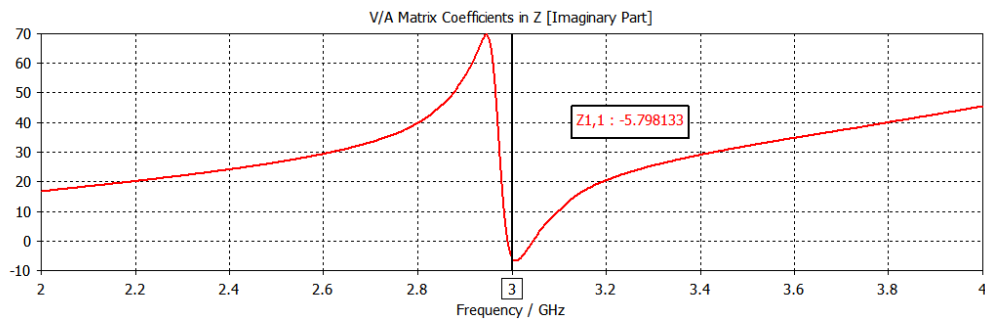
Σημαντικό αποτέλεσμα αποτελεί επίσης και η τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης η οποία αποτελείται από δύο μέρη, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος. Το πραγματικό μέρος έχει τιμή ίση με 48,3 Ohms και φανταστικό ίσο με -5,7 οι οποίες τιμές είναι αρκετά κοντά στο 50 Ohms και στο μηδέν, αντίστοιχα. Για να μπορέσει κανείς να διαπιστώσει πως χρειάζεται να τροποποιήσει την κεραία, πρέπει να ανατρέξει στο διάγραμμα Smith, όπου και περιέχει πληροφορίες για την χωρητικότητα (capacitive) και την επαγωγικότητα (inductive). Στην συγκεκριμένη περίπτωση όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα Smith το σύστημα έχει ελάχιστα αυξημένη χωρητικότητα.



Σχήμα 4.25 Αριστερά φαίνεται το θεωρητικό μοντέλο του διαγράμματος Smith και δεξιά φαίνεται σε μεγέθυνση το διάγραμμα Smith της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.26 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης

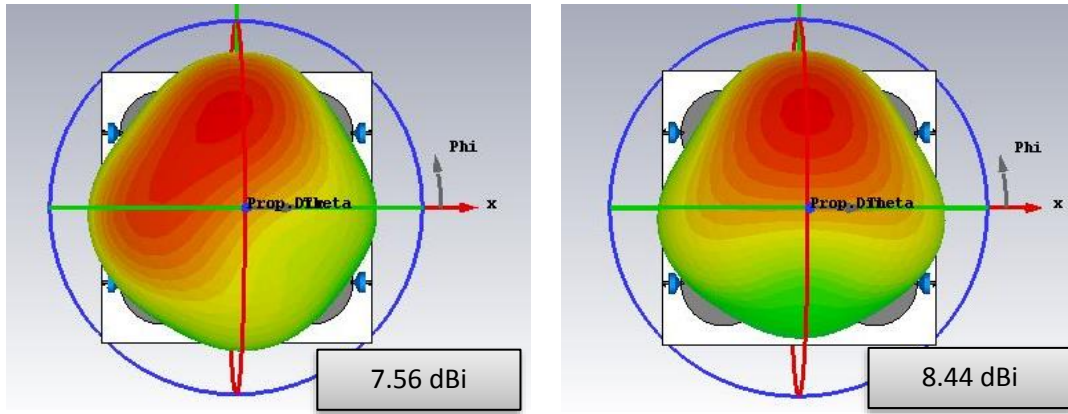


Σχήμα 4.27 Διάγραμμα του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης

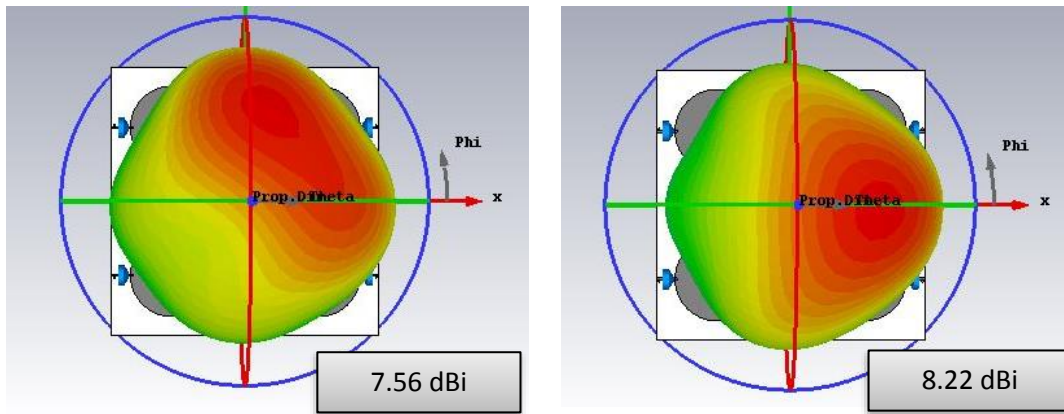
Βέβαια μέχρι στιγμής παρουσιάστηκαν με λεπτομερή τρόπο τα αποτελέσματα για μόνο δύο από τις εννέα διαφορετικές καταστάσεις της κεραίας. Για τον λόγο αυτό στην συνέχεια θα περιλαμβάνονται μόνο το διάγραμμα S_{11} αλλά και το αντίστοιχο διάγραμμα ακτινοβολίας του εκάστοτε συνδυασμού των καταστάσεων των διόδων, με σκοπό την αποφυγή πολλών συνεχόμενων εικόνων για πρακτικούς λόγους.

Θεωρώντας πως η αναφορά στις διόδους ξεκινάει από τα αριστερά προς τα δεξιά ως προς την μπροστινή όψη της κεραίας, όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί είναι οι εξής:

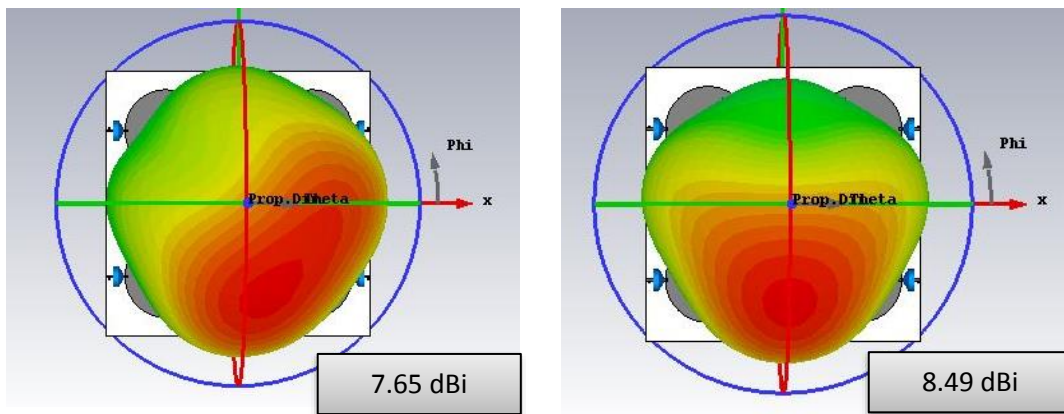
- | | |
|----------------|---------------|
| ON-OFF-OFF-OFF | ON-ON-OFF-OFF |
| OFF-ON-OFF-OFF | OFF-ON-OFF-ON |
| OFF-OFF-ON-OFF | OFF-OFF-ON-ON |
| OFF-OFF-OFF-ON | ON-OFF-OFF-ON |



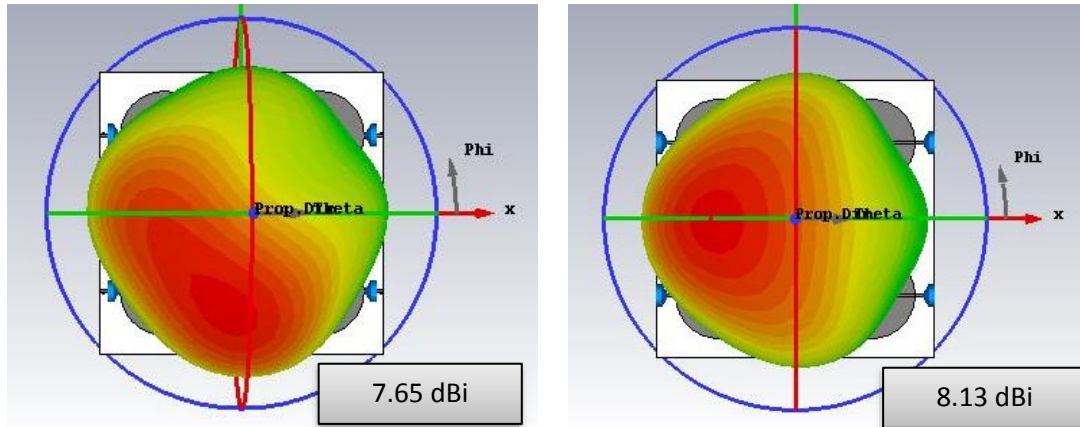
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις καταστάσεις “ON-OFF-OFF-OFF” και “ON-ON-OFF-OFF” .



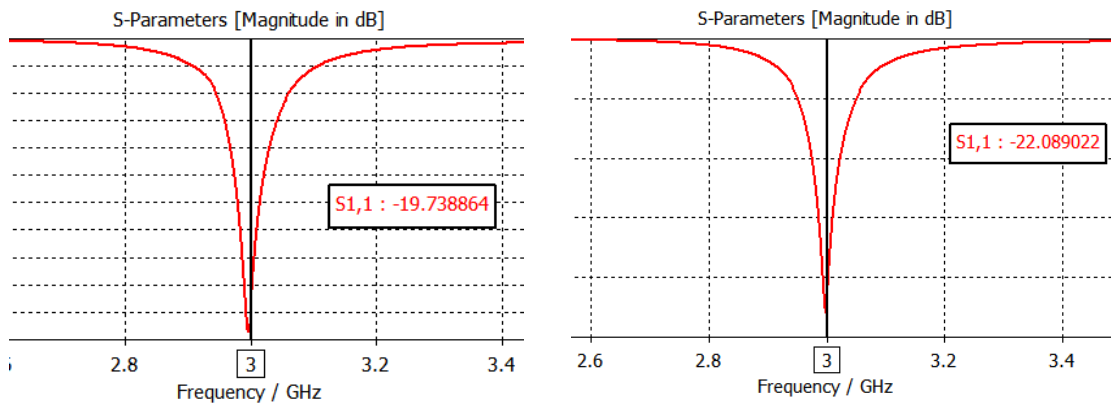
Σχήμα 4.29 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις καταστάσεις “OFF-ON-OFF-OFF” και “OFF-ON-OFF-ON” .



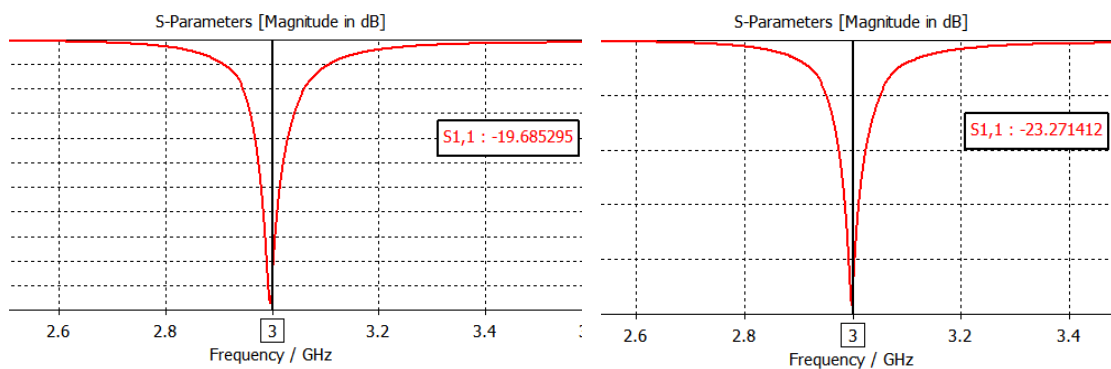
Σχήμα 4.30 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις καταστάσεις “OFF-OFF-OFF-ON” και “OFF-OFF-ON-ON” .



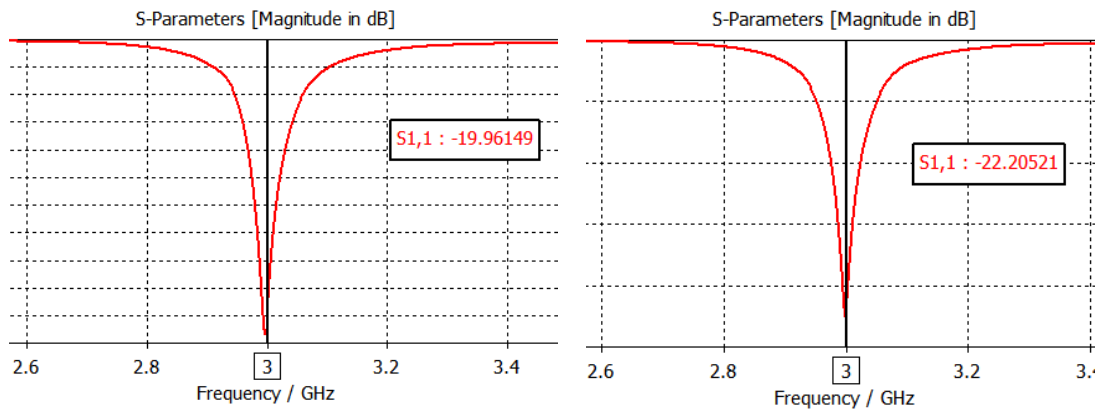
Σχήμα 4.31 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή για τις καταστάσεις “OFF-OFF-ON-OFF” και “ON-OFF-ON-OFF” .



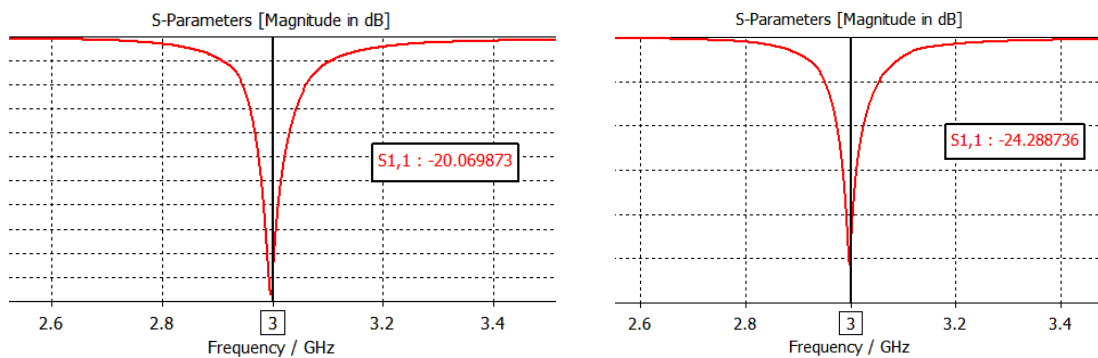
Σχήμα 4.32 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για τις καταστάσεις “ON-OFF-OFF-OFF” και “ON-ON-OFF-OFF” .



Σχήμα 4.33 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για τις καταστάσεις “OFF-ON-OFF-OFF” και “OFF-ON-OFF-ON” .



Σχήμα 4.34 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για τις καταστάσεις “OFF-OFF-OFF-ON” και “OFF-OFF-ON-ON” .



Σχήμα 4.35 Διάγραμμα σκέδασης S_{11} για τις καταστάσεις “OFF-OFF-ON-OFF” και “ON-OFF-ON-OFF” .

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η τιμή του S_{11} είναι περίπου ίση με -24db σε όλες τις περιπτώσεις, η κατευθυντικότητα κοντά στα 7dbi, ενώ το πραγματικό μέρος της αντίστασης άγγιξε την τιμή των 50 Ω με εξαιρετικά μικρή απόκλιση. Έτσι έγινε εφικτή η στρέψη του διαγράμματος ακτινοβολίας χωρίς καμία απολύτως αρνητική συνέπεια στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κεραίας.

Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα και μελλοντική μελέτη

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η αποτύπωση όλων των παρατηρήσεων που σημειώθηκαν κατά τη συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας. Σημαντική έμφαση δίνεται στα σημεία τα οποία δημιούργησαν δυσκολίες κατά το στάδιο της σχεδίασης των κεραιών αλλά και στους περιορισμούς που τέθηκαν για τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

5.1 Συμπεράσματα

Άκρως απαραίτητη κρίθηκε η λεπτομερή αναφορά σε όλες τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών κεραιών με σκοπό την ομαλή ένταξη του αναγνώστη στον κόσμο των κεραιών. Έτσι, με τη συνεισφορά του δεύτερου κεφαλαίου δόθηκε η δυνατότητα σε όποιον διαβάσει αυτή τη διπλωματική εργασία να μπορέσει να κατανοήσει σε ικανοποιητικό βαθμό τα κεφάλαια που πρόκειται να ακολουθήσουν.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα στάδια σχεδιασμού της κεραίας επιθέματος με δύο παρασιτικά στοιχεία, οι διαστάσεις της κεραίας σε αναλυτικούς πίνακες, αλλά και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με αναλυτική επεξήγηση. Αναλυτικότερα, με την τοποθέτηση των δύο ελάχιστα μικρότερων σε διάσταση, σε σχέση με το ενεργό, παρασιτικών στοιχείων έγινε δυνατή η στρέψη του κύριου λοβού ακτινοβολίας κατά $\sim \pm 18^\circ$ μοίρες, έπειτα από πολλαπλές παραμετρικές δοκιμές, μπορούμε να σημειώσουμε ότι ήταν δύσκολη η επιλογή των κατάλληλων τιμών οι οποίες θα είχαν μέγιστα αποτελέσματα σε όλες τις καταστάσεις της κεραίας, οπότε ο συμβιβασμός ήταν αναγκαίος. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε παραμετρική σάρωση στην μεταβλητή της απόστασης, από $\lambda/2$ μέχρι και $\lambda/10$, όπου και αναζητήθηκε η βέλτιστη απόσταση, των παρασιτικών στοιχείων από το ενεργό, η οποία θα είχε ως αποτέλεσμα μεγάλη στρέψη του κύριου λοβού ακτινοβολίας αλλά και ταυτόχρονα ικανοποιητικό διάγραμμα ακτινοβολίας στην κατάσταση “OFF-OFF”. Όσον αφορά την επιλογή του διηλεκτρικού υποστρώματος, οδήγησε την κεραία σε στενή ζώνης λειτουργίας (30MHz) γεγονός που την καθιστά μοναδική και δύσκολη στην χρήση της σε άλλες εφαρμογές, βέβαια αν θέλαμε να αυξήσουμε το εύρος ζώνης θα επιλέγαμε ένα πιο παχύ διηλεκτρικό υπόστρωμα. Τα παρασιτικά στοιχεία ερχόντουσαν σε επαφή με το

επίπεδο της γείωσης με την χρήση κατάλληλων p-i-n διόδων, με τις οποίες επιτεύχθηκε η ηλεκτρονική στρέψη του κύριου λοβού ακτινοβολίας. Κύρια δυσκολία αποτέλεσε η εύρεση ικανοποιητικών διαγραμμάτων σκέδασης S_{11} μεταξύ των καταστάσεων 'ON' και 'OFF'. Ως τρόπος τροφοδοσίας της κεραίας επιλέχθηκε να είναι με μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς η οποία καταλήγει σε συνδετήρα τύπου SMA. Με την αναλυτική διακριτοποίηση της κεραίας παράχθηκαν αναλυτικά αποτελέσματα τα οποία αφορούν την απόδοση της κεραίας, ωστόσο η ορθότητα τόσο της σχεδίασης όσο και της απόδοσης μπορούν μόνο να επαληθευτούν μόνο με την κατασκευή και την μέτρηση της κεραίας σε ανηχοϊκό θάλαμο.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 4 μελετήθηκε και σχεδιάστηκε μία κεραία με ένα ενεργό στοιχείο και τέσσερα κυκλικά παρασιτικά στοιχεία ίδιου μεγέθους με αυτού του ενεργού, ενώ όλες οι απαραίτητες διαστάσεις βρίσκονται αναλυτικά σε πίνακες στην αρχή του κεφαλαίου. Με την χρήση p-i-n διόδων η κεραία είναι ικανή να στρέψει τον κύριο λοβό ακτινοβολίας προς οχτώ κατευθύνσεις ανάλογα με την θέση του δορυφόρου. Αρχικά σχεδιάστηκε το διηλεκτρικό υπόστρωμα με το ενεργό στοιχείο και αφού και στην συνέχεια τοποθετήθηκαν και τα παρασιτικά στοιχεία τα οποία ελέγχονταν με την τοποθέτηση καλωδίου δεσμού (bond wire). Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε ένα πιο παχύ διηλεκτρικό υπόστρωμα σε σχέση με την προηγούμενη κεραία, γεγονός που οδήγησε στην επίτευξη εύρους ζώνης 50MHz. Αφού εξασφαλίστηκε η ομαλή λειτουργία της κεραίας, στη συνέχεια αντικαταστάθηκαν τα καλώδια δεσμού με τα κυκλώματα RLC ώστε να προσομοιωθεί η επίδραση των διόδων στην κεραία, ωστόσο χρειάστηκαν να πραγματοποιηθούν παραμετρικές αλλαγές για να συντονίσει η κεραία στα 3GHz αλλά και να επιτευχθεί ικανοποιητικό διάγραμμα σκέδασης S_{11} . Ως τρόπος τροφοδοσίας της κεραίας επιλέχθηκε να είναι απευθείας το ομοαξονικό ημιάκαμπτο καλώδιο (probe fed). Λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής αλλά και του μεγάλου αριθμού μεταλλικών στοιχείων κοντά στο ενεργό στοιχείο έπρεπε να γίνει πάρα πολύ αναλυτική διακριτοποίηση της κεραίας για να σιγουρευτούμε ότι δεν παράγονται λανθασμένα αποτελέσματα από τις μετρήσεις. Χρειάστηκαν αρκετές προσομοιώσεις για να βρεθούν οι κατάλληλες διαστάσεις οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα ικανοποιητικό διάγραμμα σκέδασης S_{11} , σε όλες τις πιθανές καταστάσεις των p-i-n διόδων. Αναλυτικότερα ήταν αναγκαία η παραμετρική σάρωση της μεταβλητής της απόστασης των παρασιτικών στοιχείων από το ενεργό, και αυτό γιατί μεταβαλλόταν

τόσο το διάγραμμα ακτινοβολίας όλων των ενεργών καταστάσεων όσο και ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} . Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι όσο πιο μικρή γινόταν η απόσταση, τόσο αυξανόταν ο συντελεστής ανάκλασης, αλλά και μίκραινε η γωνία στρέψης του κύριου λοβού ακτινοβολίας, γεγονός μη επιθυμητό. Οπότε έπρεπε να βρεθεί η απόσταση η οποία θα οδηγούσε σε μέγιστη στρέψη του λοβού αλλά και ικανοποιητικό διάγραμμα ακτινοβολίας στην κατάσταση “all-OFF”, γεγονός που επιτεύχθηκε μετά από την παραμετρική σάρωση. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι όπως εσοχές και αλλαγή του σημείου τροφοδοσίας για την επίτευξη κυκλικής πόλωσης, όμως για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας δεν εφαρμόστηκαν οι παραπάνω μέθοδοι.

5.1 Μελλοντική μελέτη

Μεγάλη προσπάθεια καταβλήθηκε για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, ωστόσο είναι σίγουρο πως υπάρχουν ακόμη αρκετά περιθώρια βελτίωσης της τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε σχεδιαστικό επίπεδο.

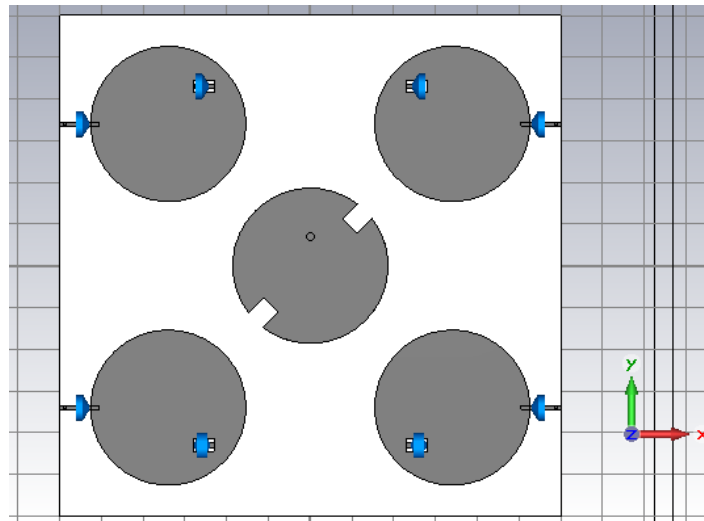
Αρχικά, ως κύριος μελλοντικός στόχος αποτελεί η επανασχεδίαση των κεραιών με σκοπό την επίτευξη της εξολοκλήρου κυκλικής πόλωσης αλλά και την εναλλαγή από δεξιόστροφη σε αριστερόστροφη, και το αντίθετο. Στη συνέχεια, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά διηλεκτρικά υποστρώματα με σκοπό την εύρεση εκείνου του οποίου τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν μεγάλο κατευθυντικό κέρδος αλλά και μεγάλο εύρος λειτουργίας. Επιπρόσθετα, στην πρώτη κεραία θα ήταν ενδιαφέρον η αντικατάσταση των διόδων pin με μεταβλητούς πυκνωτές (varactors) έτσι ώστε να προκύψουν ακόμη περισσότερες δυνατές καταστάσεις της κεραίας. Στην δεύτερη κεραία θα μπορούσαμε να προσθέσουμε περισσότερα παρασιτικά στοιχεία τα οποία θα επιτρέπουν ακόμη μεγαλύτερη ελευθερία στρέψης του κύριου λοβού ακτινοβολίας.

Επίσης ένας άλλος μελλοντικός στόχος αποτελεί η κατασκευή της κεραίας και η τοποθέτηση της μέσα σε ανηχοϊκό θάλαμο με σκοπό την μέτρηση του συντελεστή σκέδασης S_{11} με την χρήση εξειδικευμένου μετρητικού οργάνου (VNA), αλλά και την αποτύπωση του διαγράμματος ακτινοβολίας σε όλες τις καταστάσεις της κεραίας.

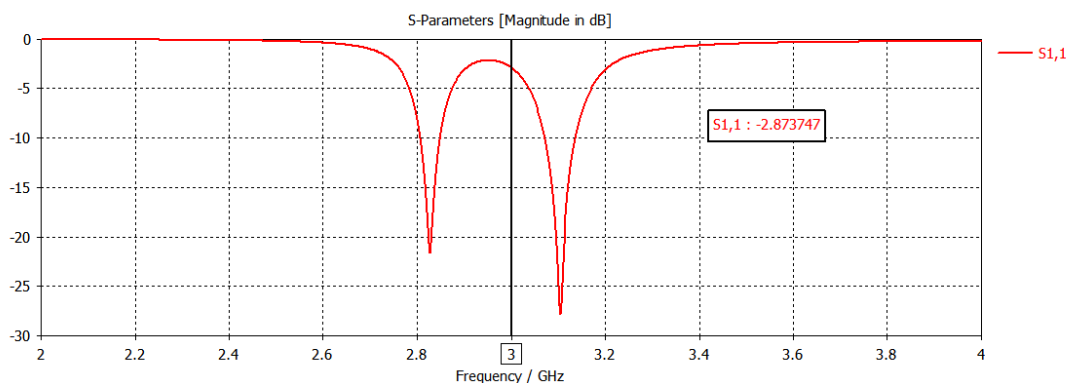
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα Α: Αποτυχημένες προσπάθειες για κυκλική πόλωση στο Κεφάλαιο 4

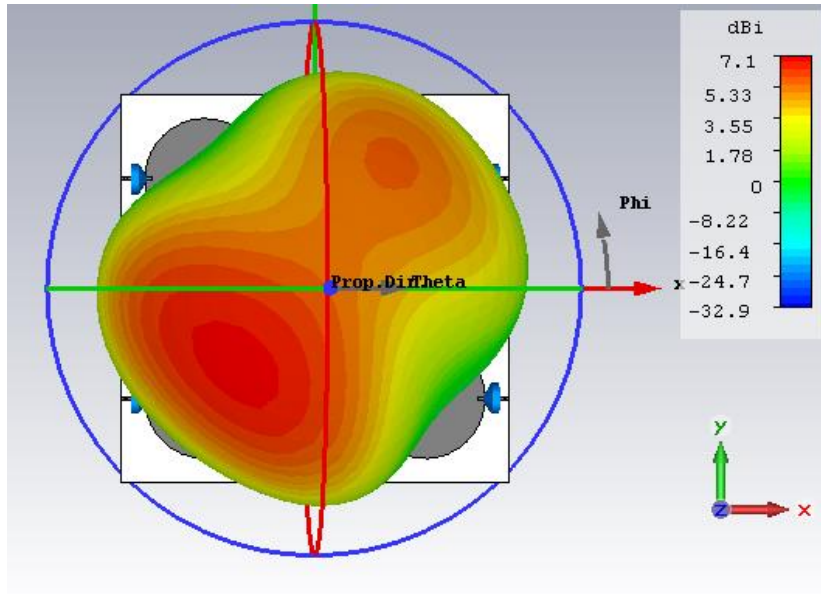
Η κεραία, όπως ειπώθηκε και νωρίτερα δεν έχει ικανοποιητική τιμή στο axial ratio με σκοπό την αριστερόστροφη ή την δεξιόστροφη κυκλική πόλωση. Όμως πραγματοποιήθηκαν κάποιες προσπάθειες για την επίτευξη της, αλλά χωρίς επιτυχία και αυτό γιατί, ενώ η τιμή στο axial ratio ήταν κοντά στο 1, παραμορφωνόντουσαν τα διαγράμματα ακτινοβολίας και οι παράμετροι σκέδασης S_{11} . Αυτό φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα. Ενώ προσομοιώθηκε η κατάσταση “ON-ON-OFF-OFF”, στο παραχθέν διάγραμμα ακτινοβολίας φαίνεται σαν να ήταν η κατάσταση “OFF-OFF-ON-OFF”.



Σχήμα Α1: Δομή κεραίας με εσοχές.



Σχήμα Α2: Διάγραμμα σκέδασης S_{11}



Σχήμα A3: Διάγραμμα ακτινοβολίας

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) *G. Deschamps and W. Sichak, "Microstrip Microwave Antennas," Proc. of Third Symp. on USAF Antenna Research and Development Program, October 18–22, 1953.*
- 2) *R. E. Munson, "Microstrip Phased Array Antennas," Proc. of Twenty-Second Symp. on USAF Antenna Research and Development Program, October 1972.*
- 3) *Robert E Munson, Microstrip antenna structures and arrays, Ball Brothers Research Corporation, Boulder, Colo, 1973, United States Patent 3,921,177*
- 4) *Electronically Steerable Yagi-Uda Microstrip Patch Antenna Array, Derek Gray, Jun Wei Lu, and David V. Thiel, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 46, NO. 5, MAY 1998*
- 5) *Dual-band circularly polarized microstrip antenna for satellite applications, F. Ferrero ; C. Luxey ; G. Jacquemod ; R. Staraj, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 20 June 2005, DOI: 10.1109/LAWP.2004.841622*
- 6) *Theory of ESPAR Design With Their Implementation in Large Arrays, Mohammad Ranjbar Nikkhah, Pedram Loghmannia, J. Rashed-Mohassel, and Ahmed A. Kishk, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 62, NO. 6, JUNE 2014*
- 7) *Reconfigurable dual-slit perturbed patch antenna for circular polarization diversity, Dong-Hyo Lee, Dae-Won Chung, Seongmin Pyo, IEICE Electronics Express / Volume 11 (2014) Issue 15, doi.org/10.1587/elex.11.20140384*
- 8) *Polarization and Radiation Pattern Reconfigurability of a Planar Monopole Fed Loop Antenna for GPS Application, Mohammad M. FAKHARIAN, Pejman REZAEI, Ali A. OROUJI, RADIOENGINEERING, VOL. 25, NO. 4, DECEMBER 2016*
- 9) *Planar Antennas For Satellite Communications, Jorge Sosa-Pedroza, Fabiola Martínez-Zúniga and Mauro Enciso-Aguilar, Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica México*
- 10) *Compact Low-Cost Phased Array of Dielectric Resonator Antenna Using Parasitic Elements and Capacitor Loading, Mohammad Ranjbar Nikkhah, J. Rashed-Mohassel, and Ahmed A. Kishk, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 61, NO. 4, APRIL 2013*

- 11) **High-Gain Aperture Coupled Rectangular Dielectric Resonator Antenna Array Using Parasitic Elements**, Mohammad Ranjbar Nikkhah, J. Rashed-Mohassel, and Ahmed A. Kishk, *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, VOL. 61, NO. 7, JULY 2013
- 12) **A Low-Cost 2 2 Planar Array of Three-Element Microstrip Electrically Steerable Parasitic Array Radiator (ESPAR) Subcells**, Justin J. Luther, Member, IEEE, Siamak Ebadi, Member, IEEE, and Xun Gong, Senior Member, IEEE, *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, VOL. 62, NO. 10, OCTOBER 2014
- 13) Narbudowicz, A. Z. (2013) **Advanced Circularly Polarised Microstrip Patch Antennas**. Doctoral Thesis. Dublin Institute of Technology.
doi:10.21427/D7F31N
- 14) **Introduction to Satellite Communication Third Edition**, Bruce R. Elbert, 2008 ARTECH HOUSE, INC.685 Canton Street Norwood, MA 02062, ISBN-13: 978-1-59693-210-4
- 15) **Reconfigurable Circularly Polarized Microstrip Antenna on a Slotted Ground**, Won-Sang Yoon, Sang-Min Han, Seongmin Pyo, Jaehoon Lee, In-Chul Shin, and Young-Sik Kim, *ETRI Journal*, Volume 32, Number 3, June 2010
- 16) **New Antenna Array Architectures for Satellite Communications**, Miguel A. Salas Natera et al. Universidad Politécnica de Madrid, Spain
- 17) **Pattern-Reconfigurable Microstrip Patch Antenna With Multidirectional Beam for WiMAX Application**, Muzammil Jusoh, Student Member, IEEE, Tamer Aboufoul, Student Member, IEEE, Thennarasan Sabapathy, Student Member, IEEE, Akram Alomainy, Senior Member, IEEE, and Muhammad Ramlee Kamarudin, Senior Member, IEEE, *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, VOL. 13, 2014.
- 18) **MICROSTRIP PATCH ELECTRICALLY STEERABLE PARASITIC ARRAY RADIATORS**, JUSTIN LUTHER
- 19) **The Basics of Patch Antennas**, Updated, D. Orban and G.J.K. Moernaut, Orban Microwave Products, As seen in the September 29, 2009 edition of the RF Globalnet (www.rfglobalnet.com) newsletter.
- 20) C.A. Balanis, **Antenna Theory: Analysis and Design**, 3rd edn. (Wiley, London, 2005)

- 21) ***Parasitic Antenna Arrays for Wireless MIMO Systems***, Antonis Kalis • Athanasios G. Kanatas Constantinos B. Papadias, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, ISBN 978-1-4614-7998-7
- 22) ***A Wideband Microstrip Patch Antenna for 60 GHz Wireless Applications***, M. S. Alam, M. T. Islam, N. Misran¹, J. S. Mandeep Department of Electrical, Electronics & Systems Engineering, Faculty of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, Institute of Space Science, Universiti Kebangsaan Malaysia, *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, ISSN 1392-1215, VOL. 19, NO. 9, 2013, <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.19.9.5651>
- 23) ***SPHERICAL ARRAY ANTENNAS FOR LEO SATELLITE COMMUNICATIONS***, Leonidas Marantis, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Electronic and Electrical Engineering University College London March 2014
- 24) ***SMP1320 Series: Low Resistance, Low Capacitance, Plastic Packaged PIN Diodes***, Skyworks Solutions, Inc. • Phone [781] 376-3000 • Fax [781] 376-3100 • sales@skyworksinc.com • www.skyworksinc.com
- 25) S. A. Schelkunoff, ***Advanced Antenna Theory*** (New York: John Wiley & Sons, Inc, 1952).
- 26) F. E. Terman, ***Radio Engineers' Handbook***, 1st ed. (New York, London: McGraw-Hill Book Co, 1943).
- 27) ***MODERN ANTENNA DESIGN***, Second Edition, THOMAS A. MILLIGAN, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN-13 978-0-471-45776-3.
- 28) ***ANTENNAS FROM THEORY TO PRACTICE***, Yi Huang Kevin Boyle, 2008 John Wiley & Sons Ltd, ISBN 978-0-470-51028-5
- 29) ***Practical Antenna Handbook***, Joseph J. Carr, DOI: 10.1036/0071389318
- 30) ***Reconfigurable Antennas***, Jennifer T. Bernhard 2007, DOI: 10.2200/S00067ED1V01Y200707ANT004
- 31) ***Antennas***, John D. Kraus , Second Edition 1997, Tata McGraw
- 32) ***Reconfigurable Printed Antennas***, Manoj S Parihar, Ananjan Basu, and Shiban K Koul, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi-110016 INDIA

- 33) Reconfigurable dual-slit perturbed patch antenna for circular polarization diversity**, Dong-Hyo Lee, Dae-Won Chung, Seongmin Pyo, *IEICE electronics Express*, Vol11, No.15.1-6
- 34) Microstrip Antenna**, Anuj Mehta, *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 4, ISSUE 03, MARCH 2015, ISSN 2277-8616*
- 35) Signal Processing Challenges in Satellite Communication Networks**, *Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications, Björn Ottersten, 13 September 2016, Livorno, Italy*
- 36) The Coverage Analysis for Low Earth Orbiting Satellites at Low Elevation**, Shkelzen Cakaj, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 5, No. 6, 2014*