



**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ”**

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ - ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ (MICROSTRIP) ΚΕΡΑΙΑΣ
ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

Σταύρος Σπιθουράκης

A.M.: ME1564

Επιβλέπων : Καθηγητής Αθανάσιος Γ. Κανάτας

**ΠΕΙΡΑΙΑΣ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2018**

*Αφιερώνεται στην
αγαπημένη μου οικογένεια....*

Ευχαριστίες

Το παρόν πόνημα δεν αποτελεί μόνο την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών, αλλά και την αρχή για ένα νέο κύκλο σκέψης, διερεύνησης και θέασης της πραγματικότητας. Το αδιάλειπτο ενδιαφέρον μου για την επιστήμη της Πληροφορικής, η αφοσίωσή μου στη σπουδή και τη μελέτη των Μαθηματικών και της Τεχνολογίας αποτέλεσαν τους βασικούς παράγοντες που διαμόρφωσαν το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και τα ερευνητικά ερωτήματα που αναπόδραστα προκύπτουν μετά την ολοκλήρωση αυτής.

Θα ήθελα να εκφράσω τις πιο εγκάρδιες ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κύριο Αθανάσιο Κανάτα για την ευκαιρία που μου προσέφερε να επιβλέψει αυτή την μεταπτυχιακή εργασία, για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου και για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για την περάτωσή της. Οι σημαντικές υποδείξεις, οι εύστοχες επισημάνσεις και οι συμβουλές του συνέβαλαν στο να διαμορφώσω έναν παραγωγικότερο τρόπο σκέψης και δράσης, με απότοκο να αποκομίσω όλα εκείνα τα απαραίτητα εφόδια για την ακαδημαϊκή και την επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στον Μεταδιδάκτορα κύριο Λεωνίδα Μαράντη, που στάθηκε αρωγός, σημαντικός συνεργάτης και υποστηρικτής αυτού του πονήματος, αλλά και στον Υποψήφιο Διδάκτορα κύριο Δημήτριο Ρόγγα. Η ανιδιοτελής προσφορά τους, ο σημαντικός χρόνος που αφιέρωσαν και οι πολύτιμες πληροφορίες που μου μετέδωσαν καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής αυτής της εργασίας, αποτέλεσαν θεμελιώδεις πυλώνες της προσπάθειάς μου.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω σε όλα εκείνα τα άτομα τα οποία συνέβαλλαν στην συντακτική και ορθογραφική επιμέλεια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ ειλικρινά όλους τους καθηγητές που συνεργαστήκαμε στο πλαίσιο των μαθημάτων του Π.Μ.Σ.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστώ κυρίως στην οικογένειά μου, η οποία με στήριξε και με στηρίζει με κάθε τρόπο.

Περίληψη

Η επικοινωνία αποτέλεσε και θα αποτελεί στο διηνεκές του χρόνου τη σημαντικότερη ανάγκη του ανθρώπου-μετά τις βιολογικές. Η αλληλεπίδραση πομπού και δέκτη από την αρχαιότητα έως και σήμερα πραγματοποιείται μέσω ποικίλων διαύλων. Από τα σήματα καπνού και τα ταχυδρομικά περιστέρια μέχρι το έτος ορόσημο 1876, οπότε και ο Alexander Graham Bell δημιούργησε το τηλέφωνο. Έτσι άνοιξε σταδιακά ο δρόμος για τις ασύρματες και υπερσύγχρονες μορφές επικοινωνίας, καθώς τόσο τα φυσικά εμπόδια όσο και οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για διακρατική επικοινωνία κατέστησαν τις επίγειες ενσύρματες ζεύξεις συχνά ατελέσφορες.

Τη λύση στο σημαντικό αυτό πρόβλημα ήρθε να δώσει η ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών, τεχνολογία η οποία επιτελεί κυρίαρχο πλέον ρόλο όχι μόνο στη διάδοση οποιασδήποτε πληροφορίας, αλλά και σε κάθε τομέα της σύγχρονης τεχνολογίας, κυρίως λόγω της αδιάλειπτης λειτουργίας που μπορεί να προσφέρει. Σημαντικότερο παράγοντα στην επιτυχία του συγκεκριμένου μέσου, αλλά και βασικότερο στοιχείο για τη γενικότερη λειτουργία του, αποτελούν τα συστήματα των κεραιών που χρησιμοποιούνται σε πομπό και δέκτη. Με γνώμονα λοιπόν την επιθυμία για συνεχή βελτίωση των τεχνολογιών που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των συγκεκριμένων κεραιών, η παρούσα εργασία εστιάζει στη δημιουργία μιας μικροταινιακής κεραίας κυκλικής πόλωσης, η οποία ακτινοβολεί στη συχνότητα των 3 GHz, και προορίζεται για το επίγειο τμήμα ενός LEO δορυφορικού συστήματος. Οι κεραιές που χρησιμοποιούνται έως και σήμερα στα επίγεια τμήματα των δορυφορικών συστημάτων, είναι κυρίως κεραιές παραβολικών ανακλαστήρων. Αυτές χαρακτηρίζονται από το μεγάλο τους μέγεθος, τη δυσκολία στην τεχνική υλοποίηση, και τον περιορισμό που επιφέρει η μηχανική σάρωση που διαθέτουν. Τα προβλήματα αυτά όμως, μπορούν να αντιμετωπιστούν επιτυχώς με τη χρήση συστοιχιών μικροταινιακών κεραιών με ηλεκτρονική σάρωση. Κύριο χαρακτηριστικό των μικροταινιακών κεραιών είναι η ευκολία στην κατασκευή, το χαμηλό κόστος και το περιορισμένο μέγεθος, σε συνδυασμό με την αρκετά καλή απόδοση που εμφανίζουν κατά τη λειτουργία τους, καθιστώντας τες έναν εκ των κυριότερων υποψηφίων στη δημιουργία δορυφορικών συστημάτων.

Με βάση τα παραπάνω, η εκκίνηση του ερευνητικού έργου πραγματοποιήθηκε με τη μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών των μικροταινιακών κεραιών, ως στοιχείο τυπωμένων κυκλωμάτων, αλλά και του πλήθους των εφαρμογών που βρίσκουν. Στη συνέχεια, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις απαιτήσεις που εμφανίζει ένα δορυφορικό σύστημα LEO κατηγορίας. Τέλος, έπειτα από τη σταδιακή ανάλυση και σχεδίαση διαφόρων μοντέλων μικροταινιακών κεραιών, με τη χρήση του ηλεκτρομαγνητικού προσομοιωτή CSTTM, προέκυψε ο τύπος μικροταινιακής κεραίας NOSSIPRA, ο οποίος εμφανίζει άριστα αποτελέσματα όχι μόνο σε ό,τι αφορά το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας σε σχέση με την τροφοδοτούμενη, αλλά κυρίως στην ποιότητα της κυκλικής πόλωσης, που αποτελούσε και την κύρια επιδίωξη της παρούσας εργασίας.

Abstract

Communication has been and will be the most important need of man-after biological. From antiquity to the present day, transmitter and receiver interaction is carried out through a variety of ways. From smoke signals and the pigeons until the landmark year 1876, when Alexander Graham Bell invented the phone. This has gradually gave rise to wireless and ultra-modern forms of communication, as both physical barriers and ever-increasing needs for trans-national communication have made terrestrial wired links often inadequate.

The solution to this important problem was provided by the development of satellite communications, a technology that plays a dominant role not only in the dissemination of any information, but also in every field of modern technology, mainly due to the uninterrupted operation it can offer. The antenna systems employed in the transmitter and receiver are the most important factor for its success, but also the most important element for its general function. Therefore, taking into account the need of continuous improvement of the technologies that characterize the operation of these antennas, the present work focuses on the development of a microstrip antenna of circular polarization, which radiates at the frequency of 3 GHz, and is intended for the terrestrial part of a LEO satellite system. The antennas used to date in the terrestrial portions of satellite systems, are mainly antennas of parabolic reflectors. These are characterized by their large size, the difficulty in technical implementation, and the limitation of their mechanical scanning. These problems however, can be successfully addressed by the use of microstrip antenna arrays with electronic scanning. The main features of microstrip antennas are the ease of manufacture, their low cost and limited size, in addition with their quite good performance they demonstrate, making them one of the major candidates in the creation of satellite systems.

Based on the above, the first step of this research work was the study of the technical characteristics of the microstrip antennas, as a printed circuit element, but also in the number of applications they are used. Exceptional attention was given to the requirements of a LEO satellite system. Finally, after the gradual analysis and design of various models of microstrip antennas using the CSTTM electromagnetic simulator, the NOSCIPRA type of microstrip antenna was created, providing excellent results not only in the reflection coefficient, but mainly in the quality of circular polarization which was the main objective of this work.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Abstract	iii
Περιεχόμενα	v
Λίστα Σχημάτων	xi
Λίστα Πινάκων.....	xix
Κατάλογος Συντμήσεων.....	xxi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Πρόλογος	1
1.2 Κίνητρα.....	2
1.3 Στόχοι.....	2
1.4 Δομή της εργασίας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	5
2.1 Γραμμές μεταφοράς	5
2.1.1 Παράμετροι γραμμών μεταφοράς.....	6
2.1.2 Διάδοση Η/Μ κύματος σε γραμμή μεταφοράς	7
2.2 Μικροταινιακή τεχνολογία	8
2.3 Μικροταινιακές γραμμές (Microstrip Lines)	9
2.3.1 Χαρακτηριστικά μικροταινιακών γραμμών.....	10

2.3.2 Ακτινοβολία μικροταινιακής γραμμής	11
2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία	14
2.3.4 Φυσικές διαστάσεις.....	14
2.3.5 Διηλεκτρική σταθερά και εφαπτομένη απωλειών	15
2.3.6 Άλλοι παράγοντες	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ (MICROSTRIP ANTENNAS).....17

3.1 Εισαγωγή	17
3.2 Βασικά χαρακτηριστικά.....	18
3.3 Επιλογή υποστρώματος	20
3.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	22
3.5 Εφαρμογές	25
3.5.1 Κινητές και Δορυφορικές επικοινωνίες.....	25
3.5.2 Συστήματα radar	29
3.5.3 Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS)	30
3.5.4 Συστήματα τηλεανίχνευσης (RFID)	31
3.5.5 Ασύρματα δίκτυα (WLAN)	33
3.5.6 Βιοϊατρικά συστήματα ακτινοβολίας.....	35
3.6 Μέθοδοι τροφοδοσίας.....	36
3.6.1 Άμεση τροφοδοσία μέσω τυπωμένης γραμμής (coplanar feedline)	36
3.6.2 Άμεση τροφοδοσία μέσω ομοαξονικού συνδετήρα (coaxial probe-fed).....	39

3.6.3 Τροφοδοσία με άμεση σύζευξη (proximity coupling).....	41
3.6.4 Τροφοδοσία με σύζευξη μέσω σχισμής (aperture coupling).....	43
3.7 Μηχανισμός ακτινοβολίας.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΣΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....	49
4.1 Εισαγωγή	49
4.2 Τροχιές δορυφόρων	50
4.2.1 Δορυφόροι γεωσύγχρονης τροχιάς (Geosynchronous Orbit – GSO)	51
4.2.2 Δορυφόροι υψηλής ελλειπτικής τροχιάς (Highly Elliptical Orbit – HEO)	53
4.2.3 Δορυφόροι μέσης τροχιάς (Medium Earth Orbit – MEO).....	54
4.2.4 Δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit – LEO).....	56
4.3 Αρχιτεκτονική δορυφορικών συστημάτων	58
4.4 Δορυφορικά συστήματα LEO	59
4.5 Επίγειο τμήμα LEO συστήματος	61
4.6 Η κυκλική πόλωση στο επίγειο τμήμα LEO συστήματος	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ	67
5.1 Εισαγωγή	67
5.2 Μικροταινιακή κεραία τετραγωνικού επιθέματος (patch) με σχισμή στη διαγώνιο του.....	67
5.2.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις	68

5.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	71
5.3 Μικροταινιακή κεραία κυκλικού επιθέματος με σχισμή σε μία διάμετρό του	73
5.3.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις	74
5.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	74
5.4 Μικροταινιακή κεραία τετραγωνικού δακτυλίου και διπλού υποστρώματος	76
5.4.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις	76
5.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	79
5.5 Μικροταινιακή κεραία κυκλικού δακτυλίου και διπλού υποστρώματος.....	81
5.5.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις	81
5.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	82
5.6 Μικροταινιακή κεραία τετραγωνικού δακτυλίου και διπλού υποστρώματος με χρήση SMA connector	84
5.6.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις	87
5.6.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	88
5.7 Μικροταινιακή κεραία τύπου NOSCIPRA (NON-Serially proximity coupled Circularly Polarized Ring Antenna)	91
5.7.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις	91
5.7.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ	
ΕΡΕΥΝΑ.....	103
6.1 Συμπεράσματα	103
6.2 Μελλοντική έρευνα.....	105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	111
A.1 Πόλωση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων.....	111
A.2 Διάγραμμα Ακτινοβολίας.....	112
A.3 Εμπέδηση Κεραιών	114
A.4 Παράμετροι Σκέδασης (S-Parameters)	114
A.5 VSWR	116
A.6 Διάνυσμα Poynting	117
A.7 CST	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	121

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστικοί τύποι γραμμών μεταφοράς.....	6
Σχήμα 2.2 Οπτική αναπαράσταση των R,L,G και C παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς	7
Σχήμα 2.3 Κύκλωμα με ομοαξονική γραμμή.....	7
Σχήμα 2.4 Εγκάρσια όψη της ομοαξονικής γραμμής με τις κατευθύνσεις των πεδίων	8
Σχήμα 2.5 Γεωμετρία μιας τυπικής μικροταινιακής γραμμής	9
Σχήμα 2.6 Ακτινοβολία μικροταινιακής γραμμής	10
Σχήμα 2.7 Hybrid mode – Μη μηδενικές συνιστώσες δυναμικών γραμμών Ηλεκτρικού (πάνω) και Μαγνητικού (κάτω) πεδίου.....	12
Σχήμα 2.8 Φυσική αναπαράσταση σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς	13
Σχήμα 2.9 Μικροταινιακή γραμμή με κενό αέρα μεταξύ υποστρώματος και επιπέδου γείωσης.....	16
Σχήμα 3.1 Τυπική μικροταινιακή κεραία η οποία τροφοδοτείται μέσω τυπωμένης γραμμής στο ίδιο επίπεδο – απεικονίζονται και οι σχετικές της διαστάσεις με αυτό (αριστερά) Σχηματική αναπαράσταση μικροταινιακής κεραίας που τροφοδοτείται μέσω ομοαξονικού συνδετήρα του οποίου ο εσωτερικός αγωγός εκτείνεται μέχρι το επίθεμα (δεξιά)	18
Σχήμα 3.2 Προτεινόμενα σχήματα του ακτινοβόλου επιθέματος μιας μικροταινιακής κεραίας.....	20
Σχήμα 3.3 Εφαρμογή της MIMO τεχνολογίας (MultiUser-MIMO) σε μία σύγχρονη κινητή συσκευή	26
Σχήμα 3.4 Χάρτης παγκόσμιας κάλυψης του συστήματος Iridium	28

Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση δορυφόρου του συστήματος Iridium	28
Σχήμα 3.6 (α) Συστοιχία μικροταινιακών κεραιών που χρησιμοποιείται σε εφαρμογή radar πάνω σε πλοίο (β) Τύπος μικροταινιακής κεραίας Franklin	29
Σχήμα 3.7 Σχηματική αναπαράσταση λήψεως σημάτων από αεροσκάφος με χρήση τεχνολογίας SAR (αριστερά) Συστοιχία μικροταινιακών κεραιών που χρησιμοποιείται σε εφαρμογή SAR πάνω σε αεροσκάφος (δεξιά)	30
Σχήμα 3.8 Μικροταινιακές κεραίες GPS για διάφορες εφαρμογές πλοήγησης	31
Σχήμα 3.9 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος RFID	32
Σχήμα 3.10 Εφαρμογή της RFID τεχνολογίας στις σύγχρονες ανάγκες – χρήση παράλληλα με barcode για μεγαλύτερη ασφάλεια	32
Σχήμα 3.11 Dual-Band MIMO κεραία για εφαρμογές σε LTE και WLAN συστήματα	34
Σχήμα 3.12 Συστοιχία μικροταινιακών κεραιών διπλής πόλωσης για εφαρμογή σε Wi-Fi συστήματα.....	34
Σχήμα 3.13 Σχηματική αναπαράσταση μιας εμφυτεύσιμης μικροταινιακής κεραίας και της σχετικής της θέσης στο ανθρώπινο δέρμα	35
Σχήμα 3.14 Σχηματική αναπαράσταση τροφοδοσίας του επιθέματος μέσω τυπωμένης γραμμής με τη χρήση μετασχηματιστή $\lambda/4$ για καλύτερη προσαρμογή της εμπέδησης	37
Σχήμα 3.15 Σχεδίαση μικροταινιακής κεραίας σε H/M προσομοιωτή με τη χρήση σχισμών στο σημείο επαφής της γραμμής τροφοδοσίας με το ακτινοβόλο επίθεμα (χρήση ιδεατού port τροφοδοσίας) (πάνω) Η S_{11} παράμετρος σκέδασης της κεραίας που δείχνει ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό ενέργειας ανακλάται από τη διάταξη (κάτω)	38

Σχήμα 3.16 Μικροταινιακή κεραία με τροφοδοσία μέσω ομοαξονικού συνδετήρα (άνω και κάτω μέρος) (πάνω) Η S11 παράμετρος σκέδασης της κεραίας δείχνει άριστη μετατροπή της ενέργειας τροφοδοσίας σε ακτινοβολούμενη ενέργεια (κάτω)	40
Σχήμα 3.17 Μικροταινιακή κεραία δύο υποστρωμάτων- Η ενέργεια στην περίπλοκη διάταξη του επιθέματος μεταφέρεται απευθείας μέσω του ομοαξονικού συνδετήρα της βάσης, κάτω από το επίπεδο γείωσης	41
Σχήμα 3.18 Σχηματική αναπαράσταση μικροταινιακής κεραίας η οποία τροφοδοτείται με τη μέθοδο της άμεσης σύζευξης	42
Σχήμα 3.19 Σχηματική αναπαράσταση μικροταινιακής κεραίας η οποία τροφοδοτείται με τη μέθοδο της σύζευξης μέσω σχισμής	43
Σχήμα 3.20 Σχηματική αναπαράσταση ακτινοβολίας μιας μικροταινιακής κεραίας λόγω των κροσσών ακτινοβολίας	44
Σχήμα 3.21 3D αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας όπου παρατηρείται το μέγιστο της ακτινοβολίας στο ζενίθ	45
Σχήμα 3.22 Αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας σε πολικές συντεταγμένες – άποψη από το xy επίπεδο	46
Σχήμα 3.23 Αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας σε πολικές συντεταγμένες – άποψη από το yz επίπεδο	46
Σχήμα 3.24 Κατανομή της τάσης, της εμπέδησης, και του ρεύματος μιας μικροταινιακής κεραίας που τροφοδοτείται μέσω διόδου	47
Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών δορυφορικών τροχιών	53
Σχήμα 4.2 Συγκριτική απεικόνιση των τριών βασικών τροχιών σε ό,τι αφορά την απόσταση τους από το έδαφος – Σύγκριση με τη Σεληνιακή τροχιά	54
Σχήμα 4.3 Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (International Space Station – ISS)	55

Σχήμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση των διαφορετικών τύπων ανακλαστήρα στο επίγειο τμήμα – Χρήση μονού ανακλαστήρα με front-fed ή off-axis μορφή τροφοδοσίας (πάνω) Χρήση διπλού ανακλαστήρα με επιλογή παραβολικού είτε υπερβολικού δεύτερου κατόπτρου (κάτω).....	63
Σχήμα 4.5 Σχηματική αναπαράσταση των δύο κάθετων συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου και της κυκλικής πόλωσης που δημιουργούν κατά το ταξίδι τους στον ελεύθερο χώρο	65
Σχήμα 5.1 Μπροστινή όψη της κεραίας - Διακρίνεται το διηλεκτρικό υπόστρωμα και πάνω σε αυτό το τετραγωνικό επίθεμα με την ορθογώνια σχισμή στη διαγώνιό του	69
Σχήμα 5.2 Οπίσθια όψη της κεραίας - Διακρίνεται η δομή του ομοαξονικού συνδετήρα με και χωρίς τη θύρα κυματοδηγού.....	69
Σχήμα 5.3 Υπολογισμός διαστάσεων του ομοαξονικού συνδετήρα μέσω του προγράμματος τηρώντας την απαίτηση της σύνθετης αντίστασης των 50 Ω	70
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}	71
Σχήμα 5.5 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα.....	72
Σχήμα 5.6 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης	72
Σχήμα 5.7 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας.....	73
Σχήμα 5.8 Μπροστινή όψη της κεραίας - Διακρίνεται το διηλεκτρικό υπόστρωμα και πάνω σε αυτό το κυκλικό επίθεμα με την ορθογώνια σχισμή σε μια διάμετρό του	74
Σχήμα 5.9 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}	75
Σχήμα 5.10 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα	75

Σχήμα 5.11 Άνω πλευρά της μικροταινιακής κεραίας - Διακρίνεται ο τετραγωνικός δακτύλιος αλλά και τα δύο υποστρώματα (αριστερά) Κάτω πλευρά της κεραίας - Διακρίνεται ο ομοαξονικός συνδετήρας και η θύρα κυματοδηγού (δεξιά)	76
Σχήμα 5.12 Άνω μέρος της κεραίας - Διακρίνεται η σχετική θέση της τυπωμένης γραμμής που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο υποστρώματα σε σχέση με το επίθεμα στο πάνω μέρος (αριστερά) Όψη της κεραίας στην οποία διακρίνεται το μεταλλικό pin του ομοαξονικού συνδετήρα που καταλήγει στο ένα άκρο της τυπωμένης γραμμής (δεξιά).....	77
Σχήμα 5.13 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}	79
Σχήμα 5.14 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα	79
Σχήμα 5.15 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης.....	80
Σχήμα 5.16 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας στο μακρινό πεδίο	80
Σχήμα 5.17 Άνω πλευρά της μικροταινιακής κεραίας - Διακρίνεται ο κυκλικός δακτύλιος αλλά και τα δύο υποστρώματα	81
Σχήμα 5.18 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}	82
Σχήμα 5.19 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα	83
Σχήμα 5.20 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης.....	83
Σχήμα 5.21 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας στο μακρινό πεδίο	84
Σχήμα 5.22 SMA connector συνδεδεμένος με δύο θύρες, μία διακριτή (discrete) στο μπροστινό του ακροδέκτη και μία θύρα κυματοδηγού (waveguide) στην υποδοχή του	85
Σχήμα 5.23 Προσομοίωση του συνδετήρα για τον έλεγχο λειτουργίας του ως προς την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου.....	85

Σχήμα 5.24 Προσομοίωση του συνδετήρα για τον έλεγχο λειτουργίας του ως προς την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου	86
Σχήμα 5.25 Άποψη της κεραίας – Διακρίνεται η σύνδεση του SMA connector με την μεγάλη πλευρά του πετάλου	86
Σχήμα 5.26 Πλαϊνή όψη της κεραίας – Διακρίνεται ο τρόπος ενσωμάτωσης του SMA connector μεταξύ των δύο υποστρωμάτων	87
Σχήμα 5.27 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}	88
Σχήμα 5.28 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα	89
Σχήμα 5.29 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης	89
Σχήμα 5.30 Εμπρόσθια όψη της κεραίας NOSCIPRA – Διακρίνονται τα τρία υποστρώματα, ο SMA connector που βρίσκεται προσαρτημένος στη μία πλευρά εξ αυτών, και ο μεταλλικός κυκλικός δακτύλιος στην κορυφή.....	92
Σχήμα 5.31 Οπίσθια όψη της κεραίας NOSCIPRA – Διακρίνεται η τυπωμένη γραμμή στην πίσω πλευρά του υποστρώματος και ο τρόπος με τον οποίο βρίσκεται σε επαφή με τον μεταλλικό ακροδέκτη του SMA connector.....	92
Σχήμα 5.32 Όψη από το εσωτερικό της κεραίας NOSCIPRA – Διακρίνονται τα δύο μεταλλικά pin που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της – Ξεχωρίζει το κενό (πάχους 0.5 mm) μεταξύ του αριστερού pin (που καταλήγει έως την τυπωμένη γραμμή στη βάση) και του επιπέδου γείωσης, ώστε να αποφεύγεται δεύτερη εστία γείωσης	93
Σχήμα 5.33 Όψη από το εσωτερικό της κεραίας NOSCIPRA – Διακρίνεται το μεταλλικό τόξο το οποίο τροφοδοτείται από το αριστερό pin μέσω της τυπωμένης γραμμής στο πίσω μέρος της κεραίας, και γειώνεται ταυτόχρονα μέσω του δεξιού pin το οποίο εφάπτεται στο επίπεδο γείωσης	93
Σχήμα 5.34 Συνολική παρουσίαση των μεταλλικών στοιχείων της κεραίας NOSCIPRA	94

Σχήμα 5.35 Μενού επιλογής αριθμού κελιών διακριτοποίησης του χώρου	96
Σχήμα 5.36 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}	97
Σχήμα 5.37 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα	98
Σχήμα 5.38 Διάγραμμα ισχύος της κεραίας NOSCIPRA.....	98
Σχήμα 5.39 Διάγραμμα του λόγου του στάσιμου κύματος της κεραίας NOSCIPRA	99
Σχήμα 5.40 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης.....	99
Σχήμα 5.41 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας NOSCIPRA	100
Σχήμα 5.42 Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας NOSCIPRA – όψη από το zy-επίπεδο (αριστερά) και το xy-επίπεδο (δεξιά).....	100
Σχήμα 5.43 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολικές συντεταγμένες που εξηγεί τη φορά της κυκλικής πόλωσης.....	101
Σχήμα 6.1 Εσωτερική όψη της κεραίας – Διακρίνεται η σχετική θέση του μεταλλικού πετάλου σε σχέση με τον κυκλικό δακτύλιο της επιφάνειας αλλά και η σύνδεση των δύο πλευρών του με τους δύο ομοαξονικούς συνδετήρες.....	106
Σχήμα 6.2 Κάτω πλευρά της κεραίας – Διακρίνονται οι δύο ομοαξονικοί συνδετήρες, οι οποίοι τροφοδοτούνται από δύο θύρες κυματοδηγού.....	106
Σχήμα 6.3 Άποψη της κεραίας η οποία χρησιμοποιεί δύο SMA connectors (κατ' επιλογή) για την τροφοδοσία της.....	107
Σχήμα 6.4 Εσωτερική όψη της κεραίας – Διακρίνεται η σχετική θέση του μεταλλικού πετάλου σε σχέση με τον τετραγωνικό δακτύλιο της επιφάνειας αλλά και ο τρόπος σύνδεσης των πλευρών του πετάλου με τους δύο SMA connectors	107

Σχήμα 6.5 Άποψη της reconfigurable κεραίας – Διακρίνονται κατά σειρά από αριστερά: Ενδιάμεσα των δύο υποστρωμάτων – η θύρα κυματοδηγού, η τυπωμένη γραμμή υπεύθυνη για τη μεταφορά της ενέργειας τροφοδοσίας, το switch και οι άκρες των πλευρών του πετάλου - Στο πάνω μέρος της κεραίας (δεύτερο υπόστρωμα) βρίσκεται ο τετραγωνικός δακτύλιος	108
Σχήμα 6.6 Εσωτερικό της reconfigurable κεραίας – Διακρίνεται η θέση του πετάλου μεταξύ των δύο υποστρωμάτων σε σχέση με αυτή του ακτινοβόλου επιθέματος της κορυφής	109
Σχήμα 6.7 Άποψη του switch – Διακρίνεται ο τρόπος σύνδεσης του στα αριστερά με την τυπωμένη γραμμή τροφοδοσίας μέσω μεταλλικής τριγωνικής επιφάνειας, και στα δεξιά τα δύο σημεία επαφής του με τις πλευρές του πετάλου.....	109
Σχήμα 6.8 Εσωτερική δομή του switch – Διακρίνεται μία μεταλλική γραμμή η οποία ενώνει το pin εισόδου με αυτό της εξόδου στα δεξιά	110
Σχήμα A. 1 Γραμμική πόλωση κύματος (αριστερά) Κυκλική πόλωση κύματος (κέντρο) Ελλειπτική πόλωση κύματος (δεξιά).....	111
Σχήμα A. 2 Απεικόνιση σε δύο διαστάσεις ενός τυπικού κατευθυντικού διαγράμματος ακτινοβολίας – Διακρίνονται ο κύριος λοβός ακτινοβολίας, ο οπίσθιος και οι πλευρικοί.....	112
Σχήμα A. 3 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο μιας ομοιοκατευθυντικής κεραίας.....	113
Σχήμα A. 4 Απεικόνιση του διανύσματος Poynting σε σχέση με τη ροή ενέργειας σε ένα τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα.....	117

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1 Σχετικές τιμές απόδοσης κεραίας με τετραγωνικό επίθεμα	24
Πίνακας 5.1 Τιμές παραμέτρων σχεδίασης των επιμέρους στοιχείων της κεραίας	70
Πίνακας 5.2 Τιμές παραμέτρων σχεδίασης των επιμέρους στοιχείων της κεραίας	78
Πίνακας 5.3 Τιμές παραμέτρων σχεδίασης της κεραίας NOSCIPRA.....	95

Κατάλογος Συντμήσεων

CST	Computer Simulation Technology
dB	Decibels
dB_i	Decibels isotropic
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mm	Millimeter
MSAT	Mobile Satellite
ms	Millisecond
ns	Nanosecond
RF	Radiofrequency
SMA	Sub Miniature version A
TEM	Transverse Electromagnetic Mode
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
Ω	Ohm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος

Εν έτη 2018, οι ασύρματες επικοινωνίες όχι μόνο έχουν εδραιώσει την παρουσία τους στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και των δικτύων, αλλά μπορεί κανείς να πει πως πλέον εμφανίζουν κυρίαρχο ρόλο συγκριτικά με τις υπόλοιπες μορφές επικοινωνίας. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό από το γεγονός πως οι ασύρματες επικοινωνίες παρουσιάζουν ασύγκριτη ευκολία στην υλοποίησή τους εν συγκρίσει με κάθε ενσύρματη μορφή ζεύξεων, κυρίως σε ό,τι αφορά μεγάλες αποστάσεις.

Ωστόσο, οι επίγειες ασύρματες ζεύξεις παρουσιάζουν αδυναμίες καθώς περιορίζονται από τα γήινα φυσικά εμπόδια (καμπυλότητα της Γης, βουνά, δόμηση αστικών κέντρων κλπ.). Με την κατάκτηση του διαστήματος από τον άνθρωπο και τη γενικότερη δραστηριότητά του σε αυτό, την αδυναμία αυτή ήρθαν να καλύψουν οι δορυφορικές ζεύξεις, οι οποίες συνδυάζουν τις βασικές αρχές και δομές των επίγειων ασύρματων επικοινωνιών. Η αδιάλειπτη παρουσία που μπορεί να προσφέρει ιδίως το διαστημικό τμήμα ενός δορυφορικού συστήματος, έχει οδηγήσει στη δημιουργία εκατοντάδων δορυφορικών ζεύξεων και δικτύων ανά τον κόσμο, καθιστώντας έτσι τον τομέα των δορυφορικών επικοινωνιών τον πλέον κυρίαρχο στις επικοινωνίες, στη διάδοση των πληροφοριών, στην εξάπλωση του Internet σε όλο τον κόσμο, και γενικότερα σε κάθε πτυχή της σύγχρονης τεχνολογίας.

Η επιτυχία αυτή, οφείλεται κατά κύριο λόγο στο βασικό τμήμα ενός οποιουδήποτε συστήματος ασύρματων επικοινωνιών (επίγειου ή μη), το οποίο είναι η κεραία ή η διάταξη των κεραιών που χρησιμοποιούνται σε πομπό και δέκτη. Εύκολα καταλαβαίνει κανείς πως η αποστολή και η λήψη των σημάτων αποτελεί τη βασική διαδικασία σε ένα σύστημα επικοινωνιών. Χωρίς αυτό, οποιοδήποτε άλλο στοιχείο κυκλώματος υπεύθυνο για την επεξεργασία σήματος, παραμένει άνευ αξίας.

1.2 Κίνητρα

Με βάση τα παραπάνω, σημαντικό ρόλο στη συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, επιτέλεσε το ενδιαφέρον για τις σπουδαίες εφαρμογές των μικροταινιακών κεραιών, τον τρόπο λειτουργίας τους, αλλά και για τη διαδικασία σχεδιάσής τους. Ακόμη δε περισσότερο, ιδιαίτερη σημασία επέδειξε η ανάγκη χρήσης των κεραιών αυτών σε εφαρμογές δορυφορικών τηλεπικοινωνιών, γεγονός που επηρεάζει άρρηκτα τις διαστάσεις και το βάρος της εκάστοτε κεραίας, τη συχνότητα και την ισχύ λειτουργίας της, αλλά και την ανοχή της σε εξαιρετικά δύσκολες συνθήκες. Βασικό δε κίνητρο, ήταν η ανάγκη αντικατάστασης των παραβολικών ανακλαστήρων που χρησιμοποιούνται έως και σήμερα στο επίγειο τμήμα ενός δορυφορικού συστήματος. Το ιδιαίτερα μεγάλο τους βάρος και μέγεθος, η δυσκολία που παρουσιάζουν στην κατασκευή, και η αρκετά περιορισμένη δυνατότητα μηχανικής σάρωσης που προσφέρουν, αποτέλεσαν εφιαλτήριο για την εύρεση αποδοτικότερης λύσης. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε η δημιουργία μιας μικροταινιακής κεραίας κυκλικής πόλωσης, η οποία όπως θα αναλυθεί και σε επόμενο κεφάλαιο, ικανοποιεί στον μέγιστο βαθμό όλες τις παραπάνω απαιτήσεις.

1.3 Στόχοι

Κύριος στόχος της εργασίας είναι η θεωρητική ανάλυση και σχεδίαση μιας μικροταινιακής κεραίας κυκλικής πόλωσης, η οποία θα λειτουργεί στη συχνότητα των 3 GHz, μία εκ των βασικότερων συχνοτήτων λειτουργίας ενός δορυφορικού συστήματος LEO. Μάλιστα, θα χαρακτηρίζεται από το μικρό της μέγεθος (χαμηλό προφίλ), την καθαρότητα της κυκλικής πόλωσης, το επαρκές κέρδος αλλά και εύρος ζώνης, όπως και από τη δυνατότητα χρήσης της σε μορφή συστοιχίας κεραιών. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτρομαγνητικός προσομοιωτής CSTTM, ένα αρκετά εξειδικευμένο πρόγραμμα, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας μιας ηλεκτρικής διάταξης σε τρεις διαστάσεις, προσφέροντας αποτελέσματα ανάλυσης βασισμένα σε πραγματικές συνθήκες.

1.4 Δομή της εργασίας

Με βασικό γνώμονα την πλήρη κατανόηση από μεριάς του αναγνώστη όλης εκείνης της θεωρίας που εξηγεί τη λειτουργία μιας μικροταινιακής κεραίας, μέχρι την τελική της θεώρηση αλλά και προσομοίωση, αποφασίστηκε η χρήση συγκεκριμένης δομής των επόμενων κεφαλαίων, ούτως ώστε να καλυφθεί κάθε σημείο και λεπτομέρεια μέχρι την τελική σχεδίαση.

Για τον λόγο αυτό, στο πρώτο κεφάλαιο της θεωρητικής εξήγησης, στο κεφάλαιο 2, περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας που διέπουν ένα τυπωμένο κύκλωμα, όπως αυτό των τυπωμένων γραμμών (Microstrip Lines).

Στη συνέχεια, το κεφάλαιο 3 αποτελεί το βασικό θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας, καθώς περιγράφονται αναλυτικά οι μικροταινιακές κεραίες. Εκεί αναφέρονται πλήρως τα βασικά τους χαρακτηριστικά, ο τρόπος κατασκευής τους, τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, οι κυριότερες εφαρμογές τους, και τέλος ο τρόπος λειτουργίας και ακτινοβολίας τους.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται η βασική μελέτη των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας, μία εκ των βασικών εφαρμογών που βρίσκουν οι μικροταινιακές κεραίες, η οποία και απασχολεί το θέμα της παρούσας εργασίας. Η μελέτη περιλαμβάνει την ανάλυση των δορυφορικών τροχιών, την αρχιτεκτονική δομή των δορυφορικών συστημάτων, και εστιάζει κυρίως στα δορυφορικά συστήματα LEO, για το επίγειο τμήμα των οποίων προορίζεται η προς κατασκευή κεραία. Ακόμη, σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται ο τύπος κεραίων που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον έως τώρα στους επίγειους δορυφορικούς σταθμούς και τα βασικότερα μειονεκτήματά του. Επίσης, εξηγείται η ανάγκη αντικατάστασής του με συστήματα μικροταινιακών στοιχειοκεραίων.

Το κεφάλαιο 5 αποτελεί το σημαντικότερο εκ των υπολοίπων κεφαλαίων, καθώς σε αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η κατασκευή της ζητούμενης κεραίας. Το επιθυμητό βέλτιστο αποτέλεσμα, προέκυψε με τη σταδιακή κατασκευή της κεραίας, ξεκινώντας από ένα σχετικά απλουστευμένο μοντέλο, και καταλήγοντας στο αρκετά πιο περίπλοκο αλλά και ταυτόχρονα πιο αποδοτικό.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 περιγράφονται τα τελικά συμπεράσματα της έρευνας και κυρίως της προσομοίωσης της κεραίας, συνοδευόμενα από κάποιες προτεινόμενες μελλοντικές βελτιώσεις – τροποποιήσεις που θα μπορούσαν να γίνουν, ούτως ώστε να υπάρχει συνέχεια στην ερευνητική μελέτη ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Γραμμές μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς (transmission lines) αποτελούν το αναγκαίο βήμα για τη μελέτη και κατασκευή των μικροταινιακών κυκλωμάτων και κεραιών, κάτι που καθιστά απαραίτητη την αναφορά σε αυτές, αναλύοντας όλες τις λεπτομέρειες που διέπουν τη λειτουργία τους. Όπως είναι ευρέως γνωστό, ο πιο διαδεδομένος τρόπος μεταφοράς ενέργειας, είναι αυτός της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο. Σε αυτή την περίπτωση, το κύμα ρέει προς όλες τις κατευθύνσεις μεταφέροντας την απαιτούμενη ενέργεια. Μία τυπική εφαρμογή αυτού του τρόπου μετάδοσης κυμάτων είναι οι ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές αναμεταδόσεις, καθώς τα κύματα που φέρουν την απαραίτητη πληροφορία, πρέπει να διαδοθούν προς κάθε δυνατή κατεύθυνση (broadcasting). Ωστόσο, όπως θα αναλυθεί εκτενώς και παρακάτω, υπάρχουν αναρίθμητες περιπτώσεις όπου απαιτείται η καθοδηγούμενη μετάδοση ενέργειας από τον αποστολέα στο δέκτη, και αντίστροφα. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους μετάδοσης, αποτελούν οι γραμμές μεταφοράς. Ως ένα είδος κυματοδηγών, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την μικροκυματική ζεύξη δύο σημείων με σκοπό την μεταφορά ισχύος μεταξύ αυτών. Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται οι γραμμές μεταφοράς είναι οι εξής:

1. Γραμμές μεταφοράς αποτελούμενες από δύο ή περισσότερους αγωγούς.
2. Γραμμές μεταφοράς αποτελούμενες από κενούς αγωγίμους σωλήνες (κυματοδηγούς).
3. Γραμμές μεταφοράς αποτελούμενες από διηλεκτρικό (διηλεκτρικοί κυματοδηγοί).

Η μεταφορά ισχύος για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις, γίνεται ως εξής: Στην πρώτη περίπτωση, η μεταφορά της ισχύος πραγματοποιείται χάρις στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται μεταξύ των δύο αγωγών. Στους κυματοδηγούς, η μεταφορά ισχύος βασίζεται στις αλληπάλληλες ανακλάσεις που εμφανίζονται στα αγωγή τοιχώματα τους, χωρίς την απαραίτητη παρουσία δεύτερου αγωγού. Τέλος, στους διηλεκτρικούς κυματοδηγούς, λόγω του διαφορετικού δείκτη διάθλασης μεταξύ του κυματοδηγού και του περιβάλλοντος υλικού, παρατηρούνται ολικές ανακλάσεις στις οποίες και στηρίζεται η μεταφορά της απαιτούμενης ισχύος.

Οι συνηθέστεροι τύποι γραμμών μεταφοράς παρατίθενται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστικοί τύποι γραμμών μεταφοράς

2.1.1 Παράμετροι γραμμών μεταφοράς

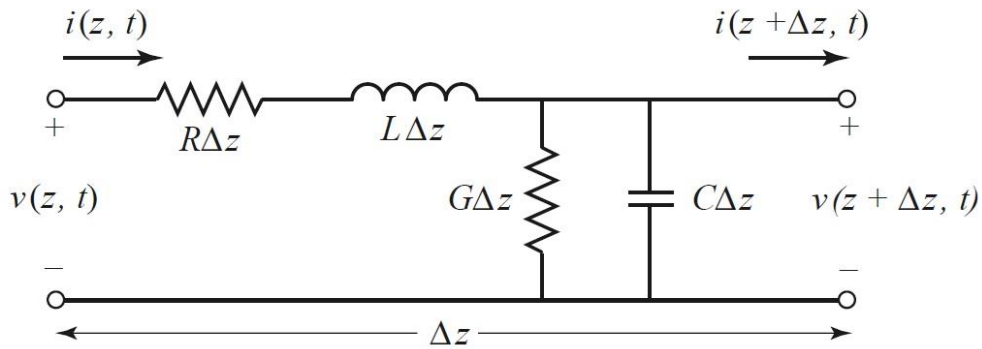
Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των γραμμών μεταφοράς είναι οι εξής:

R = σειριακή αντίσταση ανά μονάδα μήκους, και για τους δύο αγωγούς, σε Ω/m (Ohm/meter).

L = σειριακή επαγωγή ανά μονάδα μήκους, και για τους δύο αγωγούς, σε H/m (Henry/meter).

G = παράλληλη αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους, σε S/m (Siemens/meter), εξαιτίας των διηλεκτρικών απωλειών του υλικού μεταξύ των δύο αγωγών.

C = παράλληλη χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους, σε F/m (Farad/meter).

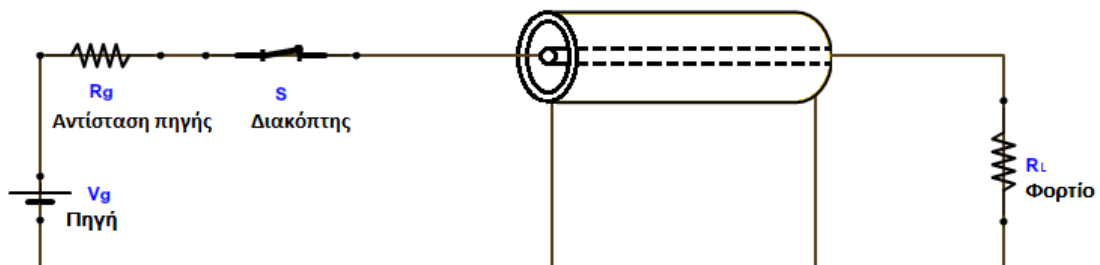


Σχήμα 2.2 Οπτική αναπαράσταση των R, L, G και C παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς

Η σειριακή επαγωγή L αντιπροσωπεύει τη συνολική αυτεπαγωγή των δύο αγωγών και η παράλληλη χωρητικότητα C οφείλεται στην εγγύτητα των δύο αγωγών. Η σειριακή αντίσταση R αντιπροσωπεύει την αντίσταση που οφείλεται στην πεπερασμένη αγωγιμότητα των μεμονωμένων αγωγών και η παράλληλη αγωγιμότητα G οφείλεται σε διηλεκτρική απώλεια του υλικού μεταξύ των αγωγών [1].

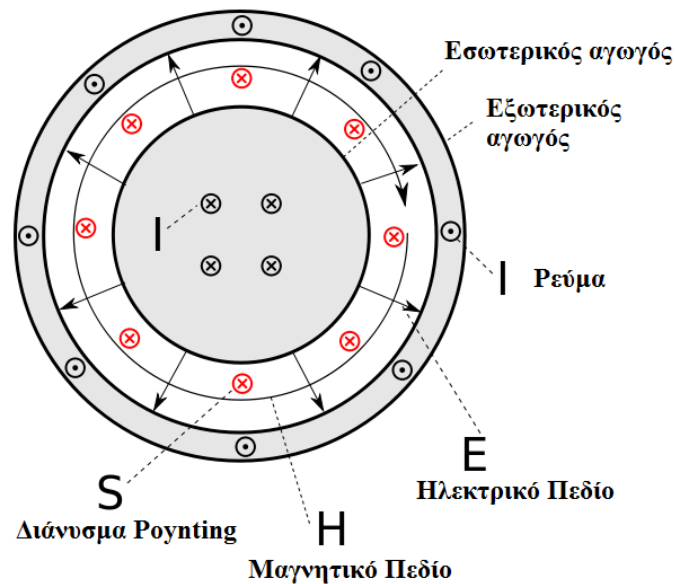
2.1.2 Διάδοση Η/Μ κύματος σε γραμμή μεταφοράς

Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται και διαδίδεται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μέσα από μία γραμμή μεταφοράς, μπορεί να αναλυθεί με βάση το ακόλουθο παράδειγμα, κατά το οποίο χρησιμοποιείται μία ομοαξονική γραμμή ως στοιχείο ενός κυκλώματος, και η οποία ενώνει την πηγή με το φορτίο (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Κύκλωμα με ομοαξονική γραμμή

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το κύκλωμα συνδέεται και με τον εσωτερικό αλλά και με το εξωτερικό αγωγό, ούτως ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η μεταφορά της ισχύος, χάρις στη διαφορά τάσης μεταξύ των δύο αγωγών. Έτσι, κλείνοντας τον διακόπτη S, δημιουργείται ένα εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο και οδεύει ως προς την κατεύθυνση της γραμμής. Ως αποτέλεσμα αυτού, είναι η μετάδοση της απαιτούμενης ενέργειας διαμέσου της γραμμής, μέσω της κίνησης του κύματος. Οι διευθύνσεις του ρεύματος I , του ηλεκτρικού E και μαγνητικού H πεδίου, αλλά και του διανύσματος Poynting (Poynting vector) (Παράρτημα) απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα [1].



Σχήμα 2.4 Εγκάρσια όψη της ομοαξονικής γραμμής με τις κατευθύνσεις των πεδίων

2.2 Μικροταινιακή τεχνολογία

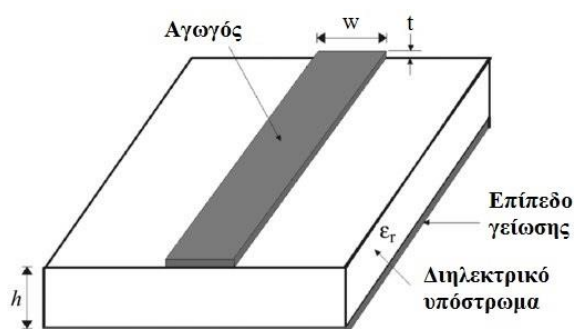
Όπως έχει ήδη ειπωθεί, και θα αναλυθεί παρακάτω, η παρούσα εργασία εξετάζει την συμπεριφορά των μικροταινιακών κεραιών. Αυτές, ως τυπωμένες κεραιές, αποτελούν τους κυριότερους και συνηθέστερους εκπροσώπους της μικροταινιακής τεχνολογίας. Η τεχνολογία αυτή, επιτρέπει την εκτύπωση κυκλωμάτων στην πλευρά ενός διηλεκτρικού υποστρώματος, τα οποία αναφέρονται συνήθως ως τυπωμένα κυκλώματα ή κυκλώματα μικροταινιας.

Η εκτύπωση επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο μέσω φωτοχημικής διεργασίας ή και απευθείας χάραξης, και σε συνδυασμό με τον αμελητέο όγκο αλλά και βάρος που προκύπτει, καθιστά πολύ εύκολη την ενσωμάτωσή τους σε οποιοδήποτε κύκλωμα διακριτών (lumped circuit) και ενεργών (active devices) στοιχείων, οδηγώντας έτσι στη συνεχή ανάπτυξη νέων κυκλωμάτων και κεραιών με ευρεία χρήση.

2.3 Μικροταινιακές γραμμές (Microstrip Lines)

Οι μικροταινιακές γραμμές αποτελούν αναμφισβήτητα τον πιο χαρακτηριστικό και διαδεδομένο τύπο γραμμών μεταφοράς για την κατασκευή μικροκυματικών κυκλωμάτων. Η ευρεία αυτή χρήση οφείλεται στο γεγονός της επίπεδης φύσης της μικροταινιακής γραμμής, σε συνδυασμό με την ευκολία στην κατασκευή, καθώς τα κυκλώματα που παράγονται είναι αρκετά μικρά σε όγκο και βάρος. Όπως είναι φυσικό, αυτό οδηγεί σε μείωση του κόστους κατασκευής, λόγω και του χαμηλού κόστους υλικών που χρησιμοποιούνται (όπως θα αναλυθεί και παρακάτω), και κυρίως υπάρχει η δυνατότητα της εύκολης ενσωμάτωσής τους, σε οποιαδήποτε συσκευή και οποιοδήποτε επιθυμητό μέσο.

Με απλά λόγια, μια μικροταινιακή γραμμή, μπορεί να παρομοιαστεί ως η τυπωμένη μορφή ενός κοινού καλωδίου που μεταφέρει ρεύμα, πάνω σε ένα επίπεδο γείωσης. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η μορφή και η γεωμετρία μιας τυπικής μικροταινιακής γραμμής, η οποία αποτελείται από το επίπεδο γείωσης (ground plane), ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα (substrate), και τη γραμμή (αγωγό) που βρίσκεται πάνω στο υπόστρωμα.



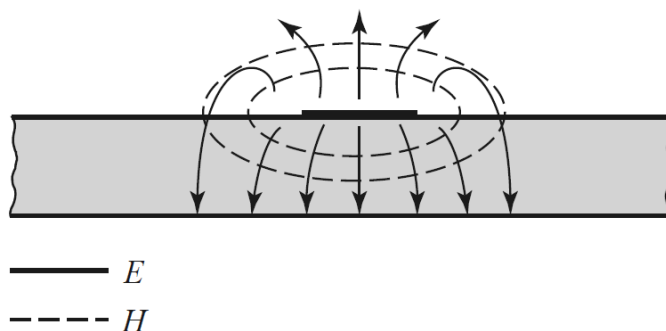
Σχήμα 2.5 Γεωμετρία μιας τυπικής μικροταινιακής γραμμής

2.3.1 Χαρακτηριστικά μικροταινιακών γραμμών

Όπως προαναφέρθηκε, και απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα, μια τυπική μικροταινιακή γραμμή, αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: την γραμμή (αγωγός), το διηλεκτρικό υπόστρωμα, και το επίπεδο γείωσης. Τα τρία αυτά στοιχεία, χαρακτηρίζονται από κάποια μεγέθη, τα οποία προσδιορίζουν και τη γενικότερη συμπεριφορά τους τη στιγμή που ακτινοβολεί η μικροταινιακή γραμμή. Αρχικά, το επίπεδο γείωσης που βρίσκεται στο κάτω μέρος της γραμμής, χαρακτηρίζεται από ένα αρκετά μικρό πάχος t , και ο τύπος μετάλλου που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τη δημιουργία του, είναι ο χαλκός. Το διηλεκτρικό υπόστρωμα, και οι ηλεκτρομαγνητικές του ιδιότητες, είναι τα στοιχεία που επηρεάζουν περισσότερο το πώς συμπεριφέρεται η γραμμή, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.

Οι δύο βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το υπόστρωμα, είναι η σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα (σχετική διηλεκτρική σταθερά) ϵ_r , και η εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$. Επίσης, ένα πολύ βασικό χαρακτηριστικό του υποστρώματος, που συντελεί σημαντικά στην ακτινοβολία της μικροταινιακής γραμμής, είναι το πάχος (ύψος) του h . Τέλος, σε ό,τι αφορά την μεταλλική λωρίδα στο επάνω μέρος, αυτή αποτελείται από το ίδιο υλικό (μέταλλο) με το επίπεδο γείωσης έχοντας το ίδιο πάχος t με αυτό, και η τιμή της χαρακτηριστικής της εμπέδησης Z_0 είναι συνήθως 50Ω [2].

Το σημαντικότερο όμως χαρακτηριστικό της, που και αυτό με τη σειρά του επηρεάζει σημαντικά τον τρόπο λειτουργίας της γραμμής, είναι το πλάτος της w . Ο μηχανισμός ακτινοβολίας της μικροταινιακής γραμμής, και το πώς αυτός εξαρτάται από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των στοιχείων που την αποτελούν, παρουσιάζεται παρακάτω.



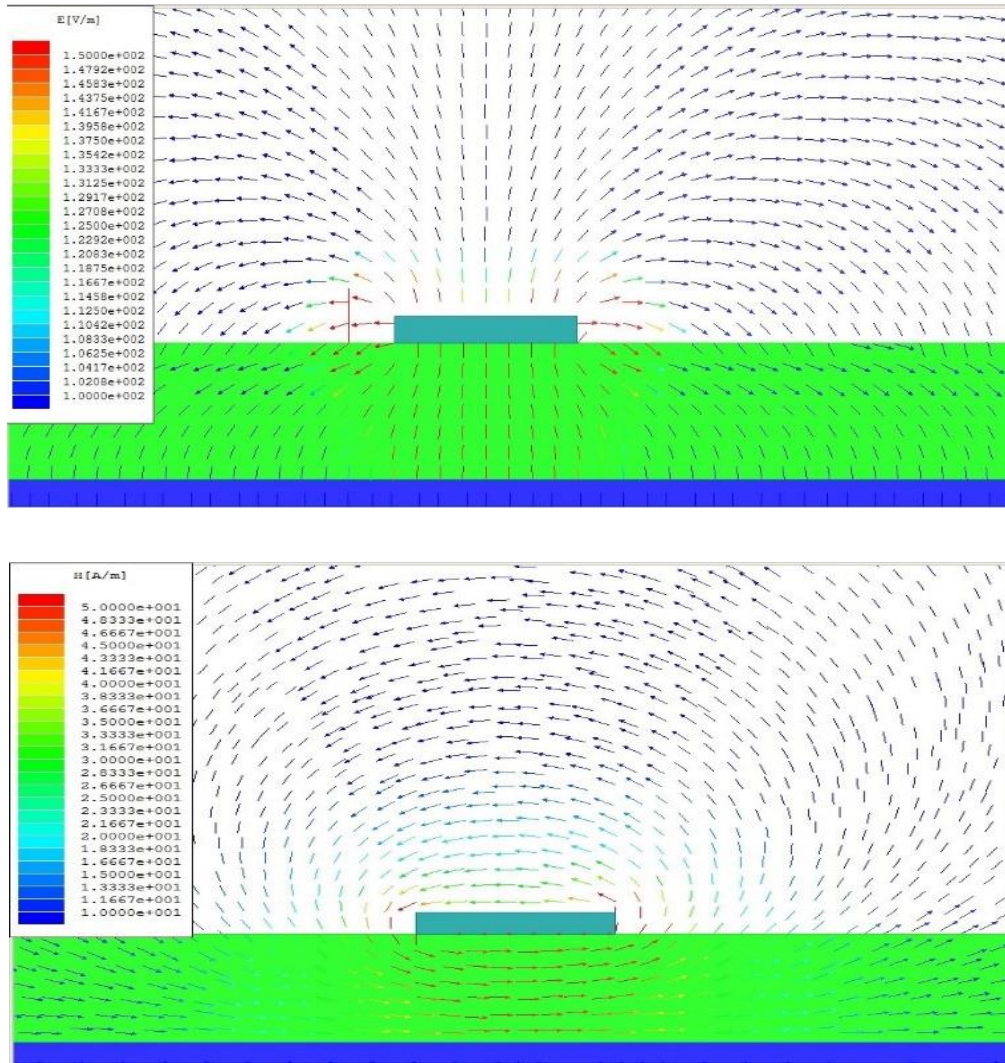
Σχήμα 2.6 Ακτινοβολία μικροταινιακής γραμμής

2.3.2 Ακτινοβολία μικροταινιακής γραμμής

Ο τρόπος συμπεριφοράς μιας μικροταινιακής γραμμής απεικονίζεται στο σχήμα 2.6. Τροφοδοτώντας τον αγωγό με την κατάλληλη ενέργεια, και λόγω της διαφοράς τάσης που δημιουργείται, προκαλείται ο σχηματισμός των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών μεταξύ του αγωγού και του επιπέδου γείωσης. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο κατανέμεται κάπως ασύμμετρα σε όλη την επιφάνεια της γραμμής, εμφανίζοντας κροσσούς (fringing fields) στα όρια του αγωγού, εκτείνοντας έτσι τις δυναμικές γραμμές και στον ελεύθερο χώρο (free space), παρότι κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους, βρίσκονται εντός των ορίων του υποστρώματος [2].

Κατά όμοιο τρόπο, το ίδιο συμβαίνει και με τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες επίσης εκτείνονται πάνω από το υπόστρωμα. Η συμπεριφορά αυτή των ηλεκτρομαγνητικών γραμμών, οφείλεται στις πεπερασμένες διαστάσεις (μήκος και πλάτος) της λωρίδας, και στα φορτία που βρίσκονται στα άκρα αυτής, και έχει ως άμεση συνέπεια την ταυτόχρονη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεταξύ δύο διαφορετικών μέσων, με δύο δηλαδή διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές.

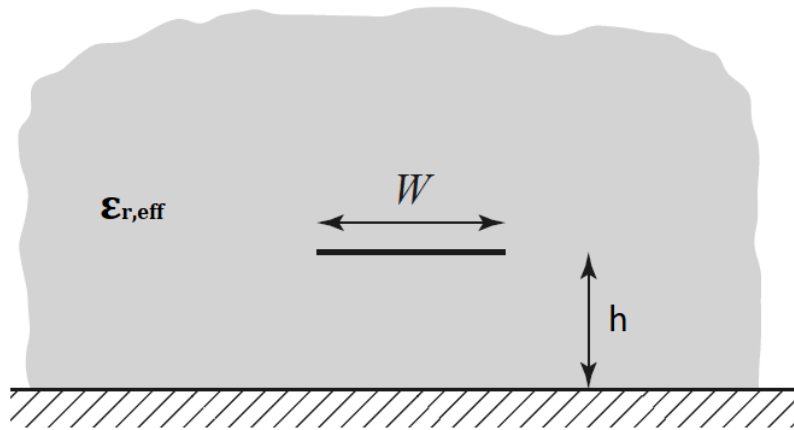
Αποτέλεσμα αυτού είναι η μικροταινιακή γραμμή να ακτινοβολεί στο λεγόμενο Υβριδικό (hybrid ή Quasi-TEM mode ή higher order mode) ρυθμό κυματοδήγησης, κατά τον οποίο η ηλεκτρική και η μαγνητική συνιστώσα του κύματος δεν είναι κάθετες (έχουν δηλαδή μη μηδενικές συνιστώσες) στην κατεύθυνση διάδοσης (σχήμα 2.7). Το φαινόμενο αυτό, σε συνδυασμό με τη φυσική ασυνέχεια της μικροταινιακής γραμμής εξαιτίας των δύο διηλεκτρικών σταθερών που σχετίζονται με αυτή (του αέρα ϵ_0 και του υποστρώματος ϵ_r), καθιστά την ανάλυση της γραμμής αρκετά δύσκολη, κυρίως από μαθηματική σκοπιά. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, πως για το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, το φαινόμενο αυτό επιτελεί σπουδαίο ρόλο, καθώς χαρακτηρίζει την ακτινοβολία των μικροταινιακών κεραιών, παρότι για τις μικροταινιακές γραμμές αποτελεί μειονέκτημα [2].



Σχήμα 2.7 Hybrid mode – Μη μηδενικές συνιστώσες δυναμικών γραμμών Ηλεκτρικού (πάνω) και Μαγνητικού (κάτω) πεδίου

Πηγή: Transmission Lines – Part I: TEM and Quasi-TEM TLs and PUL Parameters – McMaster University

Για την ερμηνεία του φαινομένου της ασυνέχειας, εισήχθη ένα νέο χαρακτηριστικό της μικροταινιακής γραμμής, αυτό της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς (Effective relative permittivity) $\epsilon_{r,eff}$. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, η σχετική διηλεκτρική σταθερά αποκτά φυσική έννοια θεωρώντας την ισοδύναμη διάταξη μικροταινιακής γραμμής, κατά την οποία ο αγωγός στο πάνω μέρος του υποστρώματος, δεν βρίσκεται πλέον εκτεθειμένος στον ελεύθερο χώρο, αλλά είναι «βυθισμένος» σε ένα νέο ομοιόμορφο διηλεκτρικό υπόστρωμα σταθεράς $\epsilon_{r,eff}$, διατηρώντας όμως το ίδιο ύψος h από το επίπεδο γείωσης [1].



Σχήμα 2.8 Φυσική αναπαράσταση σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_{r,eff}$ υπολογίζεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη σχέση:

$$\epsilon_{r,eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (2.1)$$

όπου h το ύψος του υποστρώματος με σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r , και w το πλάτος της μικροταινιακής γραμμής, χαρακτηριστικής εμπέδησης 50Ω [3]. Αντίστοιχα, το πλάτος w της γραμμής μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\frac{w}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & \frac{w}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right], & \frac{w}{h} > 2 \end{cases} \quad (2.2)$$

όπου

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.3)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

με Z_0 τη δεδομένη χαρακτηριστική εμπέδηση των 50Ω [1].

2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία

Το πιο σημαντικό στάδιο κατά την μελέτη – κατασκευή οποιωνδήποτε κυκλωμάτων, και ειδικά κατασκευών οι οποίες έχουν ως χαρακτηριστικό γνώρισμα την ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως οι μικροταινιακές γραμμές, είναι η εκτενής εξέταση όλων εκείνων των παραμέτρων - χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τον τρόπο, και κυρίως την ποσότητα της σωστά ακτινοβολούμενης και καθοδηγούμενης ενέργειας. Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται τα χαρακτηριστικά μιας μικροταινιακής γραμμής, είναι αυτή των φυσικών διαστάσεων, όπου ανήκουν το πλάτος w της γραμμής και το πάχος h του υποστρώματος, και εκείνη των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την ηλεκτρική συμπεριφορά της γραμμής, όπως είναι η διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και η εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$.

2.3.4 Φυσικές διαστάσεις

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους και τις ιδιότητές τους, γίνεται αρχικά φανερό πως για γραμμές με αρκετά μεγάλο πλάτος w , οι δυναμικές γραμμές τείνουν να «παγιδεύονται» ολοκληρωτικά εντός των ορίων του υποστρώματος, δημιουργώντας έτσι έναν ιδανικό πυκνωτή. Μάλιστα, όπως είναι φυσικό, προκύπτει ότι $\epsilon_r \approx \epsilon_{r,eff}$. Αντίθετα, στην περίπτωση των αρκετά στενών γραμμών, θα υπάρξει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που χάνεται στον ελεύθερο χώρο, γεγονός καθόλου αποδεκτό.

Σε ό,τι αφορά την άλλη φυσική διάσταση, το πάχος h του υποστρώματος, είναι πολλές φορές επιθυμητή η μείωσή του, έχοντας στόχο την ελαχιστοποίηση των υβριδικών ρυθμών καθοδήγησης. Η μείωση όμως του πάχους, σε συνδυασμό με την ανάγκη να διατηρηθεί σταθερή η χαρακτηριστική εμπέδηση Z_0 , οδηγεί στην αναγκαστική ελάττωση και του πλάτους w της γραμμής (σχέσεις 2.2 και 2.3). Αυτό, με βάση τα παραπάνω, οδηγεί σε ανεπιθύμητες απώλειες ισχύος.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως στην ενδεχόμενη χρήση μικρών τιμών πάχους του υποστρώματος και πλάτους της λωρίδας, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν η δυσκολία στην κατασκευή λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων, που μπορεί να οδηγήσουν σε μία όχι και τόσο καλή προσαρμογή των στοιχείων της γραμμής, έχοντας ως αποτέλεσμα την ισχνή ενεργειακή της απόδοση.

2.3.5 Διηλεκτρική σταθερά και εφαπτομένη απωλειών

Η διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και η εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$, αποτελούν τα βασικά στοιχεία ενός υποστρώματος, καθώς χαρακτηρίζουν την ηλεκτρική του συμπεριφορά. Όπως είναι φυσικό, η επιλογή του υποστρώματος στην κατασκευή ενός μικροταινιακού κυκλώματος είναι υψίστης σημασίας, διότι πέρα από την μηχανική στήριξη που προσφέρει στη γραμμή που βρίσκεται στο επάνω μέρος του, επιτελεί σπουδαίο ρόλο και στην ηλεκτρική απόδοση ολόκληρης της μικροταινιακής γραμμής. Επομένως, πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψιν τα χαρακτηριστικά αυτά, εφόσον επηρεάζουν την συμπεριφορά του υποστρώματος.

Το μέγεθος του παράγοντα του οποίου οι τιμές επιφέρουν τη μεγαλύτερη επίδραση στον τρόπο ακτινοβολίας της γραμμής, είναι αυτό της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r . Είναι προφανές, πως λόγω της φυσικής της ερμηνείας, η επιλογή αρκετά χαμηλής τιμής, οδηγεί σε χαμηλότερη συγκέντρωση ενέργειας στην περιοχή του υποστρώματος, κάτι που δημιουργεί απώλειες ακτινοβολίας. Αντίθετα, η επιλογή υλικού υψηλού ϵ_r , όχι μόνο ελαττώνει τις απώλειες, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να προσφέρει και μείωση του συνολικού όγκου της διάταξης, κατά $\sqrt{\epsilon_r}$ περίπου. Αυτό, είναι αρκετά χρήσιμο και επιθυμητό σε σχετικά μικρές συχνότητες, όμως μπορεί να επιφέρει προβλήματα σε μεγάλες. Παράλληλα, παρά το πλεονέκτημα που προσφέρει ένα υψηλό ϵ_r , θα πρέπει να επιλεχθεί γνωρίζοντας ότι οδηγεί σε υλικά με ταυτόχρονα υψηλή εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε διηλεκτρικές απώλειες (π.χ. λόγω θερμότητας). [4]

2.3.6 Άλλοι παράγοντες

Ένα άλλο αρκετά σημαντικό στοιχείο που πρέπει να προσεχθεί είναι η ύπαρξη ασυνεχειών στο επίθεμα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η ύπαρξη γωνιών, διασταυρώσεων, και γενικά σημείων στα οποία δεν υπάρχει ομοιόμορφη συνέχεια της μεταλλικής λωρίδας. Επίσης, είναι πιθανό να εμφανιστούν απώλειες στον αγωγό, λόγω αυξημένου μήκους στο στοιχείο τροφοδοσίας. Για τον λόγο αυτό, ενδείκνυται η χρήση πολυεπίπεδου δικτύου τροφοδοσίας, καθώς το συνολικό μήκος σε σχέση με το μήκος κύματος, δύναται να μειωθεί σημαντικά.

Δύο κοινοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί ελάττωση των γενικότερων απωλειών είναι οι εξής: Αρχικά, μεγάλο πλεονέκτημα θα μπορούσε να προσφέρει η χρυσή επίστρωση της γραμμής, διότι λόγω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του χρυσού, θα υπάρχει σημαντική μείωση στις απώλειες του αγωγού. Επίσης, μια τεχνική που χρησιμοποιείται συχνά για την μείωση των απωλειών της γραμμής, είναι η ύψωση του υποστρώματος κατά κάποιο ύψος από το επίπεδο γείωσης, αφήνοντας κενό αέρα στο ενδιάμεσο (σχήμα 2.9). Σε αυτή την περίπτωση, ο αέρας μεταξύ υποστρώματος και επιπέδου γείωσης, περικλείει το μεγαλύτερο ποσοστό του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται. Όπως όμως είναι γνωστό, ο αέρας έχει μηδενική εφαπτομένη απωλειών. Επίσης, λόγω της πάρα πολύ μικρής διηλεκτρικής του σταθεράς, $\epsilon_r \approx 1$, προκύπτει και η ταυτόχρονη αύξηση του πάχους της μεταλλικής λωρίδας (σχέσεις 2.2 και 2.3). Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η ταυτόχρονη μείωση των απωλειών εισόδου (insertion loss) και των ωμικών απωλειών (ohmic losses) [2].



Σχήμα 2.9 Μικροταινιακή γραμμή με κενό αέρα μεταξύ υποστρώματος και επιπέδου γείωσης

Συνοψίζοντας, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία των γραμμών μεταφοράς, και κυρίως των μικροταινιακών γραμμών. Αυτές, αποτελούν τη βάση για την αναλυτική παρουσίαση των μικροταινιακών κεραιών, το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας, ξεκινώντας από το επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ (MICROSTRIP ANTENNAS)

3.1 Εισαγωγή

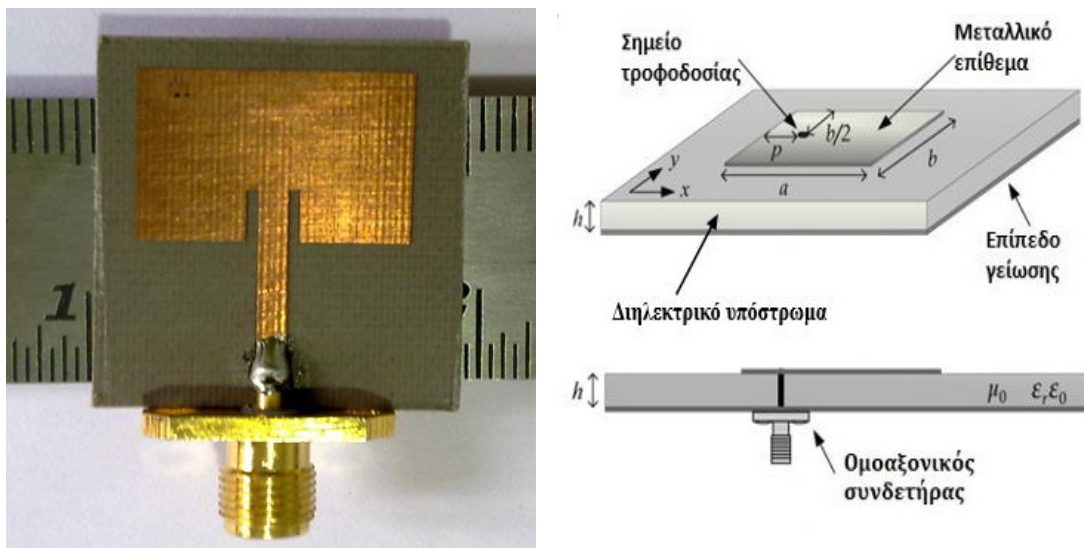
Παρότι η χρήση των μικροταινιακών κεραιών έχει γίνει ευρεία τις τελευταίες τρεις μετέσσερις περίπου δεκαετίες λόγω της μεγάλης τεχνολογικής ανάπτυξης, ξεπερνώντας πολλούς από τους προϋπάρχοντες περιορισμούς, η πρώτη τους εμφάνιση έγινε αρκετά νωρίτερα. Συγκεκριμένα, το 1953 ο G.A. Deschamps παρουσίασε για πρώτη φορά, θεωρητικά, έναν νέο για την εποχή τύπο κεραιών, τις μικροταινιακές. Εν συνεχεία, το 1955 οι H. Gutton και G. Baissinot, έλαβαν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την εργασία τους πάνω στις μικροταινιακές κεραίες. Θα έπρεπε όμως τελικά, να περάσουν περίπου 20 χρόνια, όταν και παρουσιάστηκε η δυνατότητα για την κατασκευή διηλεκτρικών με χαμηλότερη εφασπτομένη απωλειών αλλά και βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες, ώστε να θεμελιωθούν και πρακτικά, και κατά συνέπεια να κατασκευαστούν για πρώτη φορά. Η αρχή, έγινε από τον J.Q. Howell το 1972, και τον R.E. Munson το 1974, οι οποίοι και δημοσίευσαν τις πρώτες επίσημες μελέτες που αφορούσαν τις μικροταινιακές κεραίες [5].

Η ανάγκη για περιορισμό της ανεπιθύμητης ακτινοβολίας που παρουσιαζόταν κατά την λειτουργία των τότε μικρο-κυκλωμάτων, οδήγησε σε αναγκαστική μείωση των διαστάσεων των υποστρωμάτων αλλά και των αγωγίμων ταινιών, οδηγώντας ουσιαστικά στην κατασκευή των πρώτων μικροταινιακών κεραιών. Έκτοτε, έχει καταβληθεί σημαντική προσπάθεια για την περαιτέρω μελέτη και κατασκευή τέτοιων κεραιών, με σκοπό την πλήρη αξιοποίηση των αναρίθμητων θετικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν, όπως για παράδειγμα το αρκετά χαμηλό κόστος σε συνδυασμό με τον πολύ μικρό όγκο, αλλά και η μεγάλη τους συμβατότητα με ήδη υπάρχοντα μικροκυματικά ή τυπωμένα κυκλώματα. Αυτό, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός νέου και ξεχωριστού τομέα στον χώρο των μικροκυματικών κεραιών, αυτού των μικροταινιακών. Η αύξηση του εύρους ζώνης (bandwidth), ο μεγαλύτερος έλεγχος της πόλωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή η προσπάθεια για δημιουργία κεραιών όλο και χαμηλότερου προφίλ, είναι μόνο μερικά από τα πεδία στα οποία έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους οι σημερινοί ερευνητές.

Είναι δε προφανές, πως η επίτευξη των παραπάνω στόχων, προϋποθέτει την πλήρη και τεκμηριωμένη μαθηματική ανάλυση των εκάστοτε θεωρητικών μοντέλων, ούτως ώστε η τελική μοντελοποίηση τους να ανταποκρίνεται στο έπακρον στους αρχικούς θεωρητικούς υπολογισμούς.

3.2 Βασικά χαρακτηριστικά

Χαρακτηριστική για τις αρκετά μικρές της διαστάσεις, το χαμηλό της προφίλ, αλλά και για την απλότητα κατασκευής της, μια απλή μικροταινιακή κεραία (microstrip antenna ή και microstrip patch antenna), αποτελείται από τρία βασικά μέρη. Ένα αρκετά λεπτό μεταλλικό επίπεδο γείωσης (ground plane), συνήθως από χαλκό ή χρυσό, ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα (substrate), και ένα μεταλλικό επίθεμα (patch) πάνω από το υπόστρωμα, το οποίο αποτελεί το κύριο στοιχείο ακτινοβολίας της κεραίας. Σε ό,τι αφορά την παροχή της απαραίτητης RF ισχύος, χρησιμοποιείται συνήθως μια απλή γραμμή τροφοδοσίας στο ίδιο επίπεδο με το επίθεμα, είτε μία ομοαξονική δίοδος η οποία βρίσκεται στο κάτω μέρος της κεραίας. (σχήμα 3.1) [5],[6],[7].



Σχήμα 3.1 Τυπική μικροταινιακή κεραία η οποία τροφοδοτείται μέσω τυπωμένης γραμμής στο ίδιο επίπεδο – απεικονίζονται και οι σχετικές της διαστάσεις με αυτό (αριστερά) Σχηματική αναπαράσταση μικροταινιακής κεραίας που τροφοδοτείται μέσω ομοαξονικού συνδετήρα του οποίου ο εσωτερικός αγωγός εκτείνεται μέχρι το επίθεμα (δεξιά)

Σε ό,τι αφορά το μεταλλικό επίθεμα στο πάνω μέρος της κεραίας, πρέπει να τονιστεί πως κατά κύριο λόγο αποτελείται από το ίδιο υλικό με το επίπεδο γείωσης, και το πάχος του (t) είναι κατά πολύ μικρότερο από την τιμή που έχει το μήκος κύματος ακτινοβολίας (λ_0) στον ελεύθερο χώρο. Οι διαστάσεις του όμως στο επίπεδο, είναι συγκρίσιμες με αυτές του υποστρώματος, καταλαμβάνοντας έτσι ένα σημαντικό μέρος της επιφάνειάς του. Αξιοσημείωτο ρόλο για τον τρόπο ακτινοβολίας της κεραίας επιτελεί το σχήμα του επιθέματος, με πιο χαρακτηριστικό αυτό του ορθογωνίου (τετραγώνου ή παραλληλογράμμου).

Μάλιστα, οι διαστάσεις του ορθογωνίου στο επίπεδο (μήκος και πλάτος), είναι δυνατό να υπολογιστούν με βάση την επιθυμητή συχνότητα συντονισμού, το πάχος και την διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος, ούτως ώστε να προκύψουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα στην ακτινοβολία της κεραίας. Το πλάτος W εξαρτάται από την ταχύτητα του φωτός c , τη συχνότητα συντονισμού f_r και τη διηλεκτρική σταθερά ϵ_r του υποστρώματος. Η σχέση που συνδέει τα μεγέθη αυτά είναι:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

όπου $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ η ταχύτητα του φωτός στο κενό, ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού και μ_0 η μαγνητική σταθερά του κενού.

Αντίστοιχα, το μήκος L του επιθέματος είναι:

$$L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{r,eff}}} - 2\Delta L \quad (3.2)$$

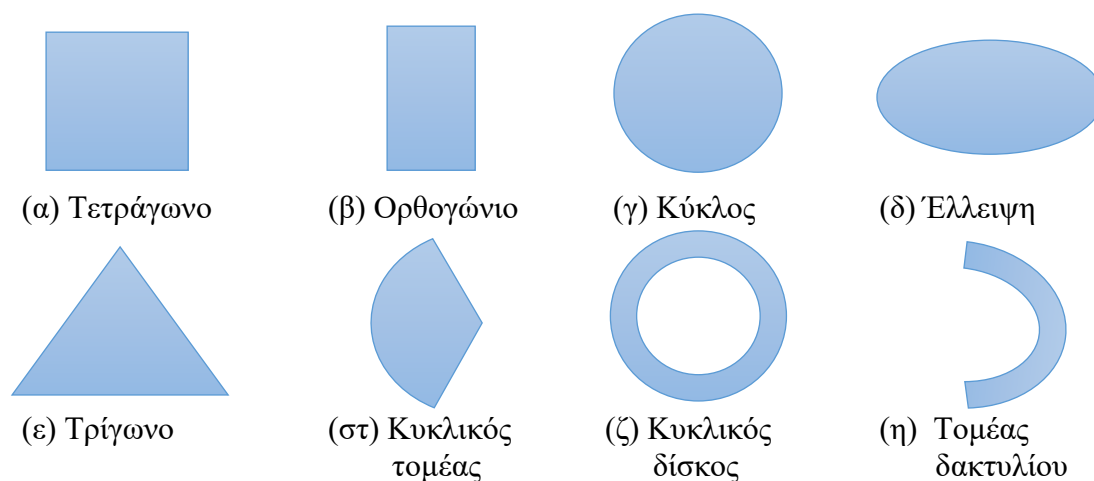
όπου

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{r,eff} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{r,eff} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (3.3)$$

το ενεργό μήκος που «προστίθεται» στα άκρα του επιθέματος λόγω των κροσσών του ηλεκτρικού πεδίου που εμφανίζονται εκεί [3].

Ο υπολογισμός του $\epsilon_{r,eff}$ γίνεται από την εξίσωση (2.1) χρησιμοποιώντας το πλάτος W του επιθέματος.

Δεν είναι απίθανο όμως, να παρατηρηθούν και σχήματα όπως αυτά του κυκλικού δίσκου, του τριγώνου, της έλλειψης, του δακτυλίου, του κυκλικού τομέα αλλά και οποιασδήποτε άλλης γεωμετρίας (σχήμα 3.2). Σε όλες τις περιπτώσεις, η κατασκευή του μεταλλικού επιθέματος γίνεται με γνώμονα την επίτευξη κάθετης ακτινοβολίας ως προς την επιφάνειά του (μετωπική εκπομπή) [5],[6].



Σχήμα 3.2 Προτεινόμενα σχήματα του ακτινοβόλου επιθέματος μιας μικροταινιακής κεραίας

3.3 Επιλογή υποστρώματος

Μία εκ των χρήσεων του υποστρώματος είναι η μηχανική υποστήριξη του επιθέματος. Το υλικό όμως από το οποίο αποτελείται, αλλά και το πάχος αυτού, δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά την ηλεκτρομαγνητική απόδοση της κεραίας. Όπως έχει ήδη ειπωθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πάχος (h , συνήθως $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$), η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r , συνήθως $1 \leq \epsilon_r \leq 10$), και η εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$, είναι τα κύρια χαρακτηριστικά ενός διηλεκτρικού υποστρώματος, η επιλογή των οποίων θα πρέπει να γίνει αρκετά προσεκτικά, με βάση τις εκάστοτε απαιτήσεις. Μάλιστα, η διηλεκτρική σταθερά και η εφαπτομένη απωλειών είναι τα στοιχεία που πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα, καθώς η συμπεριφορά τους εξαρτάται άμεσα από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, τη συχνότητα εκπομπής, την υγρασία του περιβάλλοντος χώρου αλλά και από τη φθορά του χρόνου που ενδέχεται να υποστεί το υπόστρωμα [6],[7].

Το εύρος ζώνης ακτινοβολίας της κεραίας, η θερμική της συμπεριφορά, το είδος των κροσσών του ηλεκτρικού πεδίου που εμφανίζονται, ακόμα και το συνολικό κόστος κατασκευής, επηρεάζονται άμεσα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

Για παράδειγμα, η επιλογή υποστρώματος με αυξημένο πάχος και με μικρή διηλεκτρική σταθερά, προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε ό,τι αφορά το εύρος ζώνης της ακτινοβολίας, την αποδοτικότητα της κεραίας, αλλά και την ακτινοβολία της, καθώς βελτιώνονται οι κροσσοί ακτινοβολίας (fringing fields) στο επάνω μέρος του υποστρώματος. Παράλληλα όμως, η υπέρμετρη αύξηση του πάχους, ενδέχεται να μειώσει τελικά την συνολική απόδοση της κεραίας, καθώς εμφανίζονται κύματα επιφάνειας (surface waves) τα οποία δεσμεύουν μέρος της τροφοδοτούμενης ισχύος, εμποδίζοντας την πλήρη εκπομπή της. Επίσης, όπως είναι φυσικό, αύξηση του πάχους, οδηγεί και σε αύξηση του συνολικού μεγέθους της κεραίας, γεγονός καθόλου επιθυμητό σε περιπτώσεις με πολύ περιορισμένο χώρο για την ενσωμάτωσή της. Αντίθετα, η επιλογή λεπτού υποστρώματος με υψηλή διηλεκτρική σταθερά, ελαχιστοποιεί μεν την ανεπιθύμητη ακτινοβολία, αυξάνει δε τις απώλειες και μειώνει σημαντικά το εύρος ζώνης. Συνεπώς, όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, θα πρέπει να υπάρχει πάντα ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην επιθυμητή απόδοση της κεραίας και στον όγκο κατασκευής της [7],[8].

Η επόμενη σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει το διηλεκτρικό υπόστρωμα, είναι η εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$, η οποία και αφορά τις διηλεκτρικές απώλειες. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζει το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμική μέσα στα όρια του διηλεκτρικού. Πρέπει όμως να τονιστεί, πως αυξανόμενης της συχνότητας, παρατηρείται και παράλληλη αύξηση των διηλεκτρικών απωλειών, άρα και της $\tan\delta$. Επομένως, για καλύτερη αποδοτικότητα της κεραίας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί υλικό χαμηλής εφαπτομένης απωλειών, κάτι που όμως οδηγεί σε αύξηση του κόστους του υποστρώματος.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, γίνεται προφανές πως η τελική επιλογή του διηλεκτρικού υποστρώματος και των χαρακτηριστικών του, για την κατασκευή της επιθυμητής μικροταινιακής κεραίας, μόνο εύκολη δεν είναι, καθώς θα πρέπει να υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ όλων των τιμών ούτως ώστε να παράγεται κάθε φορά το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα, ικανοποιώντας ταυτόχρονα κάθε απαίτηση, όπως αυτή της ακτινοβολούμενης ισχύος, του εύρους ζώνης, και των υπολοίπων σημαντικών παραμέτρων [7],[8].

3.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα

Οι μικροταινιακές κεραίες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τις συμβατικές μικροκυματικές κεραίες. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα εξής [5],[6],[7]:

- Έχουν αρκετά μικρό έως αμελητέο βάρος αλλά και όγκο, και χαρακτηρίζονται ως κεραίες χαμηλού προφίλ (low profile) – επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πάρα πολλούς τύπους ασύρματων επικοινωνιών.
- Είναι εύκολα προσαρμόσιμες πάνω σε οποιαδήποτε επίπεδη ή μη επιφάνεια.
- Σε περίπτωση χρήσης εύκαμπτου υποστρώματος, μια μικροταινιακή κεραία μπορεί να κατασκευαστεί και να χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο σύμμορφων στοιχειοκεραιών (conformal arrays).
- Προσφέρουν ευελιξία σε ό,τι αφορά την επίτευξη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ακτινοβολίας όπως η συχνότητα συντονισμού, η πόλωση (γραμμική, κυκλική ή ελλειπτική), το διάγραμμα ακτινοβολίας, και η σύνθετη αντίσταση εισόδου.
- Είναι εύκολο να ενσωματωθούν σε ήδη έτοιμα μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Microwave Integrated Circuits – MICs) στο ίδιο μάλιστα υπόστρωμα.
- Η χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας των τυπωμένων κυκλωμάτων έχει αρκετά χαμηλό κόστος αλλά και αρκετά απλή διαδικασία ως προς την κατασκευή αυτών, οδηγώντας έτσι στην χωρίς περιορισμούς μαζική παραγωγή τους.
- Επιτρέπουν τη διπλή, την τριπλή, την πολλαπλή (multiband) αλλά και ευρεία (wideband) συχνοτική λειτουργία.
- Είναι εύκολη η δημιουργία συστοιχίας μικροταινιακών κεραιών.

Μειονεκτήματα

Όπως είναι λογικό σε κάθε φυσικό μέσο να υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα, έτσι και στις μικροταινιακές κεραίες υπάρχουν κάποια σημαντικά που πρέπει να αναφερθούν [5],[6],[7].

Αυτά είναι:

- Περιορισμένο εύρος ζώνης (περίπου 1 – 5%).
- Σχετικά χαμηλό κέρδος κεραίας (περίπου 4 – 7 dBi).
- Χαμηλή αποδοτικότητα (efficiency).
- Περίσσεια ακτινοβολίας που προέρχεται από τις τυπωμένες διατάξεις τροφοδοσίας και τα επιφανειακά κύματα.
- Χαμηλή ικανότητα διαχείρισης ισχύος (περίπου 100 W) λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ του επιθέματος και του επιπέδου γείωσης.
- Υψηλής απόδοσης συστοιχία απαιτεί περίπλοκες δομές τροφοδοσίας.
- Αρκετά υψηλά επίπεδα διασταυρούμενης πόλωσης (cross polarization) και αμοιβαίας σύζευξης σε περιβάλλον συστοιχίας σε χρήση υψηλών συχνοτήτων.
- Αρκετές ωμικές απώλειες στο επίπεδο τροφοδοσίας συστοιχίας.

Γίνεται εύκολα κατανοητό, τόσο από τα παραπάνω, όσο και από την ανάλυση των χαρακτηριστικών μιας μικροταινιακής κεραίας, πως το αποτέλεσμα που θα προκύψει κατά την κατασκευή της, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την εκάστοτε εφαρμογή που αυτή θα έχει.

Για παράδειγμα, μια κατασκευή μπορεί να διαθέτει σχετικά αυξημένο πάχος (π.χ. λόγω χρήσης foam-αφρολέξ υποστρώματος) το οποίο ίσως οδηγεί σε ένα όχι και τόσο αποδεκτό συνολικό μέγεθος κεραίας, προσφέροντας όμως ταυτόχρονα βελτιωμένη αποδοτικότητα και ένα πιο αποδεκτό bandwidth. Παράλληλα όμως, το αυξημένο πάχος επιτρέπει τη δημιουργία επιφανειακών κυμάτων, τα οποία και υποβαθμίζουν σημαντικά το διάγραμμα ακτινοβολίας αλλά και την πόλωση.

Ωστόσο, μια ακόμα αξιοσημείωτη τεχνική η οποία μπορεί να προσφέρει αρκετά ικανοποιητικό bandwidth, αποφεύγοντας παράλληλα τη δημιουργία επιφανειακών κυμάτων, είναι η χρήση πολλαπλών λεπτών επιστρώσεων (π.χ. δύο υποστρώματα) και παρασιτικών στοιχείων σε συνδυασμό με ένα σχετικά πιο περίπλοκο σύστημα τροφοδοσίας. Η μέθοδος αυτή, παρότι εμφανίζει δυσκολία στην κατασκευή με παράλληλη αύξηση του συνολικού κόστους, μπορεί να προσφέρει τελικά αρκετά μεγάλο bandwidth, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες λόγω επιφανειακών κυμάτων. Μάλιστα, σε ό,τι αφορά την παρούσα εργασία, η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί το κυρίαρχο στοιχείο στον σχεδιασμό της ζητούμενης κεραίας [7],[8].

Στον πίνακα 3.1 παρατίθενται συνοπτικά οι βασικές παράμετροι μιας κεραίας που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την επιλογή των τιμών τους, ώστε κάθε φορά να οδηγούν σε επιθυμητά αποτελέσματα που αφορούν τη λειτουργία της.

Απαίτηση	Πάχος υποστρώματος	Διηλεκτρική σταθερά υποστρώματος	Πλάτος ακτινοβόλου επιθέματος
Υψηλή αποδοτικότητα ακτινοβολίας	Αυξημένο	Χαμηλή	Ευρύ
Χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες	Μειωμένο	Χαμηλή	
Υψηλό bandwidth	Αυξημένο	Χαμηλή	Ευρύ
Χαμηλή ψευδοακτινοβολία (κύματα επιφάνειας)	Μειωμένο	Χαμηλή	
Χαμηλή σταυρωτή πόλωση		Χαμηλή	

Πίνακας 3.1 Σχετικές τιμές απόδοσης κεραίας με τετραγωνικό επίθεμα

Παράλληλα, τόσο κατά τη θεωρητική όσο και κατά την τεχνική υλοποίηση μιας μικροταινιακής κεραίας, θα πρέπει να εξετασθούν προσεκτικά όλοι εκείνοι οι εξωγενείς παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοσή της κατά την ουσιαστική της χρήση. Επί παραδείγματι, καθώς οι περισσότερες κεραίες προορίζονται για εξωτερική χρήση, η αντοχή σε συνθήκες αέρα, βροχής, χιονιού, ακραίων θερμοκρασιών αλλά και η έκθεση στο ηλιακό φως, είναι παράγοντας υψίστης σημασίας. Ακόμη, η ανθεκτικότητα σε χτυπήματα κεραυνών ή σε ισχυρές δονήσεις, η μηχανική και η ηλεκτρική σταθερότητα των υλικών, η διάβρωση και η οξείδωση που ενδέχεται να υποστούν τα μεταλλικά κυρίως μέρη της κεραίας, αλλά και η συμπεριφορά της σε συνθήκες υψηλού θορύβου, φαινόμενο αρκετά συχνό, είναι μερικοί από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που δεν θα πρέπει να παραληφθούν επ' ουδενί κατά τη διαδικασία σχεδίασης της κεραίας, οδηγώντας τελικά στην απρόσκοπτη λειτουργία της [7].

3.5 Εφαρμογές

Κατά την αρχική τους πρακτική σχεδίαση και πρώτη τους εμφάνιση τη δεκαετία του 1970, οι μικροταινιακές κεραίες χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε πυραυλικά συστήματα, αλλά και συστήματα επικοινωνιών μεταξύ των στρατιωτικών αεροσκαφών. Έκτοτε, λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας κατασκευής, αλλά και λόγω του αρκετά μικρού μεγέθους που τις χαρακτηρίζει, η χρήση αυτών των κεραιών έχει εξαπλωθεί σε πάρα πολλούς τομείς, επηρεάζοντας σημαντικά ακόμα και την απλή καθημερινότητα των ανθρώπων. Επιγραμματικά, οι τομείς στους οποίους χρησιμοποιούνται κατά κόρον οι μικροταινιακές κεραίες είναι οι εξής [5],[7]:

- Κινητές και Δορυφορικές επικοινωνίες
- Συστήματα radar
- Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS)
- Συστήματα τηλεανίχνευσης (RFID)
- Ασύρματα δίκτυα (WLAN)
- Βιοϊατρικά συστήματα ακτινοβολίας

3.5.1 Κινητές και Δορυφορικές επικοινωνίες

Στις μέρες μας, οι κινητές (mobile) επικοινωνίες παρουσιάζουν ραγδαία τεχνολογική πρόοδο, προσφέροντας πλέον ασύγκριτες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων σε σχέση με αυτές του κοντινού παρελθόντος. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, την τελευταία δεκαετία αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται η τεχνική MIMO (Multiple Input – Multiple Output), η οποία αποτελεί μία εκ των σημαντικότερων τεχνολογικών καινοτομιών στα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς, κάνοντας την εμφάνισή της ήδη από την λειτουργία του δικτύου 3G, συνεχίζοντας με την πλήρη ενσωμάτωσή της στο δίκτυο 4G, και όπως είναι φυσικό θα αποτελέσει το κυρίαρχο στοιχείο στο ερχόμενο δίκτυο 5G. Η MIMO τεχνολογία, όπως υποδεικνύει και το όνομά της, αναφέρεται στην χρήση πολλαπλών κεραιών, τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Η επιτυχία της έγκειται στο γεγονός ότι προσφέρει σημαντική αύξηση στην ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων, υψηλότερη φασματική απόδοση (bits/s/Hz) και χαμηλή εξασθένιση, χωρίς ταυτόχρονα να απαιτείται επιπρόσθετο bandwidth ή ισχύς τροφοδοσίας.

Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψιν, πως η επίτευξη των ανωτέρω αξιώσεων προϋποθέτει την τήρηση συγκεκριμένων προδιαγραφών, όπως είναι το μικρό συνολικά μέγεθος και βάρος της MIMO κεραίας, η δυνατότητα να παρέχει ικανή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, η διατήρηση της πόλωσης, η επίτευξη ικανοποιητικού VSWR, αλλά και η όσο είναι δυνατόν μεγαλύτερη αποφυγή των αμοιβαίων ζεύξεων μεταξύ των πολλαπλών στοιχείων της κεραίας, η σημαντικότερη ίσως δυσκολία που παρουσιάσει η κατασκευή MIMO κεραίων. Συνεπώς, η κατασκευή τέτοιου είδους πολλαπλών κεραίων, επιβάλλει πλέον τη χρήση μικροταινιακών κεραίων, καθώς με βάση τα αναρίθμητα πλεονεκτήματά τους όπως αυτά παρουσιάστηκαν προηγουμένως, αποτελούν έναν αρκούντως κατάλληλο υποψήφιο. Μάλιστα, η άμεση εφαρμογή που έχει η MIMO τεχνολογία μικροταινιακών κεραίων σε μια σύγχρονη κινητή συσκευή, απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα [9],[10].



Πηγή: <https://technology.ihs.com/593647/the-rf-front-end-unsung-hero-of-the-premium-smartphone>

Σχήμα 3.3 Εφαρμογή της MIMO τεχνολογίας (MultiUser-MIMO) σε μία σύγχρονη κινητή συσκευή

Αντίστοιχα, οι μικροταινιακές κεραίες παρουσιάζουν σημαντικές εφαρμογές και στις δορυφορικές επικοινωνίες, γεγονός που απασχολεί και το θέμα της παρούσας εργασίας. Όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, στις δορυφορικές επικοινωνίες απαιτείται η χρήση κυκλικής πόλωσης στην ακτινοβολούμενη ισχύ για την απρόσκοπτη επικοινωνία των χαμηλών δορυφόρων με τα επίγεια συστήματα. Αυτό γίνεται εφικτό με την παρουσία τέτοιων κεραιών, καθώς είναι εύκολο να δημιουργηθεί τέτοιο είδος πόλωσης, με τη χρήση διαφορετικών μεταλλικών επιθεμάτων στο πάνω μέρος της κεραίας, προσφέροντας την απαραίτητη ισχύ τροφοδοσίας.

Μία πολύ σπουδαία εφαρμογή των μικροταινιακών κεραιών, που συντελεί στον συνδυασμό των δύο ανωτέρω κατηγοριών, αφορά τη χρήση δορυφορικών συστημάτων στις επίγειες κινητές επικοινωνίες. Τα δίκτυα κυψελωτών συστημάτων χάρις στα οποία πραγματοποιούνται οι κινητές επικοινωνίες, δεν έχουν τη δυνατότητα να παράσχουν πλήρη κάλυψη σε απομακρυσμένες κυρίως γεωγραφικές περιοχές. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικού είδους δορυφορικά συστήματα, τα οποία και χρησιμοποιούνται ευρέως ανά την υφήλιο.

Το πρώτο, αφορά τη χρήση γεωστατικών δορυφόρων, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό του MSAT (Mobile Satellite), το οποίο και σχεδιάστηκε για την παροχή δορυφορικών υπηρεσιών επικοινωνίας τόσο σε θαλάσσιες, όσο και σε χερσαίες περιστάσεις. Το σύστημα αυτό, λειτουργεί στην L-ζώνη (1-2 GHz), και απαιτεί την ύπαρξη συστοιχίας μικροταινιακών κεραιών κυκλικής πόλωσης στο επίγειο τμήμα του, ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί το συνολικό επιθυμητό κέρδος κεραίας, το οποίο θα επιτρέψει την απροβλημάτιστη ζεύξη με έναν δορυφόρο. Επιπλέον, η συστοιχία θα πρέπει να ακτινοβολεί σε κατευθυντική δέσμη έχοντας τη δυνατότητα συνεχούς εντοπισμού και στόχευσης στον δορυφόρο, σε περίπτωση κινητού τερματικού σταθμού [1].

Η δεύτερη κατηγορία, αφορά τη χρήση μεγάλου αριθμού δορυφόρων χαμηλής τροχιάς, όπως είναι το σύστημα Iridium, που αποτελείται από 66 ενεργούς δορυφόρους σε χαμηλή τροχιά, οι οποίοι προσφέρουν παγκόσμια κάλυψη για μεταφορά φωνής και δεδομένων σε συνεχή βάση (σχήμα 3.4). Υλοποιημένο από τη Motorola, το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί στους δορυφόρους του τρία πάνελ αποτελούμενα από συστοιχίες μικροταινιακών κεραιών σε φάση, υψηλού συνολικού κέρδους, οι οποίες ακτινοβολούν στην L-Band (σχήμα 3.5), οδηγώντας έτσι σε αποτελεσματική ζεύξη με τις ομοιοκατευθυντικές (omnidirectional) κεραίες χαμηλού κέρδους που φέρουν οι επίγειοι τερματικοί σταθμοί.

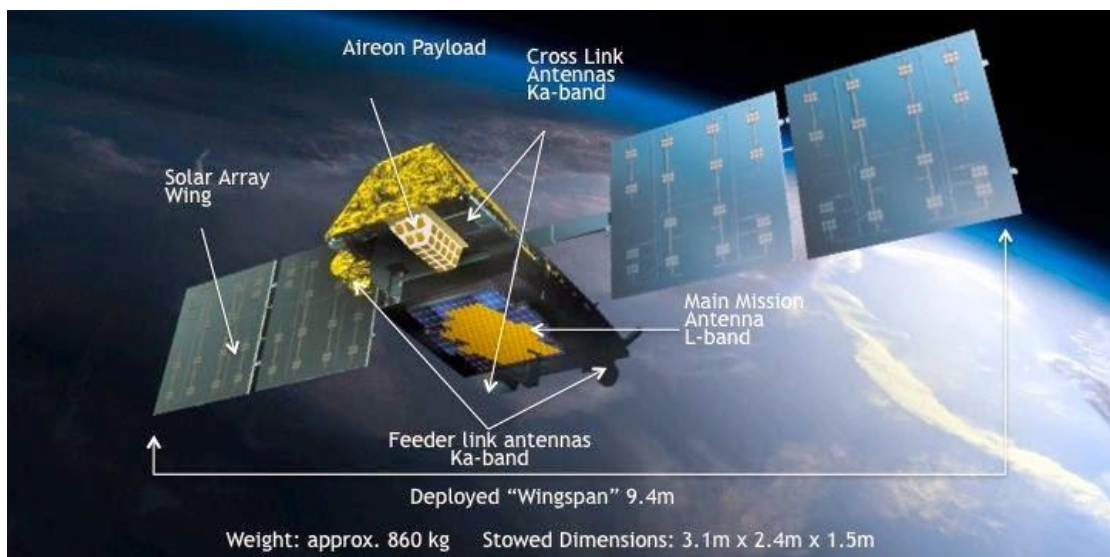
Κάθε συστοιχία, φέρει επιθέματα κυκλικής πόλωσης, καθένα από τα οποία λειτουργεί ως στοιχείο Πομπού/Δέκτη (T/R module) και διεγείρονται ταυτόχρονα από ένα βελτιστοποιημένο δίκτυο beamforming [1],[11].

Όπως είναι φυσικό, λόγω του πολύ μικρού μεγέθους και βάρους, αλλά και του χαμηλού κόστους κατασκευής, η χρήση μικροταινιακών κυκλωμάτων και κεραιών στους δορυφόρους κρίνεται πλέον ως απαραίτητη, καθώς όχι μόνο ελαχιστοποιείται το τελικό κόστος, αλλά δίνεται η ευκαιρία για δημιουργία δορυφόρων όλο και χαμηλότερου βάρους και όγκου, γεγονός υψίστης σημασίας για τον συγκεκριμένο τομέα. Μάλιστα, η κατασκευή τους έχει γίνει με γνώμονα την απρόσκοπτη λειτουργία τους σε συνθήκες ακραίων θερμοκρασιών και ακτινοβολίας όπως συμβαίνει στον διαστημικό χώρο [12],[13].



Iridium Satellite Global Coverage Map

Σχήμα 3.4 Χάρτης παγκόσμιας κάλυψης του συστήματος Iridium



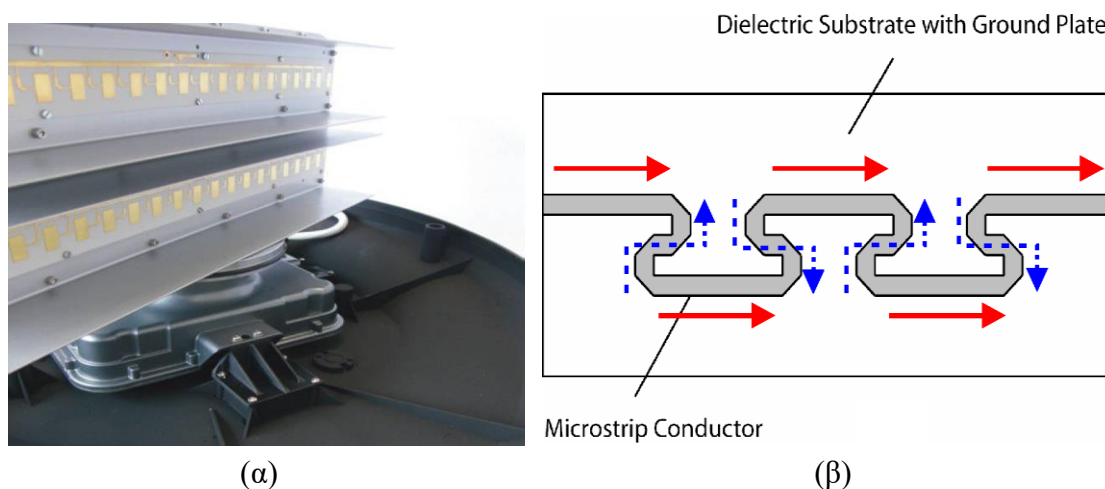
Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση δορυφόρου του συστήματος Iridium

Πηγή: <http://spaceflight101.com/spacecraft/iridium-next>

3.5.2 Συστήματα radar

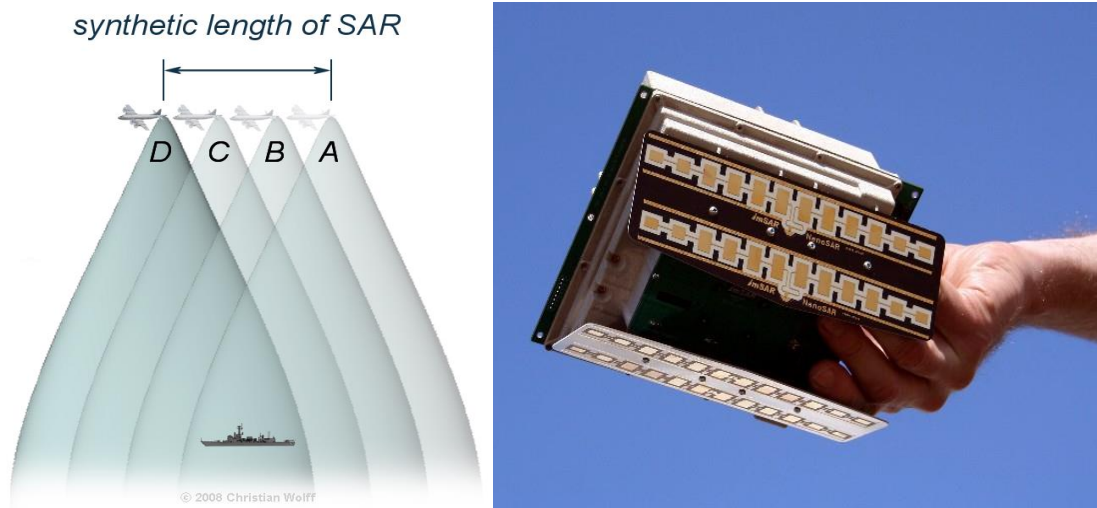
Μια ακόμα σημαντική συνεισφορά των μικροταινιακών κεραιών, είναι η περαιτέρω ανάπτυξη των συστημάτων radar, μειώνοντας σημαντικά το μέγεθός τους, επεκτείνοντας ταυτόχρονα τις λειτουργίες τους. Επί παραδείγματι, σε πολλές υλοποιήσεις radar πλοίων χρησιμοποιούνται συστοιχίες μικροταινιακών κεραιών (σχήμα 3.6α), συνολικού κέρδους άνω των 20 dB. Αξιοσημείωτη είναι και η κατασκευή κινητών συσκευών radar, τα οποία είναι αρκετά εύκολο να μεταφερθούν από ένα άτομο, και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση κινητών στόχων. Με συνολικό κέρδος περίπου τα 30 dB, και βάρος τα 2 kg, ένα τέτοιου είδους radar κατασκευάζεται με την χρήση ενός ειδικού τύπου (Franklin-type) μικροταινιακής κεραίας (σχήμα 3.6β) [14].

Ένα άλλο πολύ σημαντικό είδος radar που έχει αναπτυχθεί με τη χρήση συστοιχίας μικροταινιακών κεραιών, είναι το λεγόμενο Synthetic Aperture Radar (SAR). Το SAR είναι ένας τύπος radar που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία απεικονίσεων δύο (2D) ή τριών (3D) διαστάσεων μακρινών αντικειμένων ή περιοχών, για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η τοπογραφία, η γεωλογία, ακόμα και η ωκεανογραφία, είναι μόνο μερικοί από τους τομείς στους οποίους χρησιμοποιείται κατά κόρον η τεχνολογία SAR. Δύο συστοιχίες μικροταινιακών κεραιών, διεγείρονται και ακτινοβολούν σε ευθεία διεύθυνση και σε αντίθετες φάσεις, στοχεύοντας το επιθυμητό πεδίο ή αντικείμενο, και τα σήματα τα οποία λαμβάνονται ως ανάκλαση των εκπεμπόμενων από κάποια επιφάνεια, επεξεργάζονται κατάλληλα, δίνοντας μια ικανοποιητική απεικόνιση του εξεταζόμενου πεδίου (σχήμα 3.7) [15].



Σχήμα 3.6 (α) Συστοιχία μικροταινιακών κεραιών που χρησιμοποιείται σε εφαρμογή radar πάνω σε πλοίο (β) Τύπος μικροταινιακής κεραίας Franklin

Πηγή (αριστερά): <http://www.radartutorial.eu/06.antennas/Microstrip%20Antenna.en.html>



Σχήμα 3.7 Σχηματική αναπαράσταση λήψεως σημάτων από αεροσκάφος με χρήση τεχνολογίας SAR (αριστερά) Συστοιχία μικροταινιακών κεραιών που χρησιμοποιείται σε εφαρμογή SAR πάνω σε αεροσκάφος (δεξιά)

Πηγή (δεξιά): <http://www.imsar.net/>

3.5.3 Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS)

Αναμφίβολα, η τεχνολογία του GPS αποτελεί μία από τις πιο καινοτόμες εφευρέσεις του 20^{ου} αιώνα, και από τις πιο επιδραστικές του 21^{ου}, οπότε και αυξήθηκε εκθετικά η χρήση της. Σχεδιασμένο αρχικά για στρατιωτική χρήση με σκοπό τον εντοπισμό και την καθοδήγηση πλοίων, αεροσκαφών και πυραύλων, το GPS έφτασε σήμερα να βρίσκεται όχι μόνο σε οποιοδήποτε όχημα ιδιωτικής χρήσης, αλλά και σχεδόν σε όλες τις συσκευές κινητής τηλεφωνίας, ανεξαρτήτως μάλιστα κόστους.

Σε ό,τι αφορά το διαστημικό κομμάτι του GPS, αποτελείται από 31 δορυφόρους αυτή τη στιγμή (ελάχιστος αριθμός οι 24), οι οποίοι βρίσκονται σε μέση τροχιά (MEO), σε ύψος λίγο πάνω από τα 20000 km, και εκτελούν μια πλήρη περιφορά της Γης ανά 12 ώρες. Στο επίγειο κομμάτι του GPS, οι δέκτες χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο πολυκατευθυντικές κεραιές κυκλικής πόλωσης, ευρείας δέσμης και χαμηλού κέρδους [16],[17]. Για τον λόγο αυτό, κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερες μικροταινιακές κεραιές, οι οποίες ικανοποιούν σε μεγάλο βαθμό τις παραπάνω απαιτήσεις, προσφέροντας παράλληλα και τα πλεονεκτήματα του χαμηλού όγκου και βάρους, αλλά και του ιδιαίτερα μικρού κόστους (σχήμα 3.8).



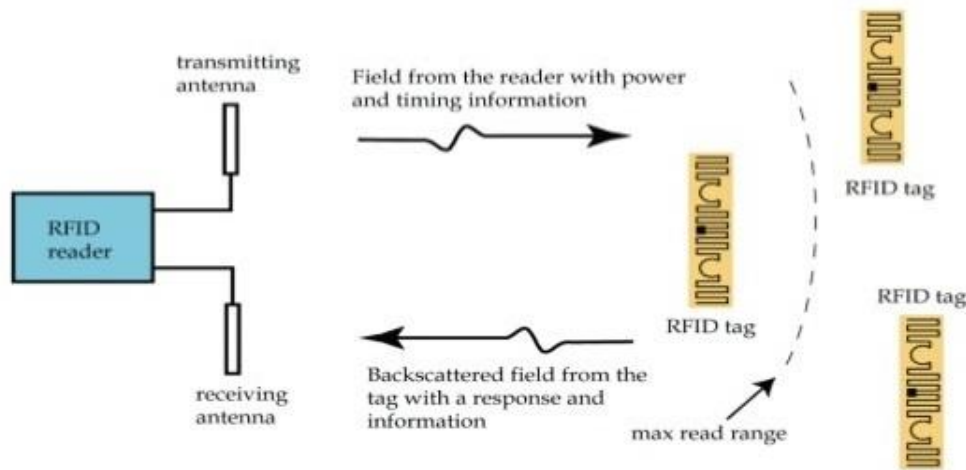
Σχήμα 3.8 Μικροταινιακές κεραίες GPS για διάφορες εφαρμογές πλοήγησης

Πηγή: <http://www.s-fine.com/en/?product2/201401215364.html>

3.5.4 Συστήματα τηλεανίχνευσης (RFID)

Η τεχνολογία RFID (Radio Frequency Identification), αναπτύχθηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου από την Αγγλική πολεμική αεροπορία, για την αναγνώριση και τον διαχωρισμό των εχθρικών αεροσκαφών από τα φιλικά. Έκτοτε, η χρήση των συστημάτων RFID έχει γίνει κατά κύριο λόγο εμπορική, δίνοντας τη δυνατότητα εντοπισμού αντικειμένων αλλά και ανθρώπων, όπως και τη μετάδοση σημαντικών πληροφοριών που χαρακτηρίζουν ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών ή δραστηριοτήτων (ανθρωπίνων και μη), απαιτώντας ταυτόχρονα ελάχιστη ενέργεια για τη λειτουργία τους. Το σημαντικότερο δε, είναι ότι δεν απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση κατά την γενικότερή τους χρήση.

Ένα σύστημα RFID, είναι επί της ουσίας ένας αισθητήρας ο οποίος «αντιλαμβάνεται» το περιβάλλον γύρω του, και στέλνει ασύρματα σε κάποιο δέκτη, τις πληροφορίες που έχει συγκεντρώσει από αυτό. Ως εκ τούτου, αποτελείται από τα εξής δύο μέρη: έναν πομποδέκτη (transponder - συνήθως αναφέρεται ως RFID ετικέτα ή tag), ο οποίος αναλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ του RFID και του χρήστη, και έναν αισθητήρα (reader) ο οποίος και επιτελεί τη βασική λειτουργία του RFID, δηλαδή την ανάγνωση και καταγραφή σημαντικών λεπτομερειών (σχήμα 3.9) [18].



Σχήμα 3.9 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος RFID

Πηγή: Nikita G. Janjal (2015) *Microstrip Antennas for RFID application*, AISSMS College of Engineering, Pune

Μία RFID ετικέτα αποτελείται από δύο μέρη: ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, το οποίο χρησιμεύει στην αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων αλλά και στη συνολική διαχείριση της τροφοδοτούμενης ισχύος, και μία κεραία, η οποία αναλαμβάνει την αποστολή και λήψη του σήματος. Πλέον προτιμάται περισσότερο η χρήση UHF συχνοτήτων (300 MHz – 3 GHz) λόγω των μεγάλων αποστάσεων που μπορούν να καλύψουν, με βασικό τους όμως μειονέκτημα την εύκολη δημιουργία παρεμβολών λόγω του περιβάλλοντος χώρου, ή του υλικού από το οποίο αποτελείται το αντικείμενο πάνω στο οποίο βρίσκεται η RFID ετικέτα (π.χ. χρήση μετάλλου κοντά σε αυτή). Για τον λόγο αυτό, προτιμάται η χρήση μικροταινιακών κεραιών, οι οποίες ικανοποιούν κατά πολύ μεγάλο ποσοστό τις απαιτήσεις που υπάρχουν για την απροβλημάτιστη λειτουργία μιας RFID ετικέτας [18],[19].



Σχήμα 3.10 Εφαρμογή της RFID τεχνολογίας στις σύγχρονες ανάγκες – χρήση παράλληλα με barcode για μεγαλύτερη ασφάλεια

Πηγή: <http://www.universalrfid.com/product/rfid-windshield-tags>

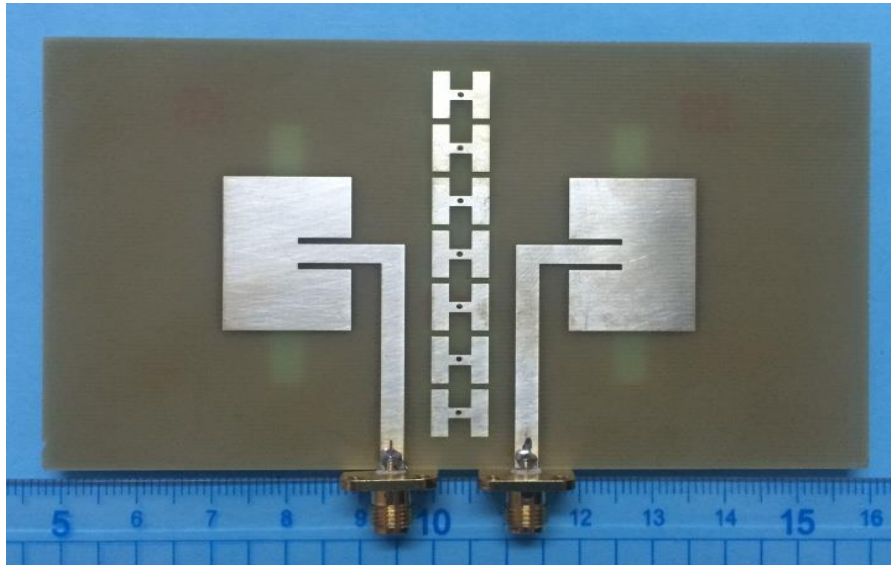
3.5.5 Ασύρματα δίκτυα (WLAN)

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs), τα οποία λειτουργούν με βάση την τεχνολογία Wi-Fi, αποτελούν πλέον την κυρίαρχη μορφή ασύρματης δικτύωσης σε όλο τον κόσμο. Το Wi-Fi χρησιμοποιεί δύο βασικές συχνότητες για την λειτουργία του, αυτές των 2.4 GHz και 5 GHz. Μάλιστα, στην πιο πρόσφατη (και ακόμα υπό μελέτη) έκδοσή του, ονομαζόμενη και ως WiGig (Wireless Gigabit), χρησιμοποιείται η συχνότητα των 60 GHz για την αποστολή και τη λήψη δεδομένων, προσφέροντας όπως είναι φυσικό ταχύτητες μετάδοσης πολλαπλάσιες από τις ήδη υπάρχουσες.

Όπως συμβαίνει με τις νεότερες εκδόσεις των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, έτσι και για τα ανωτέρω ασύρματα δίκτυα, η χρήση της τεχνολογίας MIMO είναι πλέον επιβεβλημένη για την επίτευξη των ζητούμενων υψηλών ταχυτήτων. Είναι προφανές, πως για την εύκολη ενσωμάτωση της MIMO τεχνολογίας ειδικά στις κινητές συσκευές (τηλέφωνα, laptop, tablets) απαιτείται η χρήση όλο και μικρότερων κεραιών σε μέγεθος και βάρος. Επομένως, οι μικροταινιακές κεραιές με κατάλληλη σχεδίαση μπορούν να καλύψουν τις παραπάνω απαιτήσεις [20][21].

Μάλιστα, η βασικότερη επιδίωξη που αφορά την επίτευξη των παραπάνω στόχων, εστιάζει στην λεγόμενη Ultra-Wideband (UWB) τεχνολογία, και κατ' επέκταση στις κεραιές που δύνανται να εξυπηρετήσουν αυτόν τον σκοπό. Η τεχνολογία UWB, χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων απαιτώντας ταυτόχρονα χαμηλή ενέργεια τροφοδοσίας, αλλά και χαμηλό κόστος κατασκευής. Παράλληλα, μία UWB κεραία είναι δυνατό να αντικαταστήσει πολλαπλές κεραιές στενής ζώνης, ικανοποιώντας την ανάγκη για λειτουργία σε διαφορετικές συχνότητες όπως προστάζουν οι σύγχρονες ανάγκες στις ασύρματες επικοινωνίες, διατηρώντας αλλά και μειώνοντας τον προκαθορισμένο όγκο κατασκευής.

Σε ό,τι αφορά μια μικροταινιακή κεραία, είτε με τη χρήση πολλαπλών επιστρώσεων, είτε με τη δημιουργία ειδικών σχισμών στο μεταλλικό επίθεμα, μπορεί να αποκτήσει σχετικά εύκολα τα χαρακτηριστικά μιας UWB κεραιάς [22].



Σχήμα 3.11 Dual-Band MIMO κεραία για εφαρμογές σε LTE και WLAN συστήματα

Πηγή: Duong Thanh Tu, Nguyen Van Hoc, Vu Van Yem, Pham Dinh Son (2017) Design and Implementation of Dual-Band MIMO Antenna with Low Mutual Coupling Using EBG for Handheld Applications, International Journal of Engineering and Technology Innovation



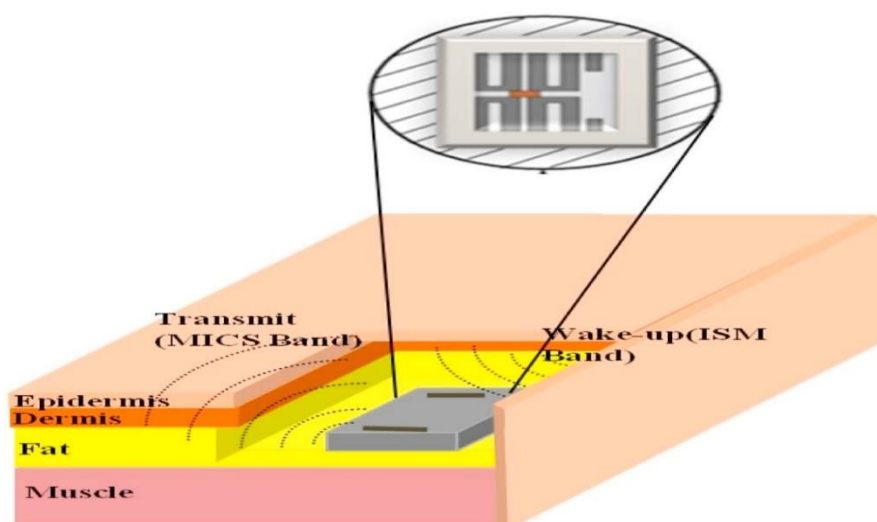
Σχήμα 3.12 Συστοιχία μικροταινιακών κεραιών διπλής πόλωσης για εφαρμογή σε Wi-Fi συστήματα

Πηγή: <https://technology.ihs.com/593647/the-rf-front-end-unsung-hero-of-the-premium-smartphone>

3.5.6 Βιοϊατρικά συστήματα ακτινοβολίας

Στις μέρες μας, ένα πλήθος εμφυτεύσιμων ιατρικών συσκευών χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή αναρίθμητων διαγνωστικών και θεραπευτικών λειτουργιών. Με τη συνδρομή της βιοτεχνολογίας, καθίσταται δυνατή η πλήρης και αμφίδρομη επικοινωνία με μία εμφυτευμένη συσκευή στο σώμα κάποιου ασθενούς, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες για την κατάσταση κάποιων δεικτών της υγείας του ανά πάσα στιγμή, αλλά και δίνοντας την ευκαιρία στον εκάστοτε γιατρό να παρακολουθεί απομακρυσμένα την εξέλιξη των δεικτών αυτών για κάθε ασθενή. Μάλιστα, οι εμφυτεύσιμες μικροταινιακές κεραίες έχουν ήδη βρει και πλήθος προηγμένων ιατρικών εφαρμογών, όπως είναι η θεραπεία της καρδιακής αρρυθμίας, η αγγειοπλαστική με χρήση μπαλονιών, αλλά και η θεραπεία όγκων με χρήση υπερθερμίας.

Επομένως, είναι αυτονόητο πως η κατασκευή μιας εμφυτεύσιμης κεραίας θα πρέπει να γίνει αρκετά προσεκτικά, και η επιλογή τελικά μιας μικροταινιακής κεραίας είναι μονόδρομος. Για την επίτευξη συντονισμού που αφορά τις ανωτέρω συχνότητες, προτιμώνται υποστρώματα με μικρό πάχος και μεγάλη διηλεκτρική σταθερά, οδηγώντας ταυτόχρονα σε μείωση του συνολικού μεγέθους της κεραίας, αλλά και στην ελαχιστοποίηση της ανεπιθύμητης ακτινοβολίας. Μάλιστα, το επίπεδο γείωσης που βρίσκεται στο κάτω μέρος της κεραίας, τείνει να αποτρέψει την ακτινοβολία από το να εισχωρήσει περαιτέρω στο ανθρώπινο σώμα [23].



Σχήμα 3.13 Σχηματική αναπαράσταση μιας εμφυτεύσιμης μικροταινιακής κεραίας και της σχετικής της θέσης στο ανθρώπινο δέρμα

Πηγή: Shankar Bhattacharjee, Santanu Maity, Sanjeev Kumar Metya, Chandan Tilak (2015) Performance enhancement of implantable medical antenna using differential feed technique, Engineering Science and Technology, an International Journal

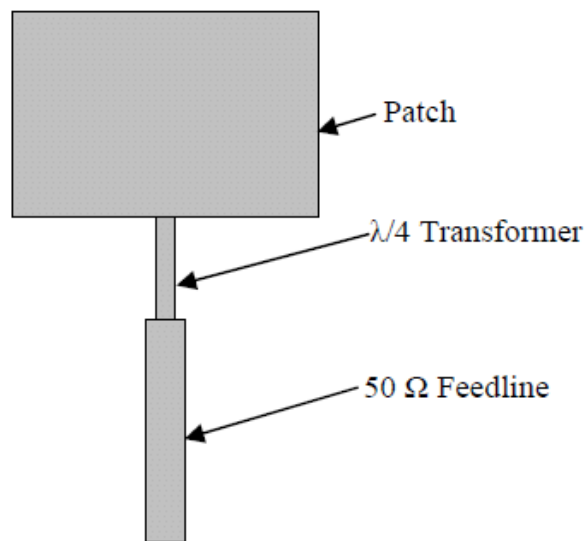
3.6 Μέθοδοι τροφοδοσίας

Ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τόσο τον τρόπο και την ποιότητα ακτινοβολίας μιας μικροταινιακή κεραίας, όσο και τη δυσκολία σε συνδυασμό με το κόστος κατασκευής της, είναι η διάταξη τροφοδοσίας της, και οι διάφορες παραλλαγές που μπορεί αυτή να έχει. Η πρώτη και βασική διάκριση που μπορεί να γίνει στον τρόπο τροφοδοσίας, αφορά την άμεση τροφοδοσία με επαφή (τυπωμένη γραμμή ή ομοαξονικό συνδετήρα), ή την έμμεση τροφοδοσία μέσω ειδικών τεχνικών (άμεση σύζευξη ή σύζευξη μέσω σχισμής). Οι τέσσερις τελικά αυτές κατηγορίες, παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω [24],[25].

3.6.1 Άμεση τροφοδοσία μέσω τυπωμένης γραμμής (coplanar feedline)

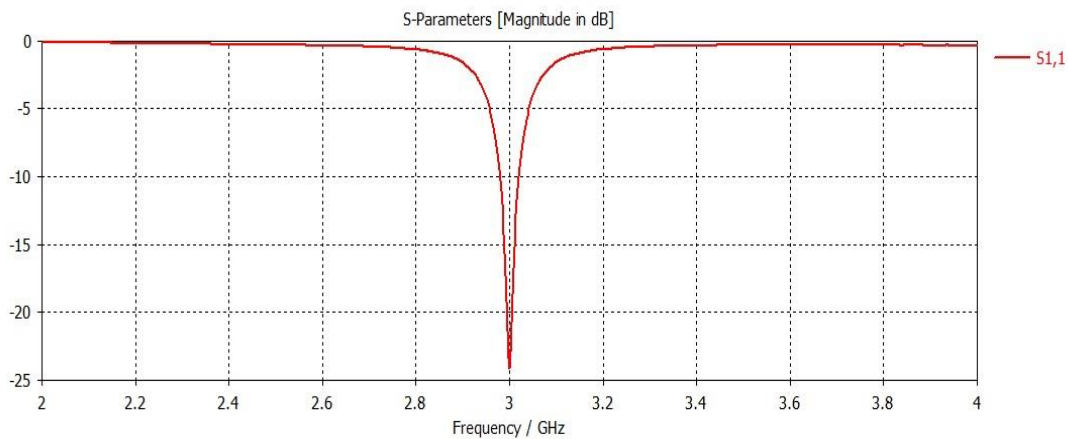
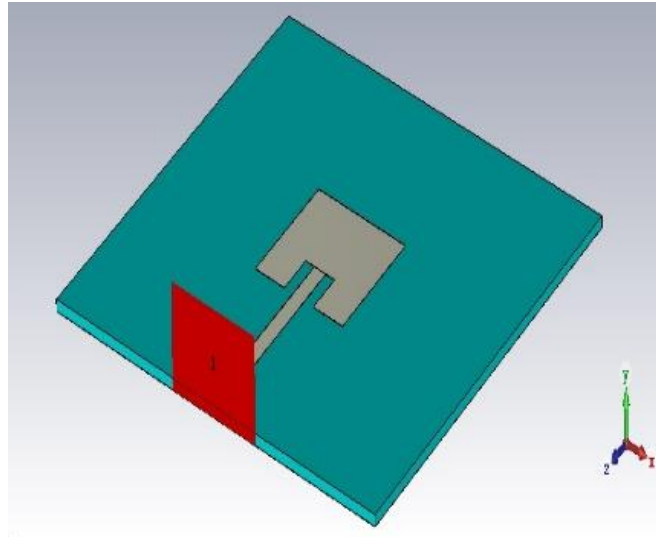
Σε αυτή τη μέθοδο τροφοδοσίας, που είναι από τις πιο διαδεδομένες με αναρίθμητο πλήθος εφαρμογών, χρησιμοποιείται μια τυπωμένη γραμμή χαρακτηριστικού πλάτους w , η οποία και έρχεται σε άμεση επαφή με το μεταλλικό επίθεμα σε κάποια από τις πλευρές του (πλάτους), καθώς βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, και στο άλλο της άκρο είναι συνδεδεμένη με μία πηγή τροφοδοσίας. Ωστόσο, η απευθείας σύνδεσή της με το επίθεμα σε κάποια πλευρά του, ενδέχεται να προκαλέσει ασυνέχεια σε ό,τι αφορά την χαρακτηριστική εμπέδηση των 50Ω της γραμμής, με το μέγεθος αυτής στο άκρο του επιθέματος. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές οι οποίες εξαλείφουν το παραπάνω πρόβλημα. Η πρώτη, αναφέρεται στη χρήση ενός μετασχηματιστή $\lambda/4$ (quarter wavelength transformer), ο οποίος και συνδέει τη γραμμή τροφοδοσίας με μία πλευρά του επιθέματος (σχήμα 3.14). Η δεύτερη αφορά την προσθήκη δύο ορθογωνίων σχισμών στο σημείο επαφής, γεγονός που «μεταφέρει» το πραγματικό σημείο τροφοδοσίας εντός του επιθέματος, όπου η χαρακτηριστική εμπέδηση έχει την τιμή των 50Ω . Στο σχήμα 3.15 αναπαρίσταται ο συγκεκριμένος τρόπος τροφοδοσίας, το οποίο αποτελεί την πρώτη σχεδίαση που έγινε στον ηλεκτρομαγνητικό προσομοιωτή που θα χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια, με σκοπό την εξοικείωση του χρήστη με αυτό.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής $\lambda/4$, θα πρέπει να υπολογιστεί η χαρακτηριστική εμπέδησή με βάση την οποία θα κατασκευαστεί, ούτως ώστε να υπάρχει σωστή προσαρμογή με αυτή στο άκρο του επιθέματος. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι: $Z_T = \sqrt{Z_o Z_L}$ (3.4), όπου Z_T η εμπέδηση του μετασχηματιστή, Z_o η εμπέδηση στο άκρο του επιθέματος, και Z_L η εμπέδηση των 50 Ω της γραμμής τροφοδοσίας. Τέλος, από τις σχέσεις 2.2 και 2.3, και με χρήση της τιμής του Z_T , υπολογίζεται και το πλάτος της τυπωμένης γραμμής του μετασχηματιστή [1],[26].



Σχήμα 3.14 Σχηματική αναπαράσταση τροφοδοσίας του επιθέματος μέσω τυπωμένης γραμμής με τη χρήση μετασχηματιστή $\lambda/4$ για καλύτερη προσαρμογή της εμπέδησης

Κατά παρόμοιο τρόπο, στη μέθοδο προσθήκης των δύο σχισμών στο άκρο του επιθέματος, θα πρέπει να υπολογιστεί το σωστό σημείο μέχρι το οποίο αυτές θα γίνουν. Το ζητούμενο μήκος προκύπτει από τη σχέση $L_s = L/(2\sqrt{\epsilon_{r,eff}})$ (3.5), όπου L το μήκος του επιθέματος, και $\epsilon_{r,eff}$ η σχετική διηλεκτρική σταθερά που υπολογίζεται από τη σχέση 2.1. Το πλάτος των σχισμών υπολογίζεται κυρίως εμπειρικά κατά τη θεωρητική σχεδίαση της κεραίας [1],[26].



Σχήμα 3.15 Σχεδίαση μικροταινιακής κεραίας σε H/M προσομοιωτή με τη χρήση σχισμών στο σημείο επαφής της γραμμής τροφοδοσίας με το ακτινοβόλο επίθεμα (χρήση ιδεατού port τροφοδοσίας) (πάνω) Η S_{11} παράμετρος σκέδασης της κεραίας που δείχνει ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό ενέργειας ανακλάται από τη διάταξη (κάτω)

Η μέθοδος τροφοδοσίας με τυπωμένη γραμμή έχει ένα βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, οι οποίες θα αναλυθούν ακολούθως. Χαρακτηρίζεται από την απλότητα ως προς την υλοποίησή της, καθώς όπως προαναφέρθηκε, το δίκτυο τροφοδοσίας (η τυπωμένη γραμμή) βρίσκεται στο ίδιο ακριβώς επίπεδο με το μεταλλικό επίθεμα, καθιστώντας αρκετά εύκολη την κατασκευή της κεραίας. Επίσης, με τη χρήση των 2 ανωτέρων τεχνικών τροφοδοσίας, είναι εύκολος ο χειρισμός της σύνθετης αντίστασης εισόδου (input impedance), ώστε να υπάρχει ακριβής αντιστοίχιση μεταξύ των αντιστάσεων της γραμμής και του επιθέματος.

Τα ανωτέρω πλεονεκτήματα προσφέρουν σημαντικά και αξιόπιστα αποτελέσματα, ιδίως σε ό,τι αφορά τις θεωρητικές εκτιμήσεις κατά τον σχεδιασμό της κεραίας, όταν χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ένα λεπτό υπόστρωμα. Σε περίπτωση όμως που γίνεται χρήση ενός υποστρώματος με αυξημένο πάχος, η θεωρητική μοντελοποίηση της απόδοσης δεν μπορεί να είναι ακριβής. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση του πάχους του υποστρώματος σηματοδοτεί και την ταυτόχρονη αύξηση του πάχους της γραμμής τροφοδοσίας (σχέσεις 2.2 και 2.3). Όμως, αποτέλεσμα αυτού είναι η περίσσεια ανεπιθύμητης ακτινοβολίας που προκαλείται από τη γραμμή τροφοδοσίας.

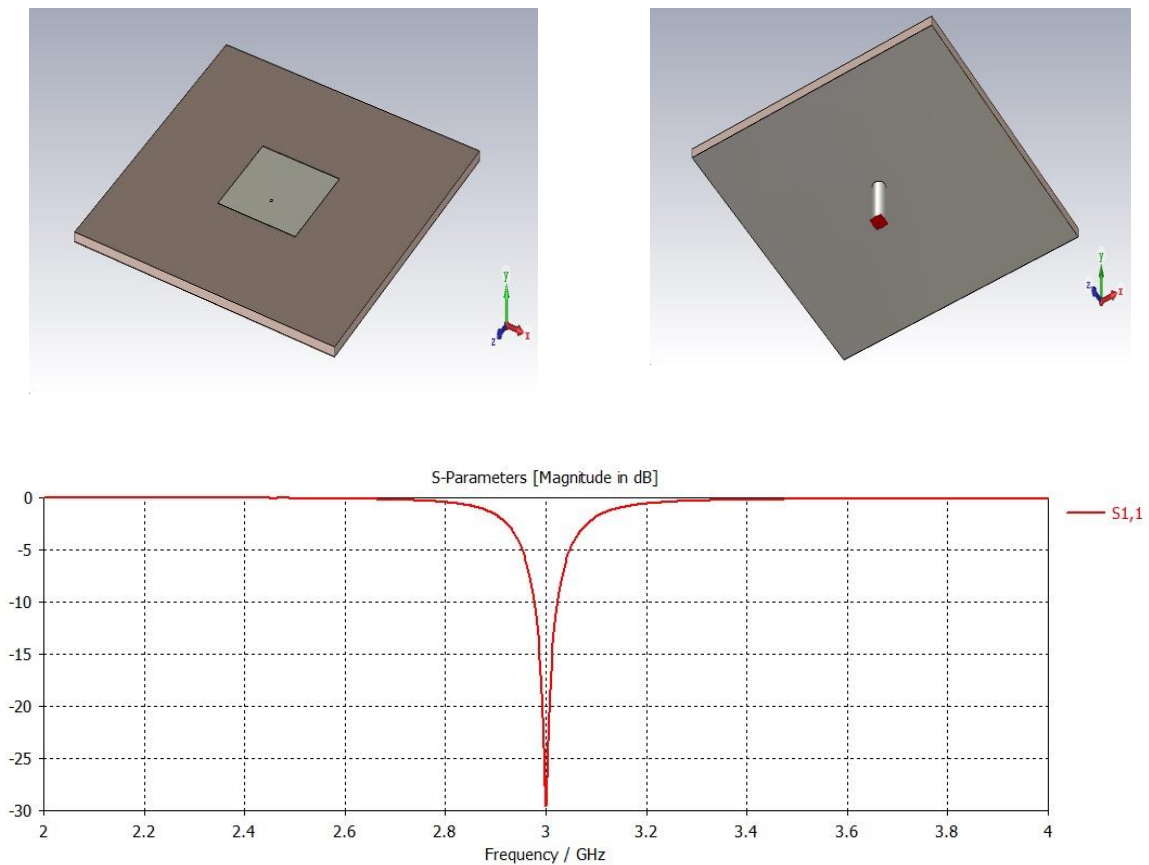
3.6.2 Άμεση τροφοδοσία μέσω ομοαξονικού συνδετήρα (coaxial probe-fed)

Η δεύτερη πιο κοινή μορφή τροφοδοσίας μιας μικροταινιακής κεραίας, είναι αυτή της χρήσης ενός ομοαξονικού συνδετήρα στο κάτω μέρος της κεραίας. Ο συνδετήρας αποτελείται από έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό αγωγό. Ο εσωτερικός αγωγός εκτείνεται διαμέσου του υποστρώματος μέχρι το ακτινοβόλο επίθεμα στην επιφάνεια της κεραίας, στο οποίο και συγκολλάται. Αντίθετα, ο εξωτερικός αγωγός, ο οποίος αποτελεί και το εξωτερικό τοίχωμα του συνδετήρα, προσαρμόζεται στο επίπεδο γείωσης (σχήμα 3.16) [1].

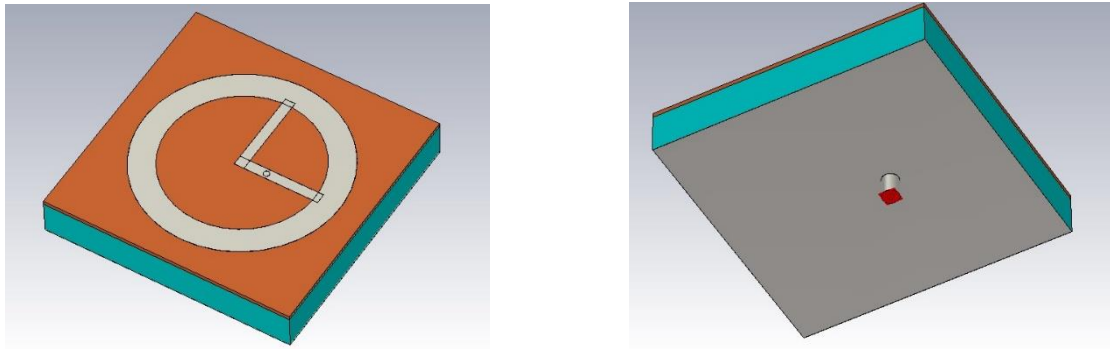
Σε αντίθεση με την τροφοδοσία μέσω τυπωμένης γραμμής όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η περίπτωση τροφοδοσίας μέσω ομοαξονικού συνδετήρα παρουσιάζει ιδιαίτερη ευκολία στον χειρισμό της χαρακτηριστικής εμπέδησης του επιθέματος και την επίτευξη του επιθυμητού μεγέθους, καθώς αυτό επιτυγχάνεται με την σωστή επιλογή θέσης για τον συνδετήρα, χωρίς να απαιτεί κάποια άλλη περίπλοκη διαδικασία. Ένα ακόμη βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μέθοδος τροφοδοσίας, είναι ότι το δίκτυο τροφοδοσίας όσο περίπλοκο και αν γίνει, είναι απομονωμένο από τα ακτινοβόλα στοιχεία της κεραίας, καθώς βρίσκεται κάτω από το επίπεδο γείωσης (σχήμα 3.17).

Παράλληλα, σε σύγκριση με όλες τις μεθόδους τροφοδοσίας, αυτή με τον ομοαξονικό συνδετήρα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα, καθώς όπως αναφέρθηκε, το στοιχείο τροφοδοσίας (ο εσωτερικός αγωγός) συνδέεται απευθείας με το επίθεμα, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του συνδετήρα βρίσκεται κάτω από το επίπεδο γείωσης, μειώνοντας έτσι στο ελάχιστο την ψευδή ακτινοβολία (spurious radiation) που προκαλείται [27].

Θα πρέπει όμως να τονιστεί, πως η χρήση ομοαξονικού συνδετήρα χαρακτηρίζεται από το σχετικό μικρό bandwidth ακτινοβολίας της κεραίας λόγω του μικρού πάχους του υποστρώματος, καθώς στην πιθανή χρήση υποστρώματος μεγάλου πάχους, εμφανίζονται δυσκολίες στον τρόπο κατασκευής λόγω του αυξημένου απαιτούμενου μήκους του εσωτερικού αγωγού του συνδετήρα.



Σχήμα 3.16 Μικροταινιακή κεραία με τροφοδοσία μέσω ομοαξονικού συνδετήρα (άνω και κάτω μέρος) (πάνω) Η S₁₁ παράμετρος σκέδασης της κεραίας δείχνει άριστη μετατροπή της ενέργειας τροφοδοσίας σε ακτινοβολούμενη ενέργεια (κάτω)



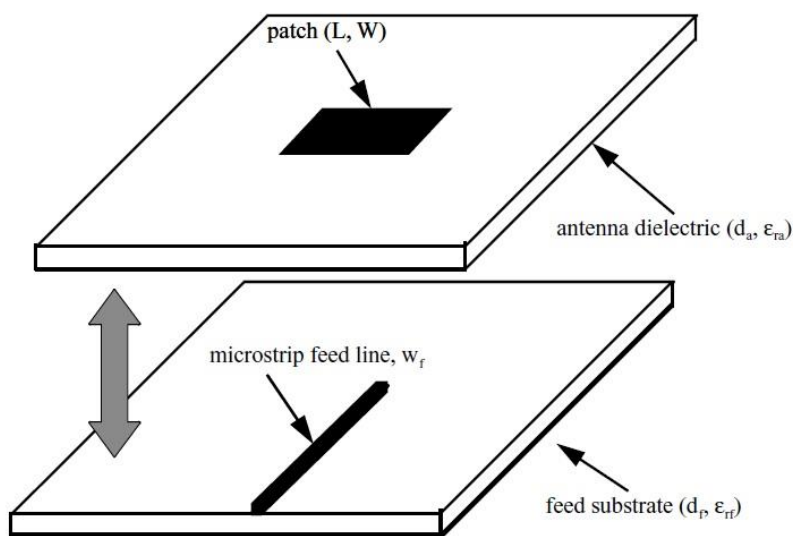
Σχήμα 3.17 Μικροταινιακή κεραία δύο υποστρωμάτων- Η ενέργεια στην περίπλοκη διάταξη του επιθέματος μεταφέρεται απευθείας μέσω του ομοαξονικού συνδετήρα της βάσης, κάτω από το επίπεδο γείωσης

3.6.3 Τροφοδοσία με άμεση σύζευξη (proximity coupling)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πρώτη από τις δύο με τις οποίες υλοποιείται η παροχή ενέργειας στην κεραία, και τελικά στο ακτινοβόλο επίθεμα, χωρίς την άμεση επαφή του στοιχείου τροφοδοσίας με αυτό. Σε αυτή την περίπτωση, η μικροταινιακή κεραία αποτελείται από ένα γειωμένο υπόστρωμα, με μια τυπωμένη γραμμή στο πάνω μέρος αυτού, η οποία αποτελεί και την γραμμή τροφοδοσίας της κεραίας. Ακριβώς από πάνω, χωρίς κάποιο κενό ανάμεσά τους, βρίσκεται ένα ακόμη διηλεκτρικό υπόστρωμα, το οποίο και αποτελεί τη βάση του μεταλλικού επιθέματος. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, η μεταφορά της ενέργειας από την γραμμή τροφοδοσίας προς το ακτινοβόλο επίθεμα, γίνεται καθαρά ηλεκτρομαγνητικά, χάρις στην πολύ μικρή απόσταση που υπάρχει ανάμεσά τους (σχήμα 3.18).

Η τροφοδοσία μέσω άμεσης σύζευξης εμφανίζει σημαντικό πλεονέκτημα εν συγκρίσει με τις μεθόδους άμεσης τροφοδοσίας σε ό,τι αφορά την επίτευξη υψηλού bandwidth. Αυτό συμβαίνει διότι η επαγωγική σύζευξη που εμφανίζουν οι παραπάνω μέθοδοι, απαιτεί την αναγκαστική μείωση του πάχους του υποστρώματος, κρατώντας τελικά το επιτεύξιμο bandwidth σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Αντίθετα, η μέθοδος της άμεσης σύζευξης προσφέρει την επιλογή χρήσης δύο διαφορετικών σε χαρακτηριστικά (πάχος, διηλεκτρική σταθερά, εφαπτομένη απωλειών) υποστρωμάτων, αξιοποιώντας στο έπακρον τα πλεονεκτήματα που αυτά προσφέρουν [28].

Επί παραδείγματι, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση στην ανεπιθύμητη ακτινοβολία που προέρχεται από τη γραμμή τροφοδοσίας, με τη χρήση ενός λεπτού υποστρώματος στη βάση της γραμμής. Παράλληλα, για την επίτευξη βελτιωμένου bandwidth, ενδείκνυται η χρήση υποστρώματος με αυξημένος πάχος, ως βάση στήριξης του μεταλλικού επιθέματος. Θα πρέπει όμως να τονιστεί, πως ο συγκεκριμένος τρόπος τροφοδοσίας είναι αρκετά απαιτητικός σε ό,τι αφορά την κατασκευή της κεραίας, γεγονός που αν δεν προσεχθεί ιδιαίτερος δύναται να επιφέρει άσχημα αποτελέσματα. Η κατασκευή είναι πολυεπίπεδου χαρακτήρα, και απαιτεί την άριστη ευθυγράμμιση των στοιχείων ώστε να υπάρχει αδιάκοπη μεταφορά της ενέργειας προς το επίθεμα. Τέλος, σημαντική προσοχή πρέπει να δοθεί στα μικρά κενά αέρος που ίσως εμφανιστούν μεταξύ των στρωμάτων της κεραίας κατά τη διαδικασία κατασκευής της, και αδιαμφισβήτητα είναι από τις κυριότερες αιτίες που μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την σύζευξη της ενέργειας προς το επίθεμα, καθώς ιδιαίτερα σε μεγάλες συχνότητες εμφανίζονται ηλεκτρικά ακόμη μεγαλύτερα [28].



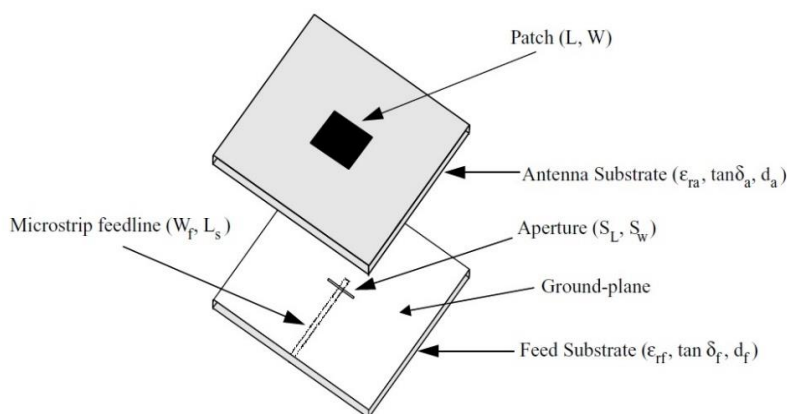
Σχήμα 3.18 Σχηματική αναπαράσταση μικροταινιακής κεραίας η οποία τροφοδοτείται με τη μέθοδο της άμεσης σύζευξης

3.6.4 Τροφοδοσία με σύζευξη μέσω σχισμής (aperture coupling)

Ο τέταρτος βασικός τρόπος τροφοδοσίας, ο οποίος παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με αυτόν της άμεσης σύζευξης, είναι αυτός της σύζευξης μέσω σχισμής. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ξανά η χρήση δύο υποστρωμάτων, τα οποία και χωρίζει ένα επίπεδο γείωσης. Κατά τα γνωστά, το μεταλλικό επίθεμα βρίσκεται στην πάνω πλευρά του ενός υποστρώματος, ενώ η γραμμή τροφοδοσίας βρίσκεται στην κάτω πλευρά του άλλου, η ενέργεια της οποίας μεταφέρεται στο επίθεμα, χάρις σε μια σχισμή που δημιουργείται στο ενδιάμεσο επίπεδο γείωσης (σχήμα 3.19).

Και εδώ, η επιλογή των φυσικών και διηλεκτρικών χαρακτηριστικών των υποστρωμάτων είναι εντελώς ανεξάρτητη, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε βέλτιστη ακτινοβολία της κεραίας, αυξάνοντας το bandwidth και μειώνοντας την ανεπιθύμητη ακτινοβολία από τη γραμμή. Σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των συγκεκριμένων στόχων επιτελεί και το άνοιγμα (σχισμή) που θα δημιουργηθεί στο επίπεδο γείωσης. Η επιλογή του σχήματος, του μεγέθους και της θέσης αυτού, χρήζει ιδιαίτερης προσοχής ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Κατά κύριο λόγο, η σχισμή έχει σχήμα ορθογωνίου σχετικά μικρών διαστάσεων, και τοποθετείται κεντρικά σε αντιστοιχία με το επίθεμα, οδηγώντας σε χαμηλή διασταυρούμενη πόλωση, εξαιτίας της συμμετρίας που παρουσιάζει σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή [29].

Όπως όμως συμβαίνει και με τη μέθοδο της άμεσης σύζευξης, η τροφοδοσία της σύζευξης μέσω σχισμής απαιτεί πολλή προσοχή κατά τη διαδικασία υλοποίησης και κατασκευής της κεραίας, καθώς θα πρέπει να υπάρχει αντίστοιχα ακριβής ευθυγράμμιση των υποστρωμάτων, της γραμμής τροφοδοσίας, και της θέσης της σχισμής, για να αποφευχθεί κάθε πιθανή ασυνέχεια στην κατασκευή, κυρίως από ηλεκτρομαγνητική σκοπιά [29].

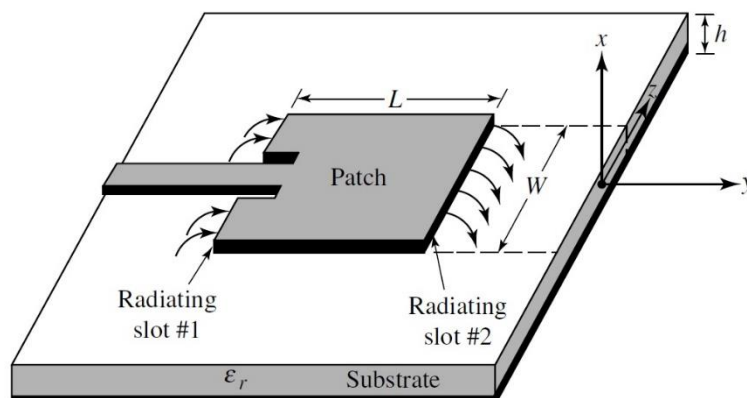


Σχήμα 3.19 Σχηματική αναπαράσταση μικροταινιακής κεραίας η οποία τροφοδοτείται με τη μέθοδο της σύζευξης μέσω σχισμής

3.7 Μηχανισμός ακτινοβολίας

Ο μηχανισμός λειτουργίας μιας τυπικής μικροταινιακής κεραίας παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με αυτόν μιας μικροταινιακής γραμμής, και για την ακρίβεια αποτελεί μία προηγμένη τροποποίηση αυτού. Όπως εξετάσθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μία διάταξη μικροταινιακής τυπωμένης γραμμής πάνω σε ένα γειωμένο υπόστρωμα, η οποία τροφοδοτείται με κάποια ισχύ, «φυλακίζει» το μεγαλύτερο μέρος των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται, στα όρια του υποστρώματος. Ωστόσο, ένα όχι αμελητέο μέρος αυτών, εκτείνεται πέραν του υποστρώματος, δημιουργώντας κροσσούς ακτινοβολίας που εξαπλώνονται στα όρια των δύο μεγάλων πλευρών της γραμμής (σχήμα 3.20).

Εντούτοις, τα δύο αυτά πεδία που αναπτύσσονται στις πλευρές της γραμμής είναι αντίθετης κατεύθυνσης, και συνεπώς η συνολική ακτινοβολία που συγκεντρώνεται στον κεντρικό άξονα της διάταξης είναι η ελάχιστη δυνατή. Επομένως, μία μικροταινιακή γραμμή δεν είναι καθόλου ωφέλιμη από την σκοπιά της ακτινοβολίας. Αντίθετα, μία μικροταινιακή κεραία χρησιμοποιεί προς όφελός της το φαινόμενο αυτό, δίνοντας μια αρκετά πιο βελτιωμένη μορφή και ποσότητα ακτινοβολίας. Εξετάζοντας μια τυπική μικροταινιακή κεραία με ένα τετραγωνικό επίθεμα στο πάνω μέρος της, παρατηρείται πως τα δύο αυτά πεδία των κροσσών εμφανίζονται στα όρια των δύο πλευρών του πλάτους (W). Σε αυτή την περίπτωση, τα δύο πεδία διεγείρονται σε φάση, και από τη σύνθεση των δυναμικών γραμμών προκύπτει ένα νέο ηλεκτρικό πεδίο το οποίο και αποτελεί το σημείο αναφοράς ακτινοβολίας μιας μικροταινιακής κεραίας. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, η απόσταση μεταξύ των δύο πεδίων θα πρέπει να είναι περίπου ίση με $\lambda/2$ [5],[6],[7].



Σχήμα 3.20 Σχηματική αναπαράσταση ακτινοβολίας μιας μικροταινιακής κεραίας λόγω των κροσσών ακτινοβολίας

Μάλιστα, καθώς οι κροσσοί ακτινοβολίας εμφανίζονται ως δύο ξεχωριστά ακτινοβόλα πεδία κατά μήκος του πλάτους W του επιθέματος, αυτό δείχνει ηλεκτρικά μεγαλύτερο σε σχέση με την πραγματική σχεδίαση. Το μήκος L δηλαδή εκτείνεται κατά ΔL , το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση 3.3, και έτσι δημιουργείται το ενεργός μήκος L_{eff} , το οποίο είναι: $L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L$ (3.5).

Σε ό,τι αφορά το (κανονικοποιημένο) διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας, οι εξισώσεις που το περιγράφουν είναι οι εξής [24]:

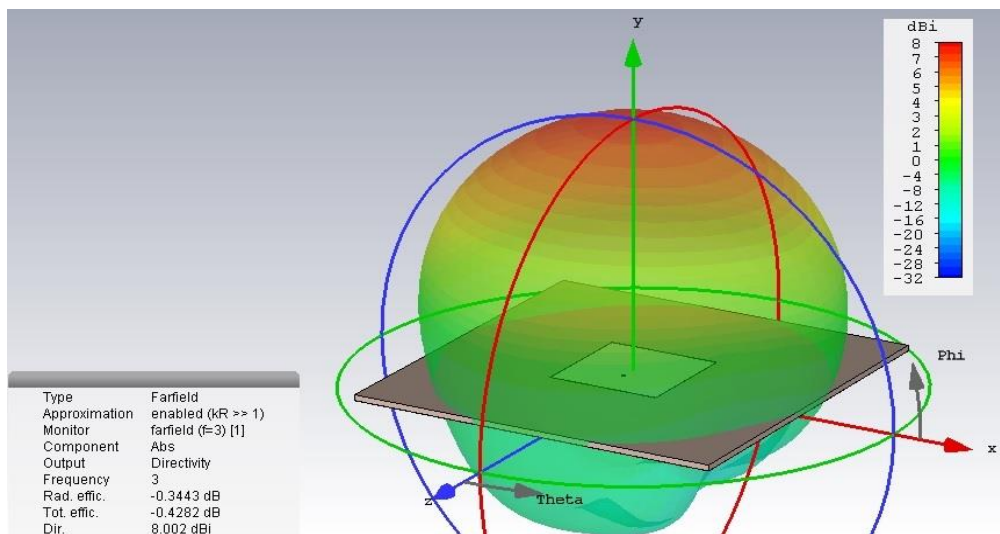
$$E_{\theta} = \frac{\sin\left(\frac{kW \sin \theta \sin \varphi}{2}\right)}{\frac{kW \sin \theta \sin \varphi}{2}} \cos\left(\frac{kL}{2} \sin \theta \cos \varphi\right) \cos \varphi$$

$$E_{\varphi} = -\frac{\sin\left(\frac{kW \sin \theta \sin \varphi}{2}\right)}{\frac{kW \sin \theta \sin \varphi}{2}} \cos\left(\frac{kL}{2} \sin \theta \cos \varphi\right) \cos \theta \sin \varphi \quad (3.6)$$

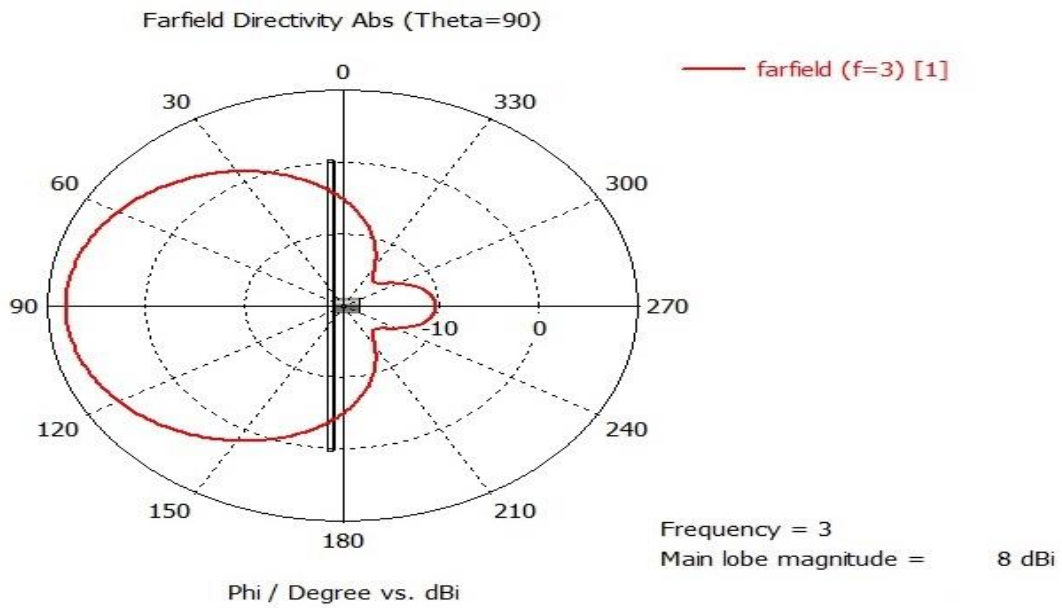
όπου $\theta, \varphi \in [-90^{\circ}, 90^{\circ}]$ και $k = 2\pi/\lambda$ ο κυματαριθμός ενός κύματος στον ελεύθερο χώρο. Επιπρόσθετα, το απόλυτο μέγεθος του πεδίου δίνεται από τη σχέση:

$$|f(\theta, \varphi)| = \sqrt{E_{\theta}^2 + E_{\varphi}^2} \quad (3.7).$$

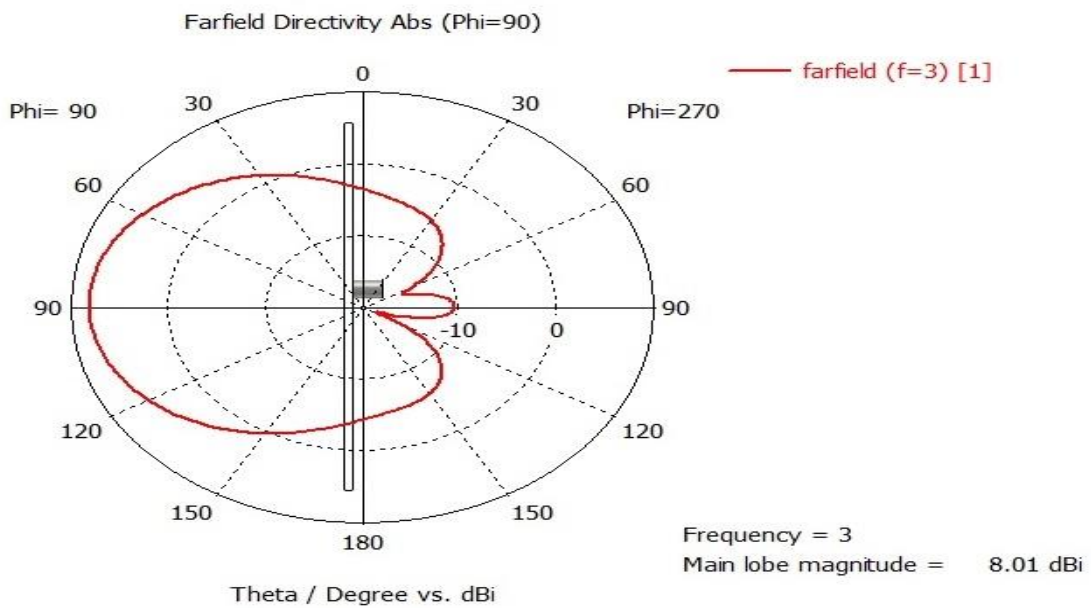
Παίρνοντας ως παράδειγμα την μικροταινιακή κεραία με τροφοδοσία μέσω ομοαξονικού συνδετήρα, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο σχήμα 3.16, το διάγραμμα ακτινοβολίας παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα τόσο σε πολική όσο και σε 3D μορφή (οι γωνίες θ και φ χρησιμοποιούνται αντίστροφα στον προσομοιωτή):



Σχήμα 3.21 3D αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας όπου παρατηρείται το μέγιστο της ακτινοβολίας στο ζενίθ

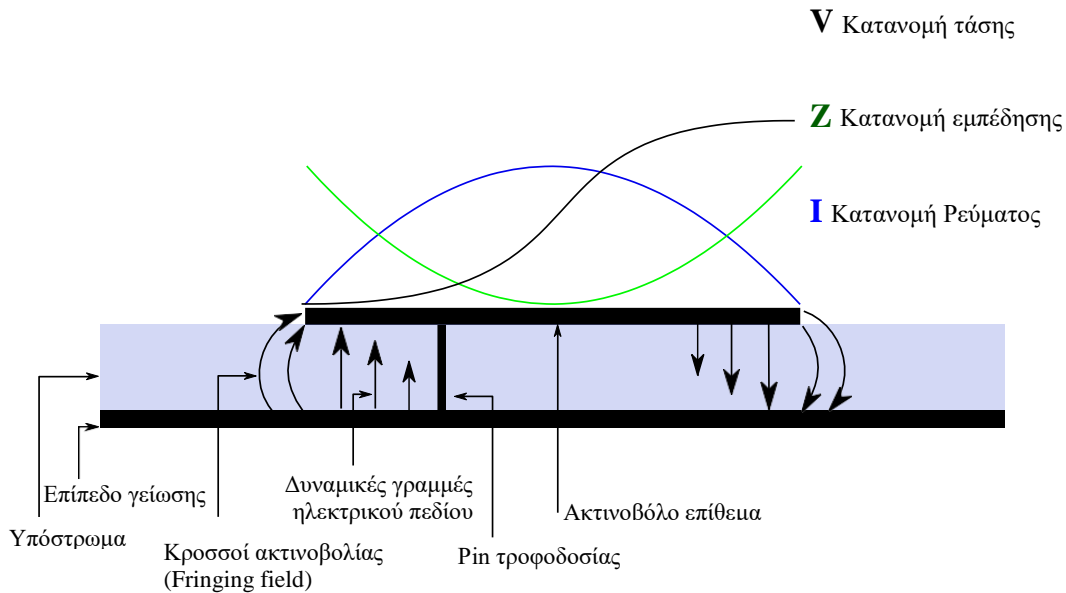


Σχήμα 3.22 Αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας σε πολικές συντεταγμένες – άποψη από το xy επίπεδο



Σχήμα 3.23 Αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας σε πολικές συντεταγμένες – άποψη από το yz επίπεδο

Για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου της ακτινοβολίας της κεραίας, παρατίθεται το παρακάτω σχήμα, στο οποίο απεικονίζεται ο τρόπος που κατανέμονται στην κεραία το ρεύμα, η τάση, και η εμπέδηση, και πώς τελικά δημιουργούνται οι κροσσοί ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.24 Κατανομή της τάσης, της εμπέδησης, και του ρεύματος μιας μικροταινιακής κεραίας που τροφοδοτείται μέσω διόδου

Πηγή: Adriana M. Oprian (2016) *Antenna Design for Mobile Satellite Communications*, Aalborg University.

Συνοψίζοντας, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν η δομή και τα χαρακτηριστικά μιας μικροταινιακής κεραίας, καθώς και τα αναρίθμητα πλεονεκτήματα που αυτή παρουσιάζει, σε συνδυασμό με τις εφαρμογές που βρίσκει σε πάρα πολλούς σημαντικούς τομείς της τεχνολογίας. Στο επόμενο κεφάλαιο, θα αναλυθεί διεξοδικά μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές που βρίσκει η μικροταινιακή τεχνολογία κεραίων, αυτή των δορυφορικών επικοινωνιών, που αποτελεί το κύριο θέμα της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΣΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

4.1 Εισαγωγή

Αναμφισβήτητα, οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο του ευρύτερου δικτύου επικοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο τις τελευταίες δεκαετίες. Με άμεση εφαρμογή στις τηλεπικοινωνίες, το Διαδίκτυο, την πλοήγηση, την πρόγνωση του καιρού, τη μετάδοση ζωντανών προγραμμάτων, και γενικότερα τη μετάδοση τεράστιου όγκου πληροφοριών από οποιοδήποτε μέρος του πλανήτη σε ένα άλλο, και μάλιστα με ολοένα αυξανόμενες ταχύτητες μετάδοσης, θα έλεγε κανείς πως χωρίς την εφεύρεση και χρήση των δορυφορικών τεχνολογιών, η καθημερινότητα θα ήταν εντελώς διαφορετική σε σχέση με το πώς είναι σήμερα.

Μάλιστα, ο αντίκτυπος που θα είχε μια πιθανή μη ανακάλυψη της δορυφορικής τεχνολογίας, είναι σίγουρο πως δεν θα περιοριζόταν μόνο στην έλλειψη της επικοινωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά ίσως πολύ περισσότερο θα επηρέαζε την παγκόσμια οικονομία, καθώς όπως είναι λογικό οι δορυφορικές επικοινωνίες αποφέρουν δισεκατομμύρια δολάρια (ευρώ αντίστοιχα) κάθε χρόνο, από όλο το φάσμα λειτουργίας τους. Από την κατασκευή των επίγειων σταθμών βάσης μέχρι την κατασκευή και την αποστολή πολύπλοκων δορυφορικών συστημάτων σε τροχιά, αλλά και από την έκδοση της πρώτης άδειας υλοποίησης έως και την πλήρη χρήση τους είτε από ιδιώτες, είτε από παγκόσμιους οργανισμούς, το σύνολο της επένδυσης αλλά και του κέρδους αγγίζει νούμερα που καθιστούν τον τομέα των δορυφορικών επικοινωνιών, έναν από τους πιο επικερδείς σε παγκόσμια κλίμακα.

Γίνεται λοιπόν εύκολα κατανοητό, πως για την κάλυψη τόσο των επικοινωνιακών όσο και των οικονομικών στόχων, ο τομέας των δορυφορικών επικοινωνιών όχι μόνο έχει ήδη αναπτυχθεί σε εκθετικό βαθμό από την πρώτη στιγμή που υλοποιήθηκε ως ιδέα, αλλά συνεχίζει να αναπτύσσεται με τον ίδιο ρυθμό, προσφέροντας μάλιστα οικονομικά προσιτές λύσεις στον οποιονδήποτε ιδιώτη που αυτός το επιθυμεί.

4.2 Τροχιές δορυφόρων

Το 1957, η τότε Σοβιετική Ένωση εκτόξευσε τον πρώτο τεχνητό δορυφόρο, τον Sputnik 1, θέτοντας τον θεμέλιο λίθο για τη δημιουργία ενός νέου κλάδου τηλεπικοινωνιών, που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αποτελεί σημείο αναφοράς σε παγκόσμιο επίπεδο. Έκτοτε, έχουν εκτοξευθεί περίπου 6500 δορυφόροι, με σκοπό να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες 40 και πλέον χωρών. Από αυτούς, τη δεδομένη στιγμή λειτουργούν περίπου οι 1700, οι οποίοι βρίσκονται διασκορπισμένοι σε τέσσερις βασικές τροχιακές δομές, κινούμενοι σε συγκεκριμένα επίπεδα (μονοπάτια), υπακούοντας μάλιστα τους τρεις νόμους του Κέπλερ. Από τη σκοπιά των δορυφορικών τροχιών, οι νόμοι του Κέπλερ μεταφράζονται ως εξής [16],[17],[30]:

α) Η τροχιά ενός δορυφόρου είναι ελλειπτική, με τη Γη να αποτελεί τη μία από τις δύο εστίες της έλλειψης αυτής.

β) Η νοητή ακτίνα που ενώνει έναν δορυφόρο με τη μία εστία της έλλειψης (τη Γη δηλαδή) καθώς αυτός κινείται, διαγράφει ίσα εμβαδά σε ίσους χρόνους. Αυτό σημαίνει πως όταν η απόσταση μεταξύ Γης και δορυφόρου αυξάνεται, τότε η ταχύτητα του μειώνεται ανάλογα.

γ) Ο λόγος των τετραγώνων της περιόδου περιφοράς δύο δορυφόρων, είναι ίσος με τον λόγο των κύβων του μήκους του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης που αυτοί διαγράφουν.

Το βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει ένας δορυφόρος σε σχέση με ένα οποιοδήποτε επίγειο μέσο επικοινωνίας, είναι πως δεν υπόκειται σε κάποιο εδαφικό περιορισμό όπως είναι η θάλασσα, τα βουνά, η έρημος, και κάθε άλλο φυσικό χαρακτηριστικό που δύναται να αποτελέσει εμπόδιο στην επικοινωνία. Μάλιστα, η ακτίνα κάλυψης ενός και μόνο δορυφόρου μπορεί να φτάσει και το 40% της επιφάνειας της Γης, περίπου δηλαδή όσο ένα ημισφαίριο, ποσοστό που μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση ενός δικτύου δορυφόρων (satellite constellation), καλύπτοντας στο μέγιστο τις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες. Αξίζει δε να σημειωθεί, πως τα δορυφορικά συστήματα δεν επηρεάζονται από την ακτίνα εκπομπής μεταξύ δύο σημείων. Το ίδιο ακριβώς κόστος θα προκύψει για την κάλυψη μερικών δεκάδων χιλιομέτρων με την κάλυψη μερικών χιλιάδων. Οι τέσσερις τροχιές οι οποίες διέπουν την κίνηση των δορυφόρων παρουσιάζονται ακολούθως.

4.2.1 Δορυφόροι γεωσύγχρονης τροχιάς (Geosynchronous Orbit – GSO)

Η πρώτη βασική κατηγορία τροχιάς ενός δορυφόρου είναι η λεγόμενη γεωσύγχρονη τροχιά. Με κύρια χρήση τις τηλεοπτικές και ραδιοφωνικές μεταδόσεις ανά την υφήλιο, η κατηγορία αυτή αφορά δορυφόρους που κινούνται σε ελλειπτική τροχιά με την περίοδο μιας πλήρους περιστροφής να πλησιάζει τις 24 ώρες ακριβώς. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, η περίοδος αυτή ταιριάζει ακριβώς με την περίοδο περιστροφής της Γης, γεγονός που αποτελεί και το βασικό χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου συγχρονισμού, οι δορυφόροι βρίσκονται σε ύψος 42164 km, αρκετά μάλιστα πάνω από την εξωτερική ζώνη Van Allen, η οποία και εκτείνεται έως τα 25000 km. Αυτή τη στιγμή, περίπου 500 δορυφόροι γεωσύγχρονης τροχιάς βρίσκονται σε λειτουργία. Μία πάρα πολύ σημαντική υποκατηγορία της προαναφερθείσας τροχιάς, είναι αυτή των δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς (Geostationary Orbit – GEO) [16],[30],[31].

Η διαφορά ενός δορυφόρου γεωσύγχρονης τροχιάς με έναν γεωστατικής, έγκειται στο γεγονός πως ο πρώτος μπορεί να κινείται είτε πάνω στον ουράνιο Ισημερινό, είτε και να αποκλίνει λίγο προς τους πόλους, ώστε να προσφέρει μεγαλύτερη κάλυψη, ενώ ο δεύτερος κινείται αποκλειστικά και μόνο πάνω από τον Ισημερινό. Γεγονός που σε συνδυασμό με την συγχρονισμένη περιστροφή του με αυτή της Γης, δίνει την εντύπωση σε έναν γήινο παρατηρητή, πως ο δορυφόρος βρίσκεται σχεδόν ακίνητος στην ουράνια σφαίρα. Ένας μόνο γεωστατικός δορυφόρος έχει οπτική επαφή με περίπου το 40% της επιφάνειας της Γης. Τρεις τέτοιοι δορυφόροι, χωρισμένοι από 120 μοίρες γεωγραφικού μήκους, μπορούν να παρέχουν κάλυψη ολόκληρου του πλανήτη, με εξαίρεση το βόρειο και νότιο γεωγραφικό πόλο. Επίσης, ένας γεωστατικός δορυφόρος μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας μια κατευθυντική κεραία, συνήθως ένα μικρό πιάτο, που στοχεύει στο σημείο του ουρανού όπου ο δορυφόρος φαίνεται να αιωρείται. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου δορυφόρου είναι το γεγονός ότι μια κατευθυντική κεραία μπορεί να στραφεί και στη συνέχεια να αφηθεί στη θέση της χωρίς περαιτέρω ρύθμιση, κρίνοντας έτσι μη απαραίτητη την παρουσία ενός συστήματος εντοπισμού. Με λίγα λόγια, προσφέρει τη μεγαλύτερη αναλογία κέρδους-μεταφερόμενων bits. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν κεραίες με υψηλή κατευθυντικότητα, ελαχιστοποιώντας έτσι τις παρεμβολές από επιφανειακές πηγές ή άλλους δορυφόρους.

Οι γεωστατικοί δορυφόροι όμως έχουν και δύο σημαντικούς περιορισμούς. Πρώτον, επειδή η τροχιακή ζώνη είναι ένας εξαιρετικά στενός δακτύλιος στο επίπεδο του Ισημερινού, ο αριθμός των δορυφόρων που μπορούν να διατηρηθούν σε γεωστατικές τροχιές χωρίς την πιθανότητα ακόμα και κάποιας σύγκρουσης, είναι περιορισμένος. Δεύτερον, η απόσταση που χρειάζεται ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα ώστε να ταξιδέψει προς και από έναν γεωστατικό δορυφόρο είναι περίπου 71500 km. Έτσι, μια καθυστέρηση τουλάχιστον 240 ms εισάγεται στην μεταδιδόμενη πληροφορία, γεγονός όχι απόλυτα αποδεκτό. Παράλληλα, απαιτείται αρκετή ισχύς για τη χωρίς προβλήματα μετάδοση ενός σήματος, καθώς η μεγάλη απόσταση που χωρίζει έναν δορυφόρο από έναν επίγειο σταθμό, δύναται να προκαλέσει μεγάλη εξασθένηση στο σήμα. Ενδεικτικά, η απώλεια ισχύος στον ελεύθερο χώρο ορίζεται από τη σχέση $L_{FS} = 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d)$ (dB), όπου λ το μήκος κύματος και d η απόσταση μεταξύ δορυφόρου και επίγειου δέκτη [17].

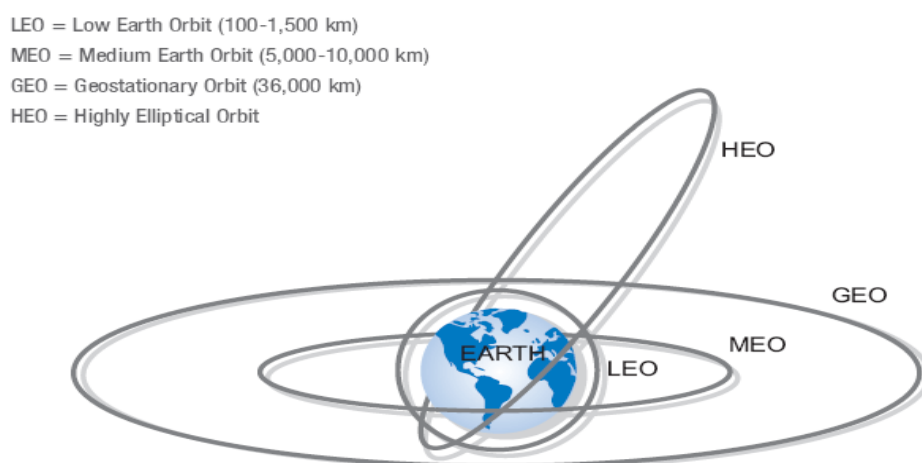
Υπάρχουν δύο άλλα, λιγότερο όμως σοβαρά, προβλήματα με τους γεωστατικούς δορυφόρους. Πρώτον, η ακριβής θέση ενός γεωστατικού δορυφόρου σε σχέση με την επιφάνεια, ποικίλλει ελαφρώς κατά τη διάρκεια κάθε 24ωρης περιόδου εξαιτίας της βαρυτικής αλληλεπίδρασης μεταξύ του δορυφόρου, της Γης, του Ήλιου, της Σελήνης και των μη-χερσαίων πλανητών. Όπως παρατηρείται από την επιφάνεια, ο δορυφόρος κινείται μέσα σε μια ορθογώνια περιοχή του ουρανού, ένα τρισδιάστατο ορθογώνιο πλαίσιο. Η κίνηση στην περιοχή αυτή περιορίζει την ευκρίνεια του διαγράμματος ακτινοβολίας, και συνεπώς το κέρδος ισχύος που έχουν σχεδιαστεί να προσφέρουν οι κεραιές στη Γη. Δεύτερον, παρατηρείται μια δραματική αύξηση του Η/Μ θορύβου στον περιβάλλοντα χώρο όταν ο δορυφόρος πλησιάζει τον Ήλιο, όπως παρατηρείται από έναν σταθμό λήψης στην επιφάνεια, επειδή ο Ήλιος είναι μια ισχυρή πηγή Η/Μ ενέργειας. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως solar fade, είναι ένα πρόβλημα μόνο μέσα στις λίγες ημέρες ισημερίας στα τέλη Μαρτίου και τα τέλη Σεπτεμβρίου. Ακόμα και τότε, τα επεισόδια διαρκούν μόνο λίγα λεπτά και λαμβάνουν χώρα μόνο μία φορά την ημέρα.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, κρίνεται απαραίτητο η χρήση διαφορετικού τύπου δορυφόρων από τη σκοπιά της τροχιάς, καθώς τα ανωτέρω μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι γεωστατικοί δορυφόροι, επηρεάζουν σημαντικά τη γενικότερη απόδοσή τους, πολύ δε περισσότερο το κόστος που απαιτείται για την εκτόξευση και τη συνολική λειτουργία των συγκεκριμένων δορυφόρων.

4.2.2 Δορυφόροι υψηλής ελλειπτικής τροχιάς (Highly Elliptical Orbit – HEO)

Οι δορυφόροι αυτής της τροχιάς, είναι χρήσιμοι κυρίως για την κάλυψη περιοχών με μεγάλα γεωγραφικά πλάτη όταν βρίσκονται στο απόγειο, καθώς εκτελούν ελλειπτική τροχιά με γωνία κλίσης περίπου 64° ως προς το επίπεδο του Ισημερινού. Σε περιπτώσεις που αφορούν τη μετάδοση δεδομένων στις κινητές επικοινωνίες, και κυρίως στις κανονικές τροχιές, οι επίγειες κεραίες αναγκάζονται να λειτουργούν σε γωνία σάρωσης 30° πάνω από τον ορίζοντα, έχοντας έτσι μεγάλη πιθανότητα παρεμβολών λόγω των ψηλών κτιρίων αλλά και των δέντρων. Έτσι, είναι σημαντικό ένας δορυφόρος που βρίσκεται σε εξαιρετικά ελλειπτική τροχιά, να μπορεί να προσφέρει στα τερματικά που βρίσκονται σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη τη δυνατότητα να ακτινοβολούν σε γωνίες ύψους κοντά στις 90° , εξαλείφοντας έτσι το παραπάνω πρόβλημα.

Χαρακτηριστική περίπτωση υψηλής τροχιάς είναι η ελλειπτική τροχιά Molniya, η οποία και χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά τη δεκαετία του '60, από την τότε Σοβιετική Ένωση. Χαρακτηρίζεται από κλίση της τροχιάς στις 63.4° αλλά και από υψηλή εκκεντρότητα (περίπου 0.7). Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, ένας δορυφόρος σε τροχιά Molniya βρίσκεται τον περισσότερο χρόνο της τροχιάς του στη μεριά του απογείου, και συγκεκριμένα τις 8 από τις 12 ώρες που χρειάζεται για έναν πλήρη κύκλο. Στην περίπτωση αυτή, είναι κατάλληλος για παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας υψηλής διάρκειας στο μεγαλύτερο μέρος του βορείου ημισφαιρίου [16],[30],[31].



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών δορυφορικών τροχιών



Σχήμα 4.2 Συγκριτική απεικόνιση των τριών βασικών τροχιών σε ό,τι αφορά την απόσταση τους από το έδαφος – Σύγκριση με τη Σεληνιακή τροχιά

4.2.3 Δορυφόροι μέσης τροχιάς (Medium Earth Orbit – MEO)

Στη λεγόμενη μέση τροχιά, κινούνται δορυφόροι που βρίσκονται σε απόσταση 10000 έως 20000 km από την επιφάνεια της Γης. Η περίοδος τροχιάς των MEO δορυφόρων, κυμαίνεται από 2 έως 12 ώρες, με πιο συνήθη τιμή αυτή των 6 ωρών. Ορισμένοι δε εξ αυτών, εκτελούν σχεδόν τέλεια κυκλική τροχιά, ταξιδεύοντας έτσι σε σταθερό υψόμετρο αλλά και με σταθερή ταχύτητα. Με βάση το σχετικά χαμηλό ύψος που βρίσκονται εν συγκρίσει με αυτό των δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς, η επίτευξη της πλήρους τηλεπικοινωνιακής κάλυψης του πλανήτη, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός συστήματος δορυφόρων (αστερισμό), που χωρίζεται σε 2 τροχιακά επίπεδα των 6 δορυφόρων το καθένα. Δύο αξιοσημείωτες εφαρμογές που βρίσκουν δορυφόροι σε μέση τροχιά, είναι το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (GPS), αλλά και αυτό του Galileo, ένα παγκόσμιο σύστημα πλοήγησης, σχεδιασμένο από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA). Και τα δύο αυτά συστήματα λειτουργούν ελάχιστα πάνω από τα 20000 km [16],[30],[31].

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των MEO δορυφόρων έναντι των γεωστατικών, είναι πως λόγω της σχετικά χαμηλής απόστασής τους από το έδαφος, δεν απαιτείται μεγάλη ισχύς για την επίτευξη ζεύξης με έναν επίγειο σταθμό, στον οποίο επίσης δεν είναι απαραίτητη η χρήση κεραιών μεγάλου μεγέθους, κάτι που περιορίζει αισθητά το συνολικό κόστος κατασκευής. Παράλληλα, ένας MEO δορυφόρος μπορεί να καλύψει μεγαλύτερο μέγεθος επιφάνειας σε σύγκριση με έναν της κατηγορίας LEO (χαμηλής τροχιάς), όπως αυτή θα παρουσιαστεί αμέσως μετά. Επομένως, η κάλυψη σε παγκόσμιο επίπεδο, μπορεί να επιτευχθεί με λιγότερους δορυφόρους σε σχέση με τη χρήση αυτών σε χαμηλή τροχιά.



Σχήμα 4.3 Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (International Space Station – ISS)

Πηγή: <https://www.roadtovr.com/nasas-mission-iss-impressively-detailed-view-life-zero-gravity>

4.2.4 Δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit – LEO)

Η χαμηλή τροχιά (Low Earth Orbit) αφορά την πλειονότητα των ενεργών δορυφόρων. Περίπου 1000 από τους 1700 αυτή τη στιγμή, βρίσκονται στη συγκεκριμένη τροχιά, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS) (σχήμα 4.3), τον μοναδικό κατοικήσιμο τεχνητό δορυφόρο, ο οποίος ανά τακτά χρονικά διαστήματα είναι ορατός στο ανθρώπινο μάτι. Οι LEO δορυφόροι βρίσκονται σε ύψη μεταξύ των 750 και 1500 km (τυπικά κάτω από την πρώτη ζώνη Van Allen), και εκτελούν έναν πλήρη κύκλο της τροχιάς τους σε περίπου 1.5 με 2 ώρες. Αυτό συμβαίνει διότι κινούνται με ταχύτητες πάνω από 7 km ανά δευτερόλεπτο, γεγονός απολύτως απαραίτητο ώστε να αποφύγουν την προς τα κάτω ώθηση που προκαλείται από τη μάζα της Γης. Από τις σημαντικότερες εφαρμογές τους, διακρίνεται η χρήση σε συστήματα επικοινωνιών, όπως αυτό του Iridium που παρουσιάστηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπροσθέτως, δορυφόροι που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της Γης βρίσκονται κατά μεγαλύτερο ποσοστό σε χαμηλή τροχιά, καθώς έτσι μπορούν να «δουν» την επιφάνεια πολύ πιο καθαρά, σε σύγκριση με μεγαλύτερα ύψη [16],[30],[31].

Η πολύ μικρή απόσταση που έχει ένας δορυφόρος που βρίσκεται σε τροχιά LEO από την επιφάνεια της Γης, αποτελεί και το κυριότερο πλεονέκτημα του, καθώς αυτή προσφέρει τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων υψηλού throughput, έχοντας παράλληλα πολύ μικρή τιμή απωλειών στον ελεύθερο χώρο (path loss). Παράλληλα, ο χρόνος που χρειάζονται τα ραδιοκύματα για να ταξιδέψουν προς και από τον δορυφόρο είναι σημαντικά μικρότερος από τις περιπτώσεις των υπολοίπων τροχιών, γεγονός υψίστης σημασίας για real-time εφαρμογές που απαιτούν μηδαμινή καθυστέρηση. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός της λιγότερο οικονομικά δαπανηρής κατασκευής ενός τέτοιου δορυφόρου, κάτι που οφείλεται στο αρκετά μικρότερο μέγεθός του εν συγκρίσει με έναν δορυφόρο GEO. Λαμβάνοντας αυτό υπόψιν, και σε συνάρτηση της πολύ μικρής απόστασης από την επιφάνεια της Γης, δορυφόροι αυτής της κατηγορίας απαιτούν πολύ λιγότερη ενέργεια τόσο για την αποστολή τους σε τροχιά, όσο και για την επίτευξη της απαιτούμενης ζεύξης με έναν επίγειο σταθμό. Τέλος, αξιοσημείωτη είναι η ευκολία που παρουσιάζει ο συνεχής εντοπισμός ενός LEO δορυφόρου με χρήση του φαινομένου Doppler, κάτι σχεδόν αδύνατο να συμβεί σε υψηλότερες τροχιές [32].

Στον αντίποδα, κάποια μειονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία των LEO δορυφόρων θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν πριν από κάθε νέα υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος επικοινωνιών. Το πρώτο και σημαντικότερο αφορά το τελικό κόστος χρήσης ενός συστήματος LEO δορυφόρων, και ο τρόπος με τον οποίο αντισταθμίζεται με το χαμηλό κόστος κατασκευής. Σε αντίθεση με ένα σύστημα GEO δορυφόρων, στο οποίο μπορεί να υπάρχει παγκόσμια κάλυψη με τη χρήση μόνο τριών δορυφόρων, στις χαμηλές τροχιές αυτό είναι αδύνατο να συμβεί. Για την πλήρη κάλυψη του πλανήτη, και ίσως για την εξυπηρέτηση ενός και μόνο σκοπού (πχ. τηλεπικοινωνίες), απαιτείται η χρήση του λεγόμενου «αστερισμού» (constellation) δορυφόρων (πχ. Iridium). Το πολύ μικρό ύψος που βρίσκεται ένας LEO δορυφόρος, προσφέρει αντίστοιχα χαμηλό line of sight. Κατά συνέπεια είναι αδύνατο να «δει» ένα μεγάλο κομμάτι επιφάνειας για αρκετό χρόνο, και σε συνδυασμό με τη μεγάλη ταχύτητα που έχει στην τροχιά του, η παροχή της εκάστοτε υπηρεσίας μπορεί να διαρκέσει για μερικά μόνο λεπτά. Με τη χρήση όμως πολλών δορυφόρων οι οποίοι βρίσκονται σε διαρκή σύνδεση ο ένας με τον άλλο, η υπηρεσία γίνεται αυτόματα hand off, χωρίς την παραμικρή διακοπή της στον χρήστη. Κατά συνέπεια, αναγκαστική χρήση πολλαπλών δορυφόρων, σημαίνει και αυτόματη αύξηση του τελικού κόστους, συνυπολογίζοντας φυσικά και το αντίστοιχο πλήθος των τερματικών σταθμών στο έδαφος.

Άλλο ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει η χρήση πολλαπλών δορυφόρων ταυτόχρονα, είναι η πολυπλοκότητα του χειρισμού και της συνολικής διαχείρισης, ούτως ώστε να υπάρχει αποτελεσματική κάλυψη. Η μεγαλύτερη δυσκολία εντοπίζεται στο σωστό συντονισμό των συχνοτήτων, καθώς οι δορυφόροι βρίσκονται συνεχώς σε κίνηση, και είναι δεδομένο πως οι γειτονικοί επικαλύπτονται γεωγραφικά μεταξύ τους σε όλη τους την πορεία. Επομένως, ο χειρισμός τους θα πρέπει να είναι πολύ προσεκτικός για την αποφυγή υποβάθμισης της υπηρεσίας.

Τέλος, σημαντικός παράγοντας κόστους είναι ο χρόνος ζωής ενός τεχνητού ουράνιου σώματος. Με μέσο όρο ζωής τα 15 χρόνια, καταλαβαίνει εύκολα κανείς πως η αναγκαία αναπλήρωση έστω και ενός μικρού μέρους του στόλου ενός αστερισμού LEO δορυφόρων σε σχετικά τακτά χρονικά διαστήματα, αυξάνει αρκετά το συνολικό κόστος, καθώς και προϋποθέτει τον προσεκτικό και προγραμματισμένο σχεδιασμό ενός νέου δορυφόρου αρκετό καιρό πριν από την πιθανή του χρήση [30],[31].

4.3 Αρχιτεκτονική δορυφορικών συστημάτων

Ένα τυπικό και ολοκληρωμένο σύστημα δορυφορικής επικοινωνίας, αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα, καθένα από τα οποία επιτελεί έναν εξίσου σημαντικό ρόλο για την πλήρη λειτουργία του συστήματος. Ονομαστικά, αυτά είναι: το διαστημικό τμήμα, το τμήμα ελέγχου, και το τμήμα εδάφους.

Το διαστημικό τμήμα αποτελείται από έναν ή περισσότερους (ενεργούς ή εφεδρικούς) δορυφόρους, οι οποίοι και σχηματίζουν αστερισμούς ώστε να παρέχουν πλήρη και διαρκή κάλυψη. Σημαντικότερο στοιχείο ενός δορυφόρου αποτελεί σαφώς το σύστημα κεραιών που διαθέτει, καθώς και οι διάφοροι αναμεταδότες, απαραίτητο στοιχείο για την επικοινωνία με το τμήμα του εδάφους. Παράλληλα όμως, για την σωστή λειτουργία ενός δορυφόρου, απαιτείται εξοπλισμός που αφορά: Την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας (κυρίως μέσω ηλιακών πάνελ), τον έλεγχο της θερμοκρασίας, τον έλεγχο θέσης και τροχιάς, την παροχή της απαιτούμενης πρόωσης, αλλά και της παρακολούθησης-τηλεμετρίας του δορυφόρου. Οι βασικότεροι τύποι κεραιάς που χρησιμοποιούνται σε ένα δορυφόρο είναι οι εξής: Κεραίες σύρματος (wire antennas) - μονοπολικές και διπολικές, κεραίες χοάνης (horn antennas), κεραίες ανακλαστήρα (reflector antennas) και μικροταινιακές κεραίες συστοιχίας (array antennas) [33],[34],[35].

Σε ό,τι αφορά το τμήμα ελέγχου, το οποίο αν και βρίσκεται στο έδαφος επιτελεί εντελώς διαφορετική λειτουργία από αυτή του τμήματος εδάφους, αποτελείται από όλα εκείνα τα συστήματα που χρησιμεύουν στον εντοπισμό και τη διαχείριση των δορυφόρων. Το τμήμα αυτό είναι γνωστό και ως TT&C (Tracking, Telemetry and Control).

Το τμήμα εδάφους αποτελεί το τελικό κομμάτι ενός δορυφορικού συστήματος. Τα τερματικά που απαρτίζουν το τμήμα εδάφους χαρακτηρίζονται από διαφορετικά μεγέθη, τα οποία αναλογούν στη φύση της εκάστοτε εφαρμογής, και είναι σχεδιασμένα για επικοινωνία με τον δορυφόρο αλλά και για διασύνδεση με τα υπόλοιπα επικοινωνιακά δίκτυα (Internet, PSTN γραμμές, κυψελωτά δίκτυα). Ένα τυπικό επίγειο τμήμα αποτελείται από:

- το RF front-end σύστημα μικροκυματικού δέκτη, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις μονάδες εκπομπής (Tx) και λήψης (Rx), καθώς και την παροχή ισχύος
- τους RF ενισχυτές

- τις μονάδες IF διαμόρφωσης - αποδιαμόρφωσης
- το σύστημα επεξεργασίας σήματος

Όπως είναι όμως λογικό, το σημαντικότερο στοιχείο του επίγειου δορυφορικού τμήματος είναι οι κεραίες που χρησιμεύουν στην αποστολή και τη λήψη των σημάτων. Μία κεραία εδάφους μπορεί να έχει μέγεθος ανοίγματος από μερικά εκατοστά (περίπου 50) έως μερικά μέτρα (περίπου 15). Σε περιπτώσεις μάλιστα όπου τα τερματικά βρίσκονται αυτούσια στο μέρος του χρήστη (πχ. κινητές συσκευές), το μέγεθος των κεραιών περιορίζεται σε πολύ λίγα εκατοστά. Εξίσου σημαντικό είναι και το σύστημα παρακολούθησης, του οποίου οι απαιτούμενες επιδόσεις ποικίλλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της δέσμης της κεραίας και της δορυφορικής τροχιάς. Βασικός στόχος είναι η διατήρηση της ζεύξης με τον δορυφόρο στο μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό ποιότητας και χρόνου [34],[35].

4.4 Δορυφορικά συστήματα LEO

Οι σύγχρονες ανάγκες στην τεχνολογία, τις επικοινωνίες, αλλά και στο μεγαλύτερο πλέον ποσοστό κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας, καταδεικνύουν την ανάγκη προσφοράς υπερ-υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, σε συνεχή και αδιάκοπη βάση. Είναι αξιοσημείωτο δε, πως εν έτη 2018, ο πληθυσμός της Γης που έχει πρόσβαση σε ευρυζωνικές επικοινωνίες δεν ξεπερνά το 50%. Το ομολογουμένως δυσάρεστο αυτό γεγονός, έρχεται να εξαλείψει η ολοένα και αυξανόμενη χρήση των δορυφορικών συστημάτων LEO τεχνολογίας, καθώς το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η παροχή πολύ υψηλού throughput σε συνδυασμό με πολύ μικρή καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων. Ακόμα και στα ήδη τεχνολογικά ανεπτυγμένα μεγάλα αστικά κέντρα, η χρήση LEO δορυφόρων προσφέρει ποιοτικότερη κάλυψη σε σχέση με τους GEO δορυφόρους, καθώς η συνεχής τους κίνηση, η ύπαρξη παραπάνω του ενός δορυφόρου σε σχετικά μικρή επιφάνεια του εναέριου χώρου, αλλά και οι μεγάλες γωνίες ανύψωσης που είναι δυνατό να έχουν, εξαλείφουν τις δυσκολίες που εμφανίζει στη μετάδοση σημάτων η πυκνή δόμηση και η ύπαρξη αρκετών ψηλών κτιρίων.

Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί οι εξής τρεις βασικές κατηγορίες LEO δορυφόρων [36],[37]:

1. **LITTLE-LEO CONSTELLATIONS:** Αποτελείται από δορυφόρους αρκετά μικρού μεγέθους και βάρους (150 kg μέγιστο), και χαρακτηρίζεται από τις σχετικά χαμηλές συχνότητες λειτουργίας (<1 GHz), και τις πολύ μικρές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων (περίπου 1-2 kb/s). Για τον λόγο αυτό, οι δορυφόροι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή, δεν χρησιμοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών φωνής, παρά μόνο για υπηρεσίες μετάδοσης μηνυμάτων (messaging, paging, e-mail), αλλά και υπηρεσίες εντοπισμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι τα συστήματα Orbcomm και LEO One, τα οποία και λειτουργούν σε ύψος περίπου 900 km.
2. **BIG-LEO CONSTELLATIONS:** Για την κάλυψη αναγκών που αφορούν τη μετάδοση φωνής και δεδομένων, χρησιμοποιούνται οι BIG-LEO αστερισμοί δορυφόρων, οι οποίοι απαρτίζονται από δορυφόρους μεγαλύτερου μεγέθους, και έχουν τη δυνατότητα παροχής μεγαλύτερου bandwidth. Αυτό οφείλεται στη συχνότητα λειτουργίας τους, η οποία είναι περίπου 1.610-1.626 GHz για το uplink, και 2.483-2.5 GHz για το downlink. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας, είναι το σύστημα Iridium. Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το σύστημα Iridium αποτελείται από 66 ενεργούς δορυφόρους, οι οποίοι ακτινοβολούν στην L-Band, και βρίσκονται σε τροχιά περίπου 780 km πάνω από την επιφάνεια της Γης. Εξίσου σημαντικό δορυφορικό σύστημα αυτής της κατηγορίας, είναι το GLOBALSTAR, το οποίο είναι υλοποιημένο από την Alcatel και την Qualcomm, και αποτελείται από 48 δορυφόρους σε τροχιά ύψους 1378 km.
3. **BROADBAND-LEO CONSTELLATIONS:** Η τρίτη αυτή κατηγορία, αφορά αστερισμούς δορυφόρων, σχεδιασμένοι να παρέχουν υπηρεσίες που απαιτούν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, όπως Internet, video, και video conference. Η συχνότητα εκπομπής τους βρίσκεται στην Ku-Band (12-18 GHz), και είναι δυνατό να προσφέρουν ταχύτητες 20000 kbps στο downlink, και 2000 kbps στο uplink. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας, είναι το σύστημα Skybridge. Αυτό, αποτελείται από 80 δορυφόρους (τέσσερις δορυφόροι σε κάθε ένα από 20 τροχιακά επίπεδα), με ύψος τροχιάς τα 1469 km, και κλίση 53°.

4.5 Επίγειο τμήμα LEO συστήματος

Βασικό χαρακτηριστικό των LEO δορυφόρων, με αρνητικές κυρίως επιπτώσεις, είναι πως λόγω της μεγάλης τους τροχιακής ταχύτητας, είναι ορατοί σε έναν τοπικό παρατηρητή (ή έναν επίγειο σταθμό πιο συγκεκριμένα) για ένα αρκετά μικρό χρονικό διάστημα. Συνεπώς, το επίγειο τμήμα ενός LEO δορυφορικού συστήματος, είναι δυνατό (έως και απαραίτητο) να απαρτίζεται από περισσότερους από έναν επίγειους σταθμούς, ούτως ώστε να διατηρεί απρόσκοπτη επικοινωνία με το διαστημικό τμήμα. Όπως όμως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σημαντικότερο στοιχείο ενός επίγειου σταθμού, δεν είναι άλλο από το σύστημα κεραιών που διαθέτει.

Οι κεραιές αυτές, μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες με βάση το κέρδος που παρουσιάζουν συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας τους. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε κεραιές χαμηλού σχετικά κέρδους (έως 4 dBi), οι οποίες ακτινοβολούν σε χαμηλές συχνότητες (πχ. L-Band), και εμφανίζουν ομοιοκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Μάλιστα, το μέγεθός τους μπορεί να είναι αρκετά μικρό, οδηγώντας ακόμα και σε χρήση κινητών κατασκευών. Η δεύτερη αφορά κεραιές μεσαίου κέρδους (4-16 dBi), σχεδόν κατευθυντικές. Η τρίτη, περιλαμβάνει κεραιές υψηλού κέρδους (>16 dBi) που εμφανίζουν διαγράμματα ακτινοβολίας υψηλής κατευθυντικότητας και στενό λοβό ακτινοβολίας, και λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες (πχ. S-Band) [36],[37].

Για την επίτευξη λοιπόν υψηλού κέρδους με στόχο την επικοινωνία σε συχνότητες της S-Band (αντικείμενο της παρούσας εργασίας), απαιτείται η δημιουργία ενός κατευθυντικού διαγράμματος ακτινοβολίας προς τον LEO δορυφόρο με στόχο την απρόσκοπτη επικοινωνία, γεγονός που προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιων πολύ βασικών συνθηκών. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

- Η χρήση ενός αρκετά ακριβούς, είτε μηχανικά είτε ηλεκτρονικά, συστήματος εντοπισμού του LEO δορυφόρου ο οποίος κινείται με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες.
- Χαμηλή κατευθυντικότητα οπουδήποτε αλλού, και ιδίως σε γειτονικούς δορυφόρους, για την αποφυγή παρεμβολών.
- Υψηλή αποδοτικότητα της κεραιάς σε συνδυασμό με όσο δυνατό χαμηλότερη θερμοκρασία θορύβου.

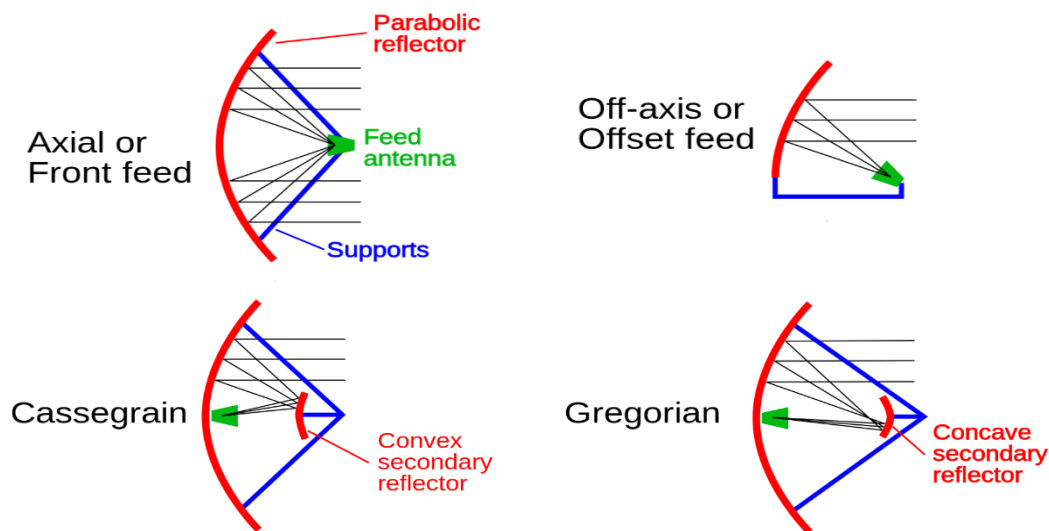
- Υψηλή ανοχή σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες (αέρας, βροχή, πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες).

Ο πιο χαρακτηριστικός τύπος κεραίας που χρησιμοποιείται στο επίγειο τμήμα ενός LEO δορυφορικού συστήματος είναι ο λεγόμενος Parabolic Dish (Reflector) Antenna. Ο συγκεκριμένος τύπος κεραίας παρουσιάζεται σε δύο διαφορετικές μορφές εξίσου σημαντικές. Η πρώτη αφορά στη χρήση ενός μόνο ανακλαστήρα (ή αλλιώς «πιάτου»), με την κύρια κεραία τροφοδοσίας να εμφανίζεται στο σημείο εστίασης στο μπροστινό μέρος του ανακλαστήρα. Μάλιστα, η κεραία τροφοδοσίας μπορεί να βρίσκεται είτε πάνω στον κεντρικό άξονα του ανακλαστήρα (front-fed) είτε στο κατώτατο σημείο της διαμέτρου του (off-axis). Και στις δύο περιπτώσεις, τα λαμβανόμενα σήματα συγκεντρώνονται στην κεραία τροφοδοσίας ανακλώμενα από το «πιάτο». Ο δεύτερος σημαντικός τύπος επίγειας κεραίας προϋποθέτει τη χρήση δύο (ή και περισσότερων) ανακλαστήρων, παρουσιάζοντας τρόπο λειτουργίας όμοιο με αυτόν των τηλεσκοπίων [37].

Και οι δύο αυτές περιπτώσεις εμφανίζουν κάποια πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά. Χάρης στην κυρτότητα του ανακλαστήρα, όλα τα κύματα ανακλώνται στην ίδια ακριβώς κατεύθυνση από και προς την εστία της κεραίας. Παράλληλα, οι διαφορετικές συνιστώσες της ακτινοβολίας βρίσκονται σε φάση, καθώς τα κύματα που προσπίπτουν στον ανακλαστήρα ακολουθούν ισομήκεις δρόμους από και προς αυτόν. Συνεπώς, εύκολα καταλαβαίνει κανείς πως οι κεραίες παραβολικού ανακλαστήρα χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλή κατευθυντικότητα και περιορισμένο εύρος δέσμης (beamwidth).

Σημαντικά όμως είναι και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση ανακλαστήρα, ενός ή παραπάνω. Κυριότερο είναι το μπλοκάρισμα της ακτινοβολίας που προκαλείται από την κεραία τροφοδοσίας και τη δομή υποστηρίξης της που καλύπτει ένα μέρος του δίσκου, παρεμποδίζοντας εν μέρει τον «φωτισμό» του. Συνέπεια αυτού, είναι η μείωση της απόδοσης της κεραίας, αλλά και η ενίσχυση των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας. Επίσης, αρκετά συχνή είναι η μείωση της αποδοτικότητας της κεραίας εξαιτίας των φυσικών ανωμαλιών που εντοπίζονται στην επιφάνεια του ανακλαστήρα. Μία όχι τέλεια επιφάνεια παραβολής, μπορεί να προκαλέσει διαφοροποίηση φάσης στα διαφορετικά κύματα της ακτινοβολίας, μειώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση.

Παράλληλα, λόγω του εξαιρετικά μεγάλου μεγέθους τους, η χρήση ανακλαστήρων καθίσταται ιδιαίτερα περίπλοκη σε ό,τι αφορά τη μεταφορά του εξοπλισμού, τη συναρμολόγηση και την τελική εγκατάσταση, γεγονός που επηρεάζει αντίστοιχα και τα υπόλοιπα στοιχεία των διατάξεων, όπως ο μηχανισμός στήριξης των κεραιών. Μάλιστα, το μέγεθος αυτό, δύναται να επηρεάσει αρνητικά και τη λειτουργία της μηχανικής παρακολούθησης που αφορά τον εντοπισμό των δορυφόρων, καθώς το βάρος της κεραίας οδηγεί σε εξαιρετικά αργή και χαμηλής ποιότητας στόχευση, ιδιαίτερα σε όχι τόσο ευνοϊκές καιρικές συνθήκες.



Σχήμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση των διαφορετικών τύπων ανακλαστήρα στο επίγειο τμήμα – Χρήση μονού ανακλαστήρα με front-fed ή off-axis μορφή τροφοδοσίας (πάνω) Χρήση διπλού ανακλαστήρα με επιλογή παραβολικού είτε υπερβολικού δεύτερου κατόπτρου (κάτω)

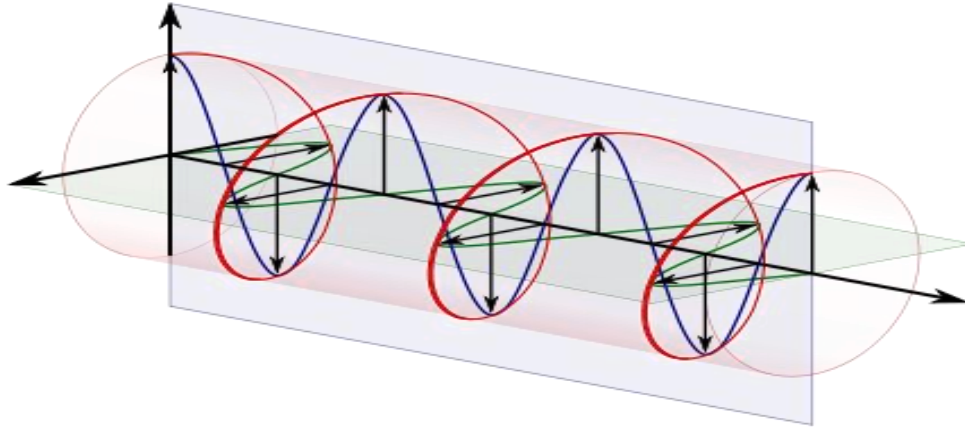
Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Cassegrain_antenna

4.6 Η κυκλική πόλωση στο επίγειο τμήμα LEO συστήματος

Σε περιβάλλοντα πολλαπλής διάδοσης και ανακλάσεων, όπως συμβαίνει κατά κύριο λόγο σε πραγματικές και καθημερινές συνθήκες, ενδείκνυται η χρήση κυκλικής και όχι γραμμικής πόλωσης στα ακτινοβόλα στοιχεία του επίγειου δορυφορικού τμήματος. Οι σημαντικότεροι λόγοι που απαιτούν τη χρήση κυκλικής πόλωσης είναι οι εξής [38]:

1. Φαινόμενο Faraday: Το φαινόμενο Faraday αφορά την αλληλεπίδραση μεταξύ φωτός και μαγνητικών πεδίων. Επηρεάζει τα γραμμικά και όχι τα κυκλικά πολωμένα σήματα, κάτι που εμφανίζεται περισσότερο σε χαμηλότερες συχνότητες, όπως η C-Band. Καθώς τα σήματα περνούν από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, δηλαδή την ιονόσφαιρα, καταλήγουν να χάνουν την αρχική τους πολικότητα εξαιτίας της διακύμανσης της πυκνότητας των ηλεκτρονίων στη συγκεκριμένη περιοχή. Σε περιπτώσεις μάλιστα όπου το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου του μεταδιδόμενου σήματος είναι σχεδόν κάθετο σε σχέση με τη γραμμική πολικότητα που αναμένει ο δορυφορικός δέκτης, τότε το σήμα δεν μπορεί να ληφθεί επιτυχώς. Η χρήση όμως κυκλικής πόλωσης στο μεταδιδόμενο κύμα εξαλείφει το παραπάνω αρνητικό φαινόμενο ακόμη και αν αυτό υποστεί κάποιου είδους παραμόρφωσης πολικότητας.
2. Ατμοσφαιρικές συνθήκες: Η κυκλική πόλωση είναι αρκετά πιο ανθεκτική στην υποβάθμιση του σήματος λόγω των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Ένα σήμα υψηλής συχνότητας και γραμμικής πόλωσης, είναι πολύ πιθανό να υποστεί εξασθένηση λόγω βροχής σε ό,τι αφορά κυρίως την πολικότητά του. Μάλιστα, ακόμη και στην περίπτωση που το σήμα περνάει απλώς μέσα από σύννεφα, η εκεί υφιστάμενη υγρασία μπορεί να προκαλέσει εξασθένηση μέχρι και 1dB.
3. Υψηλή διαθεσιμότητα ζεύξης: Χάρης στην πολύ μικρή πιθανότητα εξασθένησης του σήματος κυρίως λόγω ατμοσφαιρικών παρεμβολών, αλλά και στην ευκολία που παρουσιάζει η μηχανική εγκατάσταση της κεραίας, καθώς το μόνο που απαιτείται είναι η στόχευση στο επιθυμητό ουράνιο σημείο χωρίς να είναι απαραίτητη η πλήρης ευθυγράμμιση διαστημικού και επίγειου τμήματος, η ζεύξη παραμένει ενεργή και αξιόπιστη για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με εκείνη που χρησιμοποιεί γραμμική ή οποιαδήποτε άλλη μορφή πόλωσης.

Η κυκλική πόλωση προϋποθέτει την ύπαρξη δύο συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου, οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους, έχουν ίσα μέτρα και διαφορά φάσης 90° . Θεωρώντας δηλαδή τις δύο συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου $E_{ox} = |E_{ox}|e^{j\varphi_x}$ και $E_{oy} = |E_{oy}|e^{j\varphi_y}$, όπου $|E_{ox}|$ και $|E_{oy}|$ τα μέτρα των δύο συνιστωσών, j το μιγαδικό στοιχείο, και φ_x, φ_y οι φάσεις αυτών με $\varphi_x = \varphi_y + \frac{\pi}{2}$, τότε το μέγεθος λεγόμενο και Axial Ratio ($AR = \frac{E_{ox}}{E_{oy}}$) (4.1) ισούται με 1 ή 0 dB.



Σχήμα 4.5 Σχηματική αναπαράσταση των δύο κάθετων συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου και της κυκλικής πόλωσης που δημιουργούν κατά το ταξίδι τους στον ελεύθερο χώρο

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω αξιώσεις, αλλά και τις δυσκολίες που εμφανίζει η χρήση των συμβατικών παραβολικών κεραιών στο επίγειο τμήμα ενός δορυφορικού συστήματος, κρίνεται αναγκαία πλέον η χρήση μικροταινιακών κεραιών (σε μορφή συστοιχίας), οι οποίες με βάση τα αναρίθμητα πλεονεκτήματά τους (όπως αυτά αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο), δύνανται να προσφέρουν πολύ σημαντικά και θετικά αποτελέσματα στις δορυφορικές επικοινωνίες. Πιο συγκεκριμένα, η δυνατότητα της ηλεκτρονικής σάρωσης που μπορεί να προσφέρει μία συστοιχία μικροταινιακών κεραιών είναι εξαιρετικά αποδοτική σε οποιοδήποτε συνθήκες. Σημαντικότερη όμως, μπορεί να χαρακτηριστεί η ευκολία που παρουσιάζει η κατασκευή και συναρμολόγηση μιας διάταξης συστοιχίας μικροταινιακών κεραιών, λόγω του αρκετά περιορισμένου μεγέθους του κάθε στοιχείου, όπως και η συνολικότερη απόδοση μιας τέτοιας διάταξης σε ό,τι αφορά το συνολικό κέρδος, το bandwidth αλλά και την ποιότητα της πόλωσης.

Μάλιστα, αναφορικά με την επίτευξη κυκλικής πόλωσης, αυτή επιτυγχάνεται εύκολα με τη διέγερση δύο ξεχωριστών ρυθμών της κεραίας, δίνοντας τους διαφορά φάσης 90° . Υπάρχουν δε, δύο κυρίως τεχνικές τροφοδοσίας αλλά και ακόμη περισσότερες επιλογές σχημάτων του μεταλλικού ακτινοβόλου επιθέματος, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν την επιθυμητή αυτή πόλωση. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, όπου και παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα διαφόρων υλοποιήσεων μικροταινιακών κεραιών κυκλικής πόλωσης, με σκοπό τη βέλτιστη σχεδίαση ενός (ή και παραπάνω) μοντέλου, ικανό για χρήση στο επίγειο τμήμα ενός δορυφορικού συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Για τη σχεδίαση της μικροταινιακής κεραίας κυκλικής πόλωσης, χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτρομαγνητικός προσομοιωτής CST™ (Παράρτημα), ο οποίος προσφέρει τη δυνατότητα επίλυσης των εξισώσεων του Maxwell ως προς το πεδίο του χρόνου. Στη συνέχεια, με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier, τα παραχθέντα αποτελέσματα εκφράζονται αντίστοιχα στο πεδίο της συχνότητας, προσφέροντας έτσι την επιθυμητή λύση.

Για την επίτευξη της βέλτιστης σχεδίασης, υλοποιήθηκαν αρκετές παραλλαγές μιας μικροταινιακής κεραίας, με σκοπό την κάλυψη όλων των δυνατών περιπτώσεων που θα μπορούσαν να προσφέρουν το ιδανικό αποτέλεσμα στη ζητούμενη συχνότητα των 3 GHz. Συνεπώς, παρουσιάζονται ακολούθως οι κυριότερες εκ των υλοποιήσεων, ξεκινώντας από μία τυπική μορφή μικροταινιακής κεραίας κυκλικής πόλωσης, και καταλήγοντας σε μία αρκετά περίπλοκη κατασκευή, η οποία όμως παρουσιάζει εξαιρετικές επιδόσεις, κυρίως σε ό,τι αφορά την ποιότητα της ζητούμενης πόλωσης.

5.2 Μικροταινιακή κεραία τετραγωνικού επιθέματος (patch) με σχισμή στη διαγώνιό του

Η πρώτη υλοποίηση αφορά μικροταινιακή κεραία κυκλικής πόλωσης, η οποία αποτελείται από ένα επίπεδο γείωσης, ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα, και ένα ορθογώνιο μεταλλικό επίθεμα στο πάνω μέρος, το οποίο όμως φέρει μία ορθογώνια σχισμή στη διαγώνιό του. Σε ό,τι αφορά τη μέθοδο τροφοδοσίας της κεραίας, χρησιμοποιείται ένας τυπικός ομοαξονικός συνδετήρας, στη βάση του οποίου γίνεται χρήση μιας θύρας κυματοδηγού (waveguide port) (σχήμα 5.1 & 5.2).

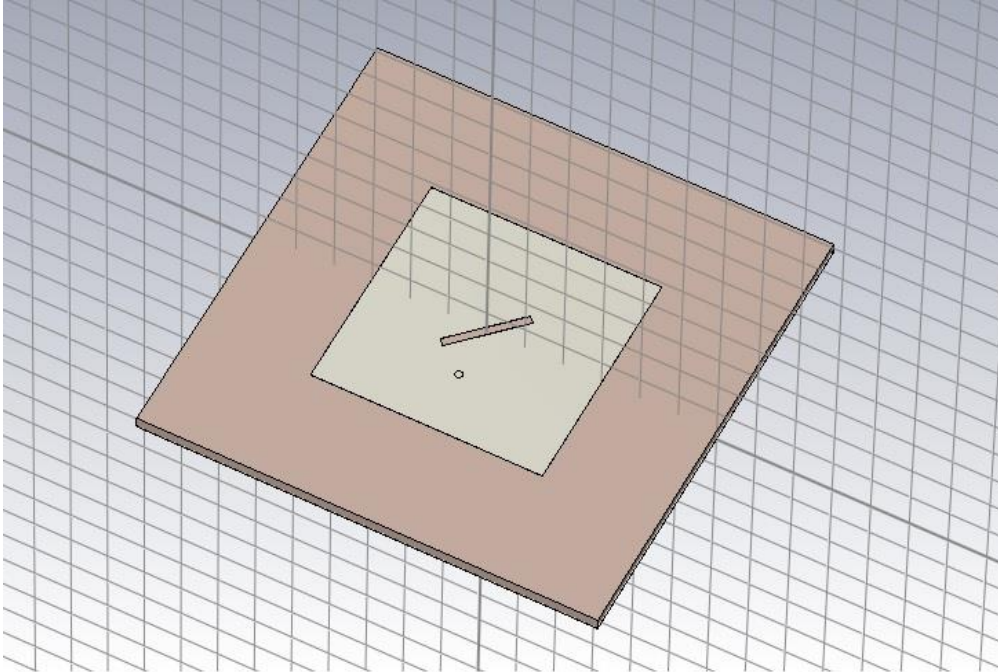
5.2.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις

Το μεταλλικό επίθεμα αλλά και το επίπεδο γείωσης αποτελούνται από ένα πολύ λεπτό στρώμα πάχους 0.035 mm ενός τέλει ηλεκτρικού αγωγού (PEC – Perfect Electric Conductor). Για την κατασκευή του υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα RT5870 από την Rogers, με πάχος στα 1.575 mm, και επιφανειακές διαστάσεις 60 mm x 60 mm, οι οποίες όμως δεν επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα. Σε ό,τι αφορά τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού, αυτό παρουσιάζει διηλεκτρική σταθερά ίση με 2.33 και εφαπτομένη απωλειών 0.0012. Πολύ σημαντικές για το τελικό αποτέλεσμα είναι και οι διαστάσεις της επιφάνειας του επιθέματος. Αυτές είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την συχνότητα εκπομπής της κεραίας όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, καθιστώντας τον υπολογισμό τους αρκετά σημαντικό. Ωστόσο η χρήση των σχέσεων 3.1 και 3.2 αποτελεί το σημείο εκκίνησης, καθώς αφορούν ένα τυπικό ορθογώνιο επίθεμα, χωρίς κάποια «ανωμαλία» στην επιφάνειά του. Αντίθετα, στη συγκεκριμένη σχεδίαση, εισάγεται μία ορθογώνια σχισμή στη διαγώνιο του επιθέματος για τη δημιουργία της κυκλικής πόλωσης. Συνεπώς, οι βέλτιστες διαστάσεις θα υπολογιστούν καθαρά πρακτικά κατά τη διάρκεια της σχεδίασης μελετώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Οι βέλτιστες τελικές διαστάσεις του επιθέματος που προέκυψαν από τις διάφορες δοκιμές είναι 30.6 mm x 30.6 mm. Επίσης η ορθογώνια σχισμή της διαγωνίου έχει διαστάσεις 11 mm x 0.5 mm, τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από τη χρήση των ακόλουθων σχέσεων με μικρή απόκλιση [6]:

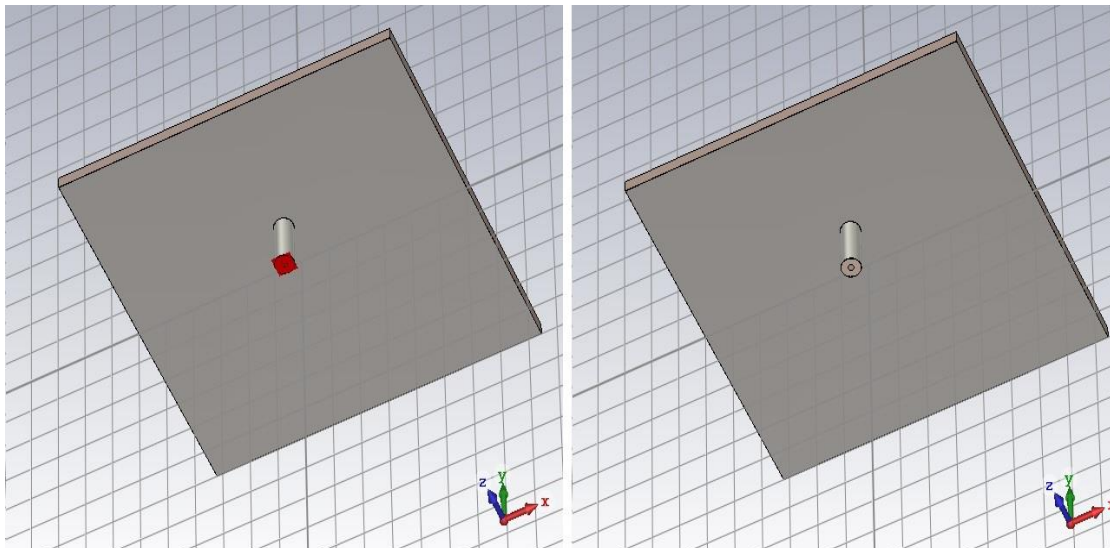
$$c = L/2.72 = W/2.72 \text{ και } d = c/10.$$

Σε ό,τι αφορά τον ομοαξονικό συνδετήρα, ο υπολογισμός των διαστάσεών του έγινε μέσω του προγράμματος, και συγκεκριμένα εκτελώντας την εντολή *Macros – Calculate – Calculate analytical Line Impedance* (σχήμα 5.3), καθώς έτσι προκύπτουν οι σωστές διαστάσεις ώστε ο συνδετήρας να παρουσιάζει σύνθετη αντίσταση 50 Ω. Ο συνδετήρας λοιπόν, αποτελείται από ένα μεταλλικό pin ακτίνας 0.5 mm το οποίο ξεκινά από τη βάση του, και φτάνει έως το επίθεμα στην επιφάνεια. Γύρω από αυτό, υπάρχει ένας κύλινδρος πάχους 1.174 mm και ύψους 8 mm (έως το διηλεκτρικό υπόστρωμα), ο οποίος και αποτελεί το κύριο σώμα του συνδετήρα. Το υλικό από το οποίο αποτελείται είναι το Teflon, ένα αρκετά αγωγίμο υλικό με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 2.1$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0.0002$. Για την κάλυψή του χρησιμοποιείται ένα λεπτό στρώμα μετάλλου (PEC).

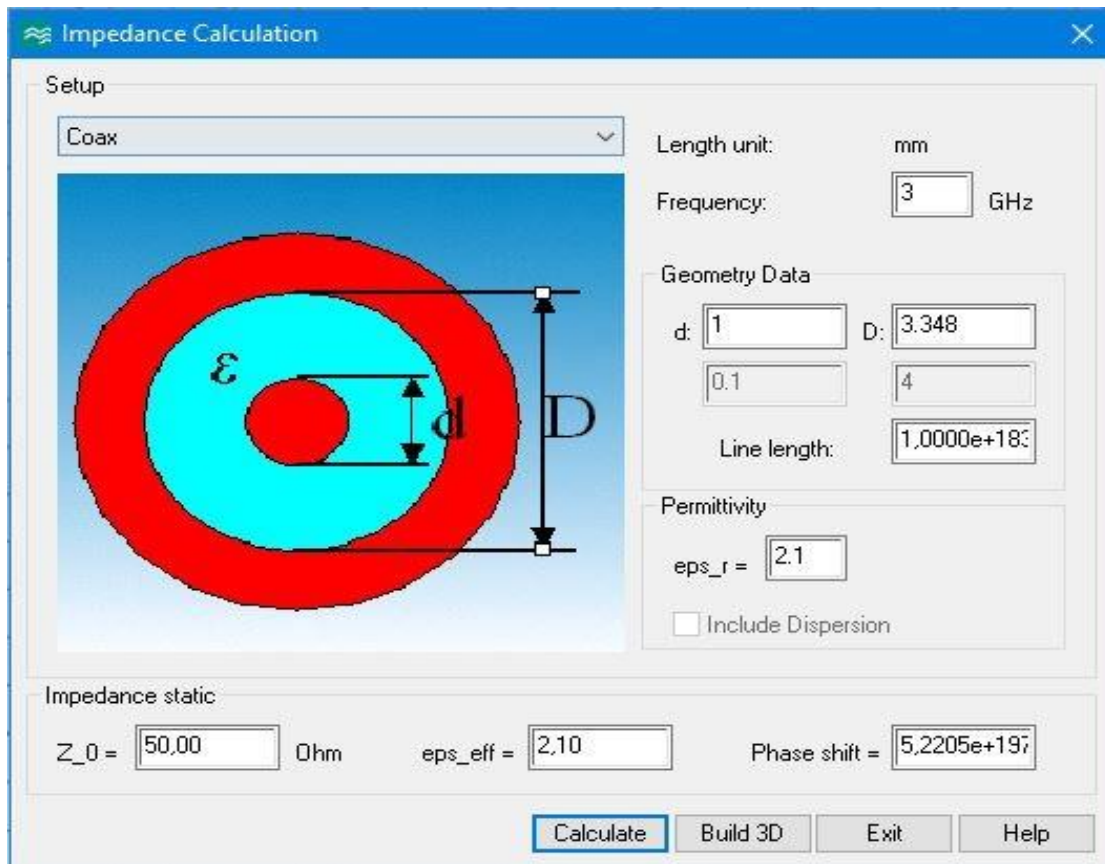
Τέλος, για την παροχή της ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε μία θύρα κυματοδηγού (waveguide port) στη βάση του συνδετήρα. Οι τιμές όλων των παραμέτρων που είναι απαραίτητες για τη σχεδίαση της κεραίας, παρατίθενται στον πίνακα 5.1.



Σχήμα 5.1 Μπροστινή όψη της κεραίας - Διακρίνεται το διηλεκτρικό υπόστρωμα και πάνω σε αυτό το τετραγωνικό επίθεμα με την ορθογώνια σχισμή στη διαγώνιό του



Σχήμα 5.2 Οπίσθια όψη της κεραίας - Διακρίνεται η δομή του ομοαξονικού συνδετήρα με και χωρίς τη θύρα κυματοδηγού



Σχήμα 5.3 Υπολογισμός διαστάσεων του ομοαξονικού συνδετήρα μέσω του προγράμματος τηρώντας την απαίτηση της σύνθετης αντίστασης των 50 Ω

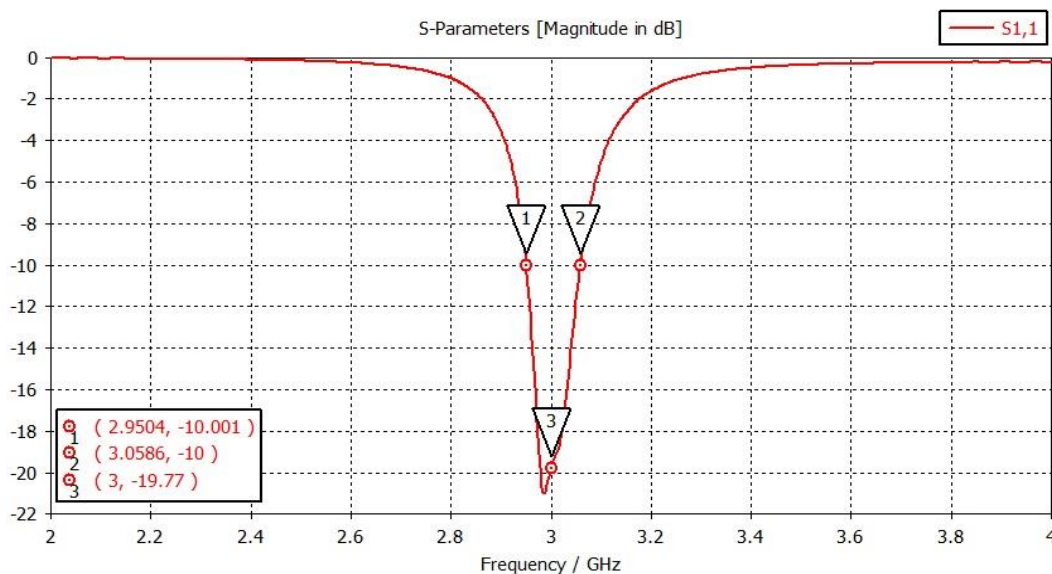
Τιμές Παραμέτρων	
Μήκος/Πλάτος υποστρώματος	60 mm
Πάχος υποστρώματος	1.575 mm
Μήκος/Πλάτος επιθέματος	15.3 mm
Πάχος επιθέματος/επιπέδου γείωσης	0.035 mm
Διάμετρος pin	1 mm
Πάχος κυλίνδρου συνδετήρα	1.174 mm
Μήκος κυλίνδρου συνδετήρα	8 mm
Μήκος σχισμής	11 mm
Πάχος σχισμής	0.5 mm
Απόσταση pin από πλευρά πλάτους	8.5 mm

Πίνακας 5.1 Τιμές παραμέτρων σχεδίασης των επιμέρους στοιχείων της κεραίας

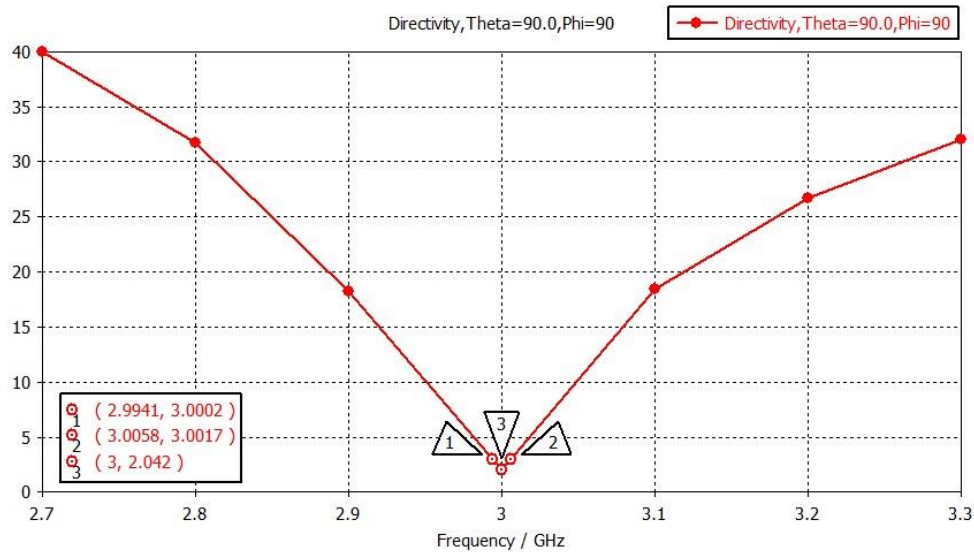
5.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Όπως είναι φυσικό, χρειάστηκε να γίνουν αρκετές αλλαγές στις παραμέτρους ώστε να προκύψουν τα βέλτιστα αποτελέσματα στην απόδοση της κεραίας. Αυτά βασίστηκαν στις ανωτέρω τελικές τιμές και παρουσιάζονται ακολούθως. Αξίζει εδώ να σημειωθεί, πως η επίτευξη του βασικού στόχου που είναι η κυκλική πόλωση, οφείλεται στην παρουσία της σχισμής στην διαγώνιο του επιθέματος, καθώς η φυσική ασυνέχεια που προκαλεί στην επιφάνεια αυτού, εξαναγκάζει το ρεύμα που προέρχεται από την ομοαξονική δίοδο να ακολουθήσει δύο διαφορετικές διαδρομές με διαφορά φάσης περίπου 90° , δημιουργώντας έτσι δύο σχεδόν κάθετες συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, και φτάνοντας έτσι στην επιθυμητή πόλωση.

Αρχικά, από το διάγραμμα της παραμέτρου S_{11} (σχήμα 5.4) παρατηρείται ικανοποιητική απορρόφηση της τροφοδοτούμενης ενέργειας, καθώς το ποσοστό που ανακλάται στην επιθυμητή συχνότητα είναι αρκετά κάτω από 10% (περίπου -20 dB, δηλαδή 1%). Παράλληλα, το συχνοτικό φάσμα λειτουργίας (bandwidth) υπολογίζεται σε 108.2 MHz, ή σε ποσοστό 3.6%, τιμή αρκετά αποδεκτή. Σε ό,τι αφορά την ποιότητα της κυκλικής πόλωσης, αυτή παρατηρείται στο Axial Ratio διάγραμμα (σχήμα 5.5), που όπως ειπώθηκε στο κεφάλαιο 4 και φάνηκε από την σχέση 4.1, η τιμή του διαγράμματος θα πρέπει να αγγίζει τα 0 dB ιδανικά. Καθώς όμως αυτό είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί, θεωρείται πως μια τιμή κάτω των 3 dB είναι αρκούντως ικανοποιητική. Από το σχήμα προκύπτει η τιμή 2.042 dB με ένα 3-dB bandwidth της τάξης του 0.39%.

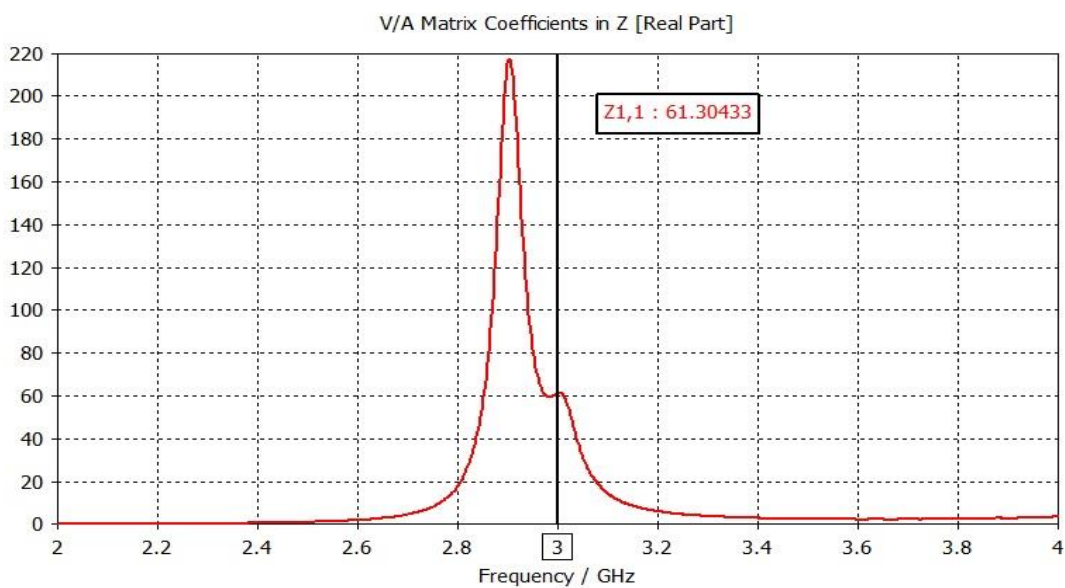


Σχήμα 5.4 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}

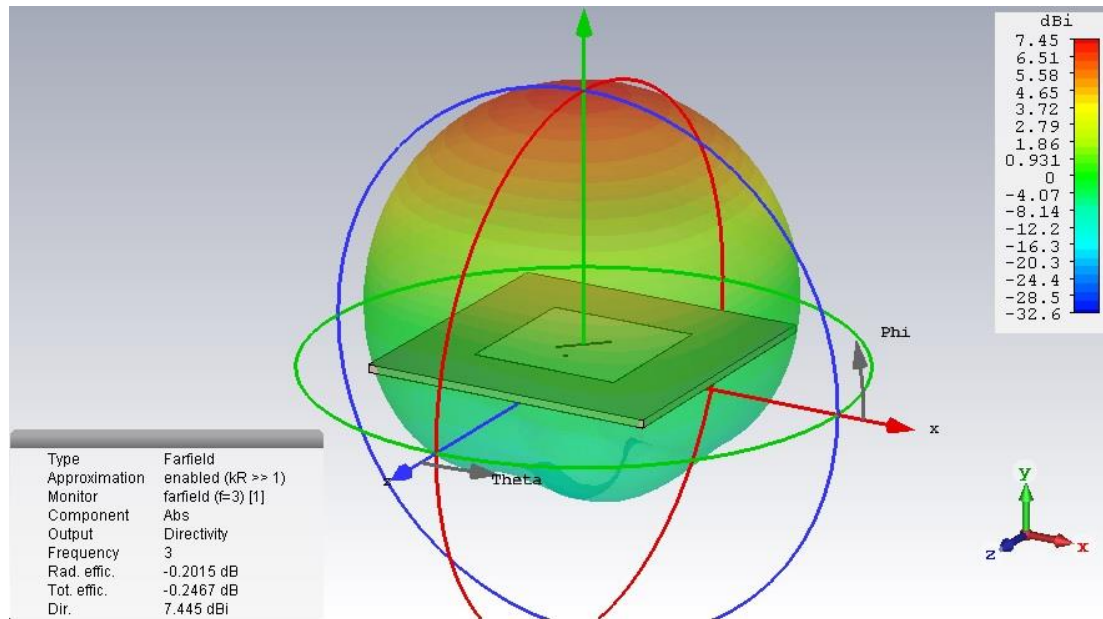


Σχήμα 5.5 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα

Πολύ σημαντικά είναι και τα αποτελέσματα που αφορούν την τιμή της σύνθετης αντίστασης καθώς φανερώνουν την ποιότητα λειτουργίας της. Το ακόλουθο διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (σχήμα 5.6), δείχνει μια σχετικά καλή προσαρμογή της κεραίας, καθώς η τιμή των 61.3 Ω δεν απέχει πολύ από την επιθυμητή τιμή των 50 Ω. Για την κατανόηση δε του τρόπου ακτινοβολίας της κεραίας, παρατίθεται το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της στο μακρινό πεδίο (σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης



Σχήμα 5.7 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας

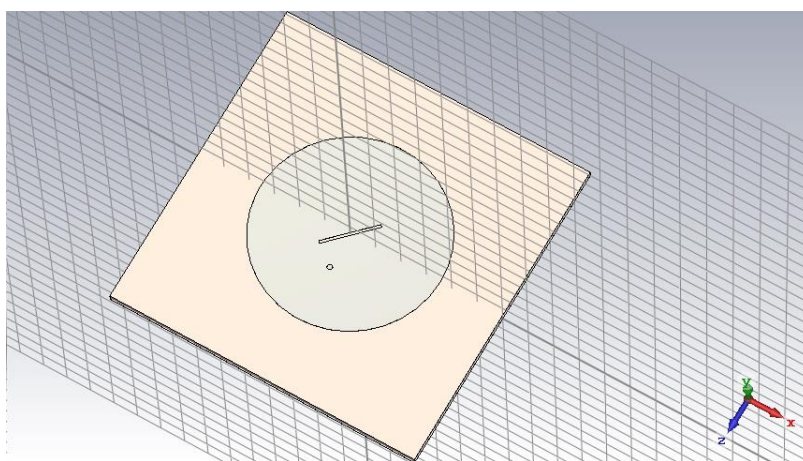
Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, και κυρίως αυτό της τιμής της ποιότητας της κυκλικής πόλωσης (Axial Ratio), καθίσταται απαραίτητη η ανάγκη για περαιτέρω βελτίωσή τους, οδηγώντας έτσι σε διαφορετικές υλοποιήσεις.

5.3 Μικροταινιακή κεραία κυκλικού επιθέματος με σχισμή σε μία διάμετρό του

Η δεύτερη σχεδίαση, εμπεριέχει μία μόνο βασική τροποποίηση σε σχέση με την ανωτέρω, και αφορά τη χρήση κυκλικού επιθέματος αντί του ορθογωνίου. Μάλιστα, τα βέλτιστα αποτελέσματα της συγκεκριμένης υλοποίησης προκύπτουν με ακριβώς τις ίδιες τιμές των παραμέτρων, με τη μόνη διαφορά φυσικά να υπάρχει στο επίθεμα, όπου εδώ χρησιμοποιείται ένα κυκλικού σχήματος.

5.3.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις

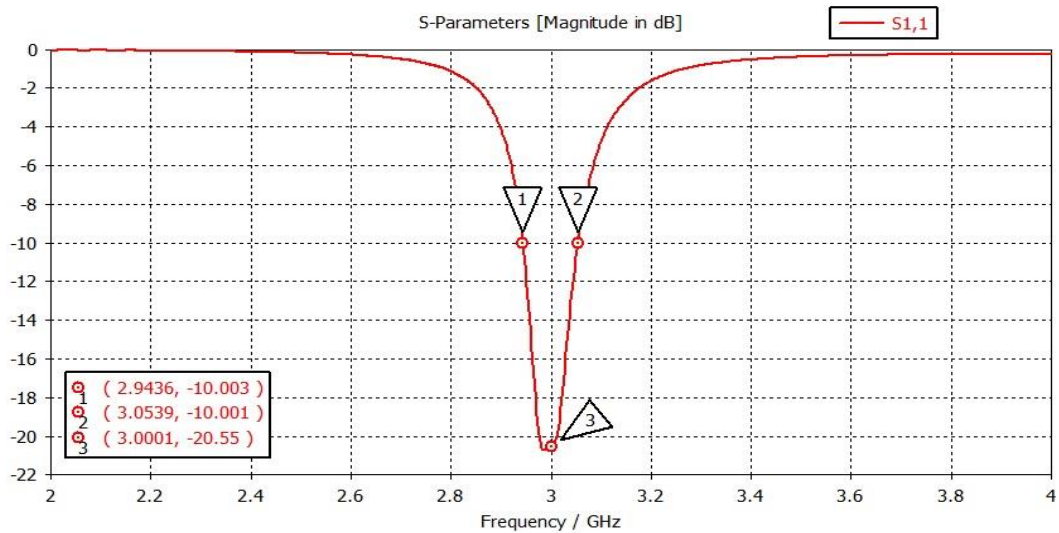
Όπως προαναφέρθηκε λοιπόν, για τη σχεδίαση της συγκεκριμένης κεραίας χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο το σχέδιο της παραπάνω σχεδίασης, αντικαθιστώντας όμως το τετραγωνικό επίθεμα με ένα κυκλικό ακτίνας 18 mm. Αντίστοιχα, η σχισμή βρίσκεται πάνω σε μία από τις διαμέτρους του κύκλου, η οποία σχηματίζει γωνία 45° με τη νοητή διάμετρο που τέμνει την κορυφή του pin (σχήμα 5.8).



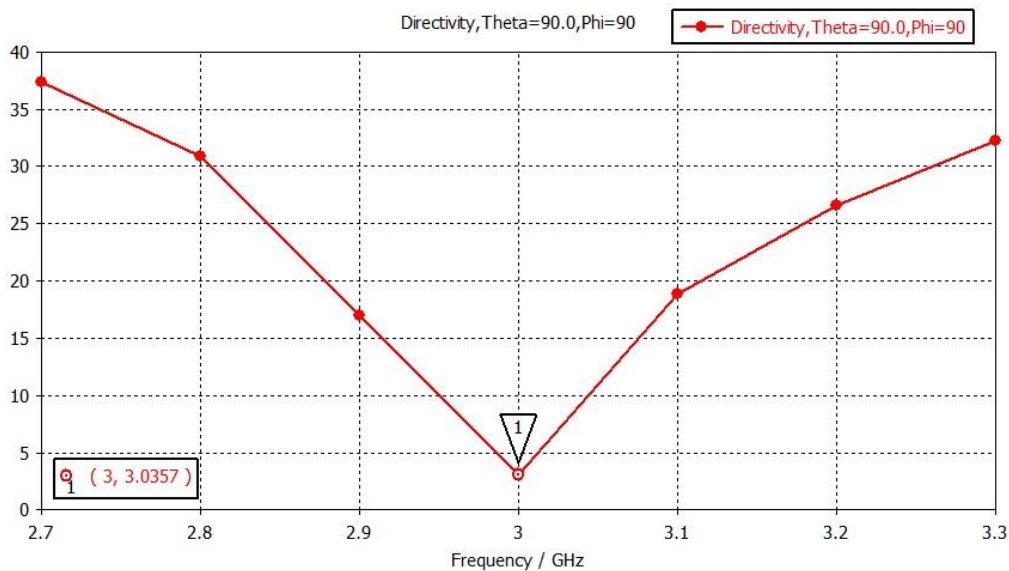
Σχήμα 5.8 Μπροσινή όψη της κεραίας - Διακρίνεται το διηλεκτρικό υπόστρωμα και πάνω σε αυτό το κυκλικό επίθεμα με την ορθογώνια σχισμή σε μια διάμετρό του

5.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Όπως στην υλοποίηση με το τετραγωνικό patch, έτσι και εδώ, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζουν θετικό πρόσημο, γεγονός που καταδεικνύει τη σωστή πορεία της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, το διάγραμμα S_{11} (σχήμα 5.9) δείχνει πως επίσης και εδώ απορροφάται και οδεύει προς ακτινοβολία ποσοστό ενέργειας αρκετά άνω του 90% (-20.55 dB). Επίσης, το bandwidth υπολογίζεται σε 110.3 MHz ή στο 3.67%.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}



Σχήμα 5.10 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα

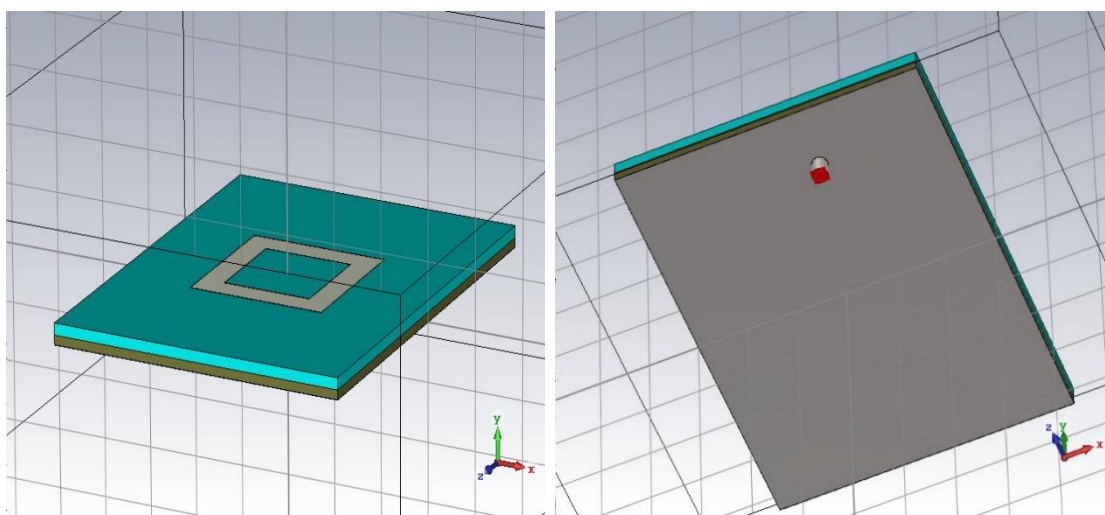
Ωστόσο, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10, η τιμή του Axial Ratio στη συχνότητα των 3 GHz είναι οριακά πάνω από την αποδεκτή τιμή των 3 dB, γεγονός που καταδεικνύει την απουσία καθαρής κυκλικής πόλωσης κατά την ακτινοβολία της κεραίας. Όπως γίνεται αντιληπτό, η συγκεκριμένη σχεδίαση δεν μπορεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς της εργασίας. Ο συνδυασμός της όμως με τα αποδεκτά αποτελέσματα της προηγούμενης υλοποίησης, και με την ταυτόχρονη εφαρμογή νέων τεχνικών σχεδίασης και τροφοδοσίας, είναι δεδομένο πως θα οδηγήσουν σε πολύ σημαντικά αποτελέσματα.

5.4 Μικροταινιακή κεραία τετραγωνικού δακτυλίου και διπλού υποστρώματος

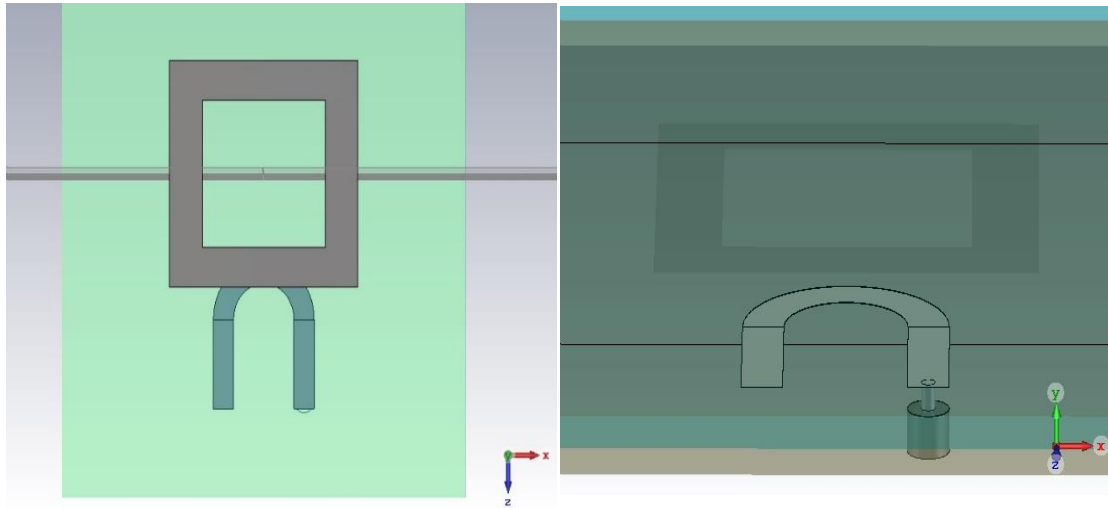
Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4, μία βασική τεχνική για βελτίωση της απόδοσης μια μικροταινιακής κεραίας, είναι η χρήση πολλαπλών υποστρωμάτων σε συνδυασμό με ένα πιο περίπλοκο δίκτυο τροφοδοσίας. Στόχος λοιπόν είναι ο συνδυασμός των παραπάνω αρχικών υλοποιήσεων με τη συγκεκριμένη τεχνική, ούτως ώστε να προκύψουν τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα.

5.4.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις

Η πρώτη κατασκευή αφορά μία μικροταινιακή κεραία δύο υποστρωμάτων, ένα ως βάση του επιθέματος, και ένα ως βάση της γραμμής τροφοδοσίας, η οποία έχει σχήμα πετάλου, και στη μία της πλευρά καταλήγει το pin ενός ομοαξονικού συνδετήρα που βρίσκεται στο κάτω μέρος της κεραίας. Σε ό,τι αφορά το επίθεμα στο πάνω μέρος, χρησιμοποιήθηκε αυτή τη φορά ένας μεταλλικός τετραγωνικός δακτύλιος, καθώς ένας δακτύλιος μπορεί να εμφανίσει το ίδιο καλά αποτελέσματα έχοντας όμως ταυτόχρονα μικρότερο εμβαδόν συνολικής επιφάνειας. Στα σχήματα 5.11 και 5.12 παρουσιάζεται συνολικά η διάταξη της κεραίας [39].



Σχήμα 5.11 Άνω πλευρά της μικροταινιακής κεραίας - Διακρίνεται ο τετραγωνικός δακτύλιος αλλά και τα δύο υποστρώματα (αριστερά) Κάτω πλευρά της κεραίας - Διακρίνεται ο ομοαξονικός συνδετήρας και η θύρα κυματοδηγού (δεξιά)



Σχήμα 5.12 Άνω μέρος της κεραίας - Διακρίνεται η σχετική θέση της τυπωμένης γραμμής που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο υποστρώματα σε σχέση με το επίθεμα στο πάνω μέρος (αριστερά) Όψη της κεραίας στην οποία διακρίνεται το μεταλλικό ring του ομοαξονικού συνδετήρα που καταλήγει στο ένα άκρο της τυπωμένης γραμμής (δεξιά)

Για τον σχεδιασμό της κεραίας χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικού υλικού υποστρώματα. Εκείνο που βρίσκεται στο κάτω μέρος, διαχωρίζεται από τον ομοαξονικό συνδετήρα με ένα επίπεδο γείωσης, και πάνω σε αυτό βρίσκεται η τυπωμένη γραμμή σε σχήμα πετάλου. Το υλικό από το οποίο αποτελείται είναι το λεγόμενο FR4, με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4.4$. Η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού με διηλεκτρική σταθερά ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με τις προηγούμενες υλοποιήσεις, έγινε με γνώμονα την απαίτηση των γραμμών για υψηλή διηλεκτρική σταθερά.

Αντίθετα, στο πάνω μέρος χρησιμοποιήθηκε ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα τύπου Foam (αφρολέξ) χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r = 1.1$, καθώς η χρήση του επιφέρει τη δημιουργία μεγαλύτερων κροσσών ακτινοβολίας, λόγω της χαλάρωσης που προσφέρει στις δυναμικές γραμμές το χαμηλό ϵ_r . Παράλληλα, θα πρέπει να αναφερθεί εδώ πως η συγκεκριμένη μέθοδος τροφοδοσίας προσομοιώνει εκείνη της τροφοδοσίας με άμεση σύζευξη, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.6.3.

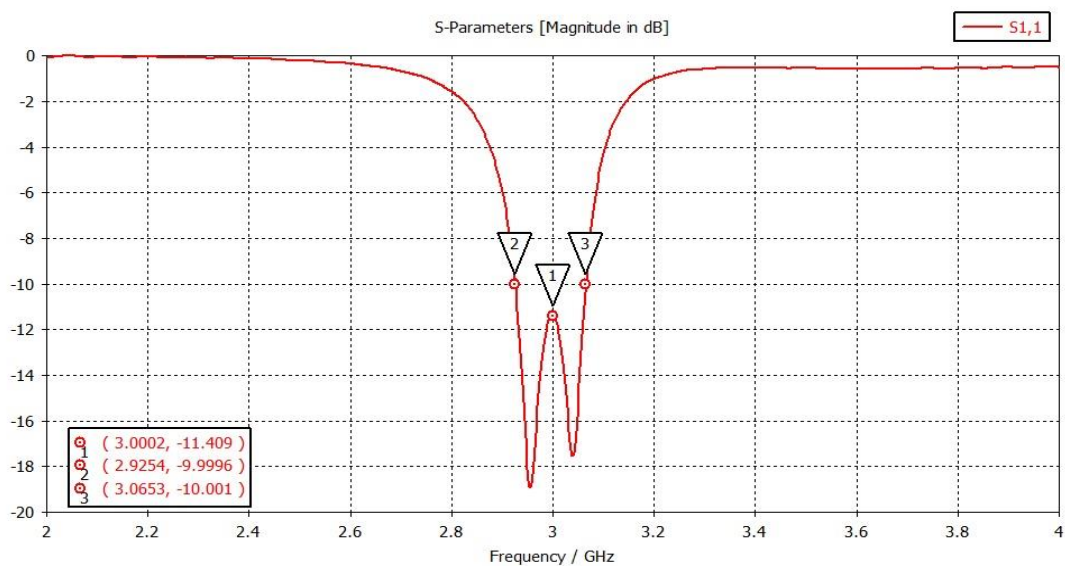
Τιμές Παραμέτρων	
Μήκος υποστρωμάτων	80 mm
Πλάτος υποστρωμάτων	60 mm
Πάχος FR4 υποστρώματος	1.6 mm
Πάχος Foam υποστρώματος	2 mm
Εξωτερική πλευρά επιθέματος	28 mm
Πλάτος τετραγωνικού δακτυλίου	4.9 mm
Πλάτος πετάλου	3 mm
Μήκος πλευρών πετάλου	11 mm
Μικρή ακτίνα ημικυκλίου πετάλου	4.5 mm
Απόσταση κέντρου ημικυκλίου από πλευρά πλάτους	22 mm
Διάμετρος rin	1 mm
Μήκος rin	4.27 mm
Πάχος κυλίνδρου συνδετήρα	1 mm
Μήκος κυλίνδρου συνδετήρα	2.67 mm
Πάχος μεταλλικών στοιχείων	0.035 mm
Απόσταση rin από πλευρά πλάτους	12 mm

Πίνακας 5.2 Τιμές παραμέτρων σχεδίασης των επιμέρους στοιχείων της κεραίας

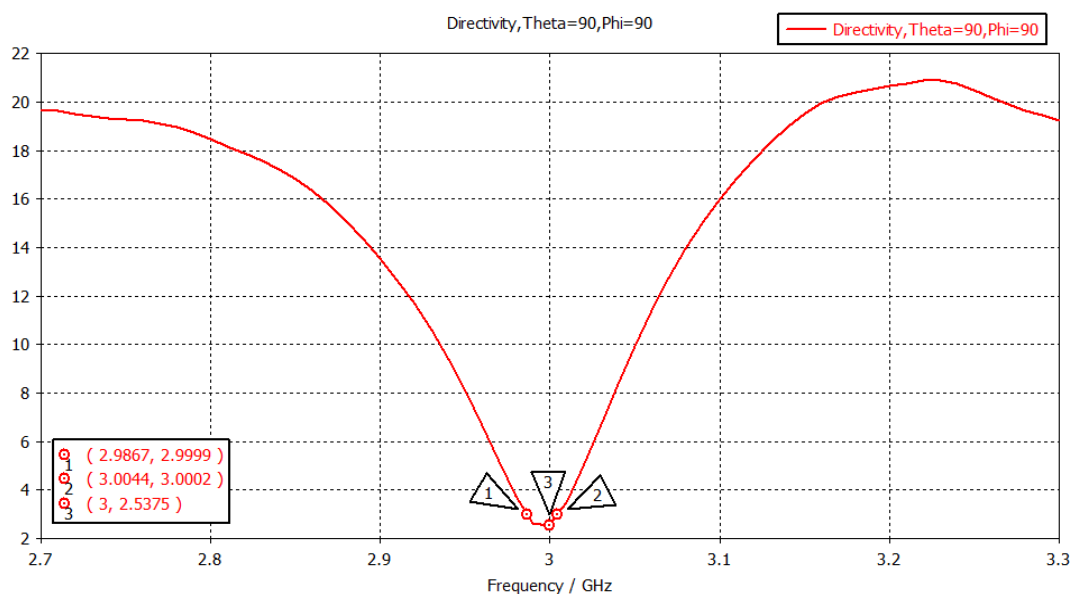
Σε ό,τι αφορά τον ομοαξονικό συνδετήρα, δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι προτεινόμενες διαστάσεις από τον προσομοιωτή, όπως συνέβη και παραπάνω, καθώς λόγω της μεγάλης αλλαγής στο δίκτυο τροφοδοσίας της κεραίας, δεν μεταφέρεται σωστά το απαιτούμενο ποσό ενέργειας. Επομένως, μετά από δοκιμές, προέκυψαν οι βέλτιστες τιμές τόσο για τις διαστάσεις του ομοαξονικού συνδετήρα, όσο και για τις υπόλοιπες των στοιχείων της κεραίας, οι οποίες παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα. Τέλος, αναφορικά με τη σχετική θέση του δακτυλίου στην επιφάνεια της κεραίας, η οποία επηρεάζει κυρίως την ποιότητα της κυκλικής πόλωσης, αυτός ισαπέχει από τις πλευρές του υποστρώματος.

5.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Όπως συνέβη και παραπάνω, έτσι και εδώ, η σχεδίαση εμφανίζει αρκετά αποδεκτά αποτελέσματα, οδηγώντας έτσι στην περαιτέρω εξέλιξη των υλοποιήσεων της εργασίας. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα S_{11} (σχήμα 5.13) παρατηρείται ανάκλαση τροφοδοτούμενης ενέργειας σε ποσοστό λιγότερο του 10% (-11.4 dB), με το bandwidth να είναι στα 140 MHz ή στο 4.66%. Μάλιστα, υπάρχει ξεκάθαρη απεικόνιση των δύο ρυθμών διέγερσης της κεραίας. Επίσης, σε ό,τι αφορά την ποιότητα της κυκλικής πόλωσης, αυτή βρίσκεται στην τιμή των 2.54 dB με 3-dB bandwidth 0.59% (σχήμα 5.14).

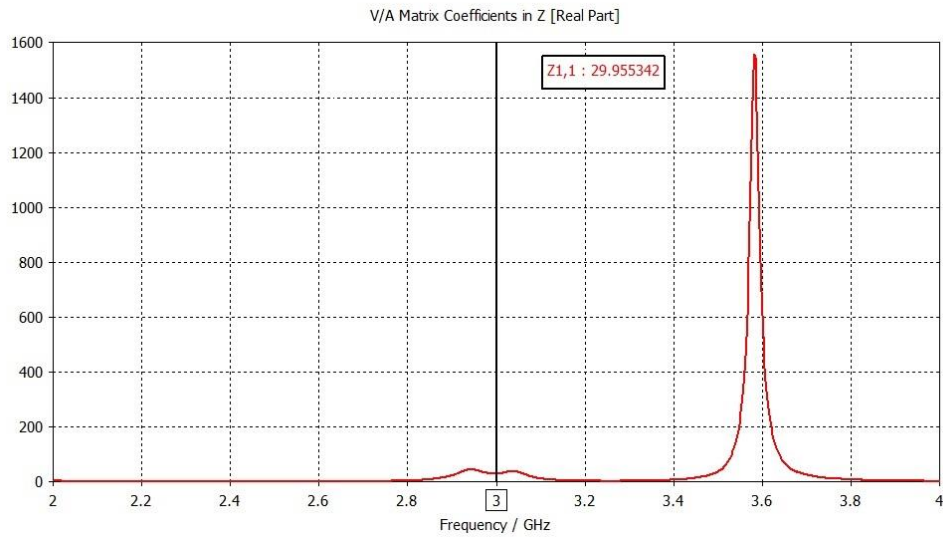


Σχήμα 5.13 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}

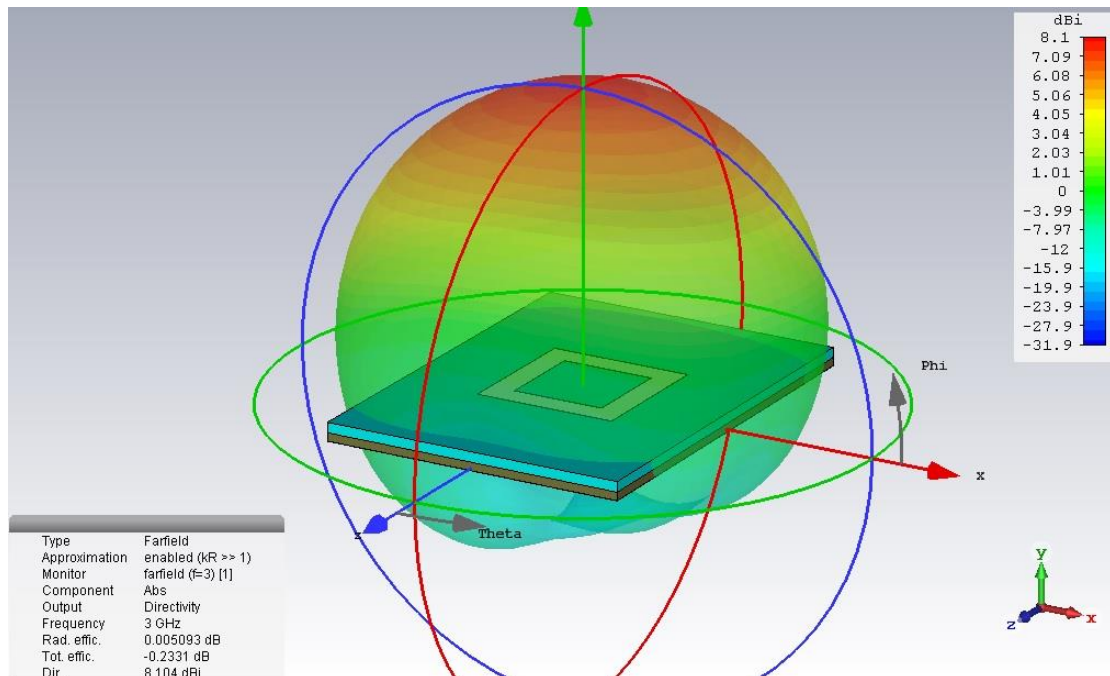


Σχήμα 5.14 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα

Στη συνέχεια, εξετάζοντας την τιμή της σύνθετης αντίστασης της κεραίας, αυτή απέχει αρκετά από την επιθυμητή, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη για συνολική βελτίωση της σχεδίασης. Τέλος, στο σχήμα 5.16 απεικονίζεται το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας στο μακρινό πεδίο.



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης



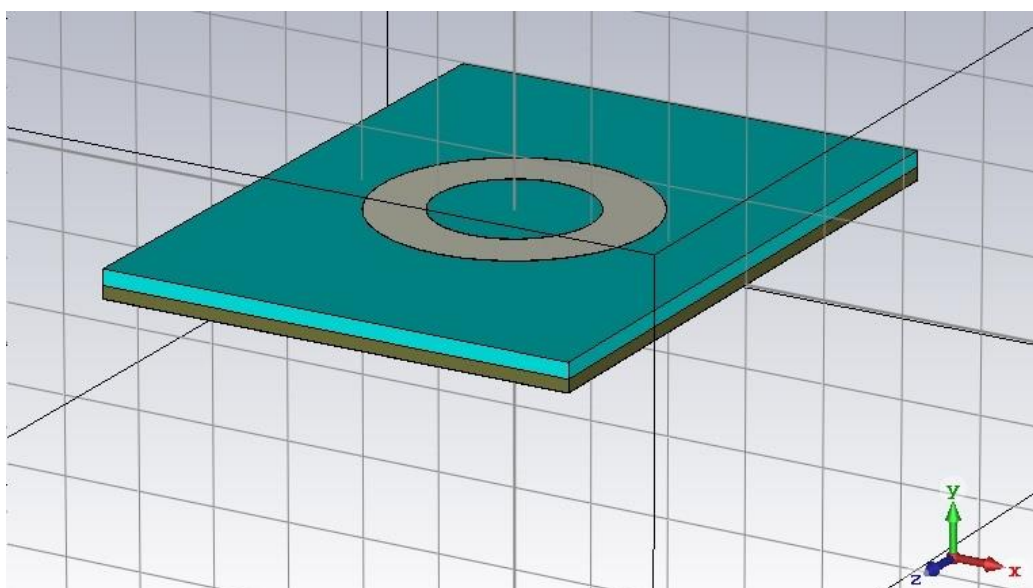
Σχήμα 5.16 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας στο μακρινό πεδίο

5.5 Μικροταινιακή κεραία κυκλικού δακτυλίου και διπλού υποστρώματος

Σε παρόμοιο μήκος κύματος με την προηγούμενη κινείται και η συγκεκριμένη υλοποίηση. Ακολουθώντας το ίδιο μοτίβο, η παρούσα μικροταινιακή κεραία αποτελείται από 2 υποστρώματα μεταξύ των οποίων βρίσκεται μία τυπωμένη γραμμή σε σχήμα πετάλου. Επίσης, η τροφοδοσία της κεραίας γίνεται μέσω ενός ομοαξονικού συνδετήρα, με το βασικό της στοιχείο, το pin, να φτάνει έως την άκρη της μιας πλευράς του πετάλου. Ωστόσο, η βασική διαφορά αυτής της κεραίας με την προηγούμενη, είναι πως στην επιφάνειά της, βρίσκεται ένας κυκλικός δακτύλιος αντί του τετραγωνικού.

5.5.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις

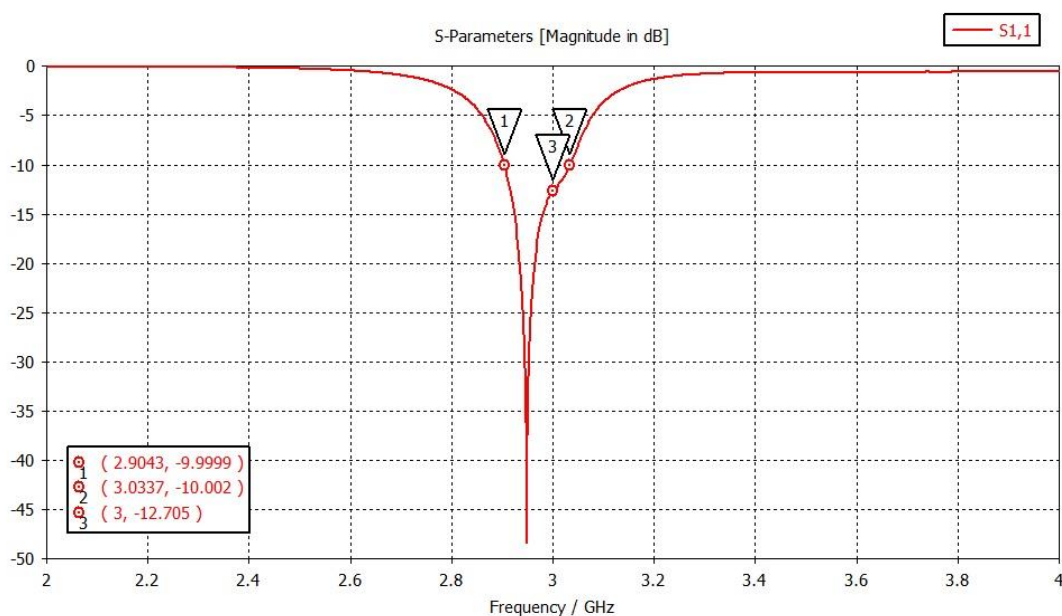
Για την εξαγωγή των βέλτιστων αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές των παραμέτρων, με μόνη εξαίρεση φυσικά τις διαστάσεις του κυκλικού δακτυλίου. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των ακτινών (εσωτερική και εξωτερική) του δακτυλίου είναι 10 mm και 17.2 mm αντίστοιχα. Τέλος, το κέντρο του δακτυλίου ισαπέχει από τις πλευρές του υποστρώματος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο κυκλικός δακτύλιος που έχει αντικαταστήσει τον τετραγωνικό της προηγούμενης σχεδίασης [39].



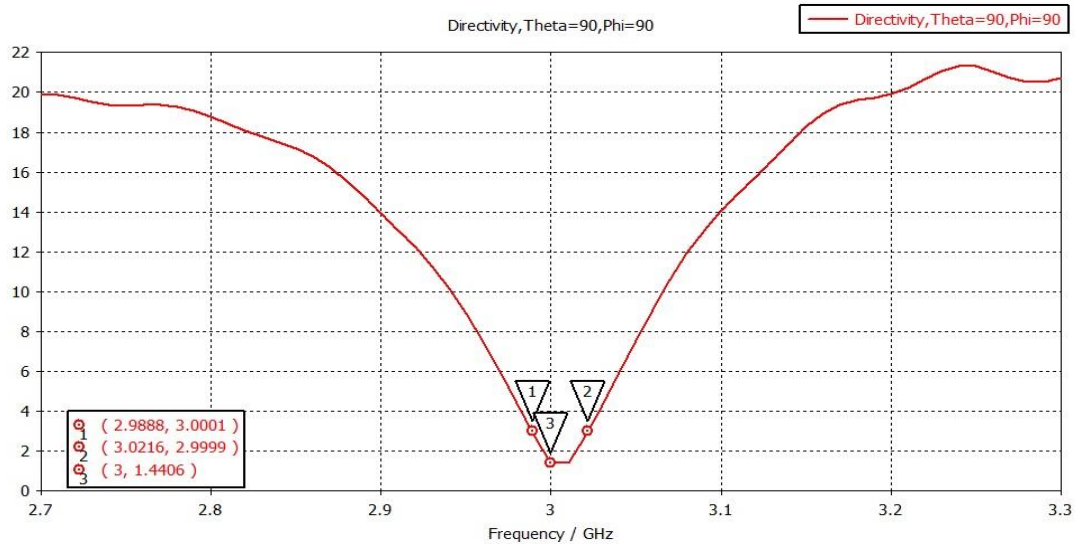
Σχήμα 5.17 Άνω πλευρά της μικροταινιακής κεραίας - Διακρίνεται ο κυκλικός δακτύλιος αλλά και τα δύο υποστρώματα

5.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Όπως φαίνεται και στα επόμενα σχήματα, σημαντικές είναι οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζουν τα διαγράμματα τόσο της S_{11} παραμέτρου, όσο και της τιμής του Axial Ratio. Η τιμή του bandwidth όπως προκύπτει από το διάγραμμα S_{11} (σχήμα 5.18) αγγίζει τα 129.4 MHz ή το 4.31%. Το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται είναι κάτω του 10% (-12.7 dB) της τροφοδοτούμενης, ενώ εμφανέστατη είναι η διαφορά των δύο ρυθμών διέγερσης της κεραίας πέριξ της κεντρικής συχνότητας των 3 GHz. Παράλληλα, η ποιότητα της κυκλικής πόλωσης παρουσιάζει εμφανή βελτίωση αγγίζοντας την τιμή 1.44 dB, με το 3-dB bandwidth να υπολογίζεται σε περίπου 1% (σχήμα 5.19).

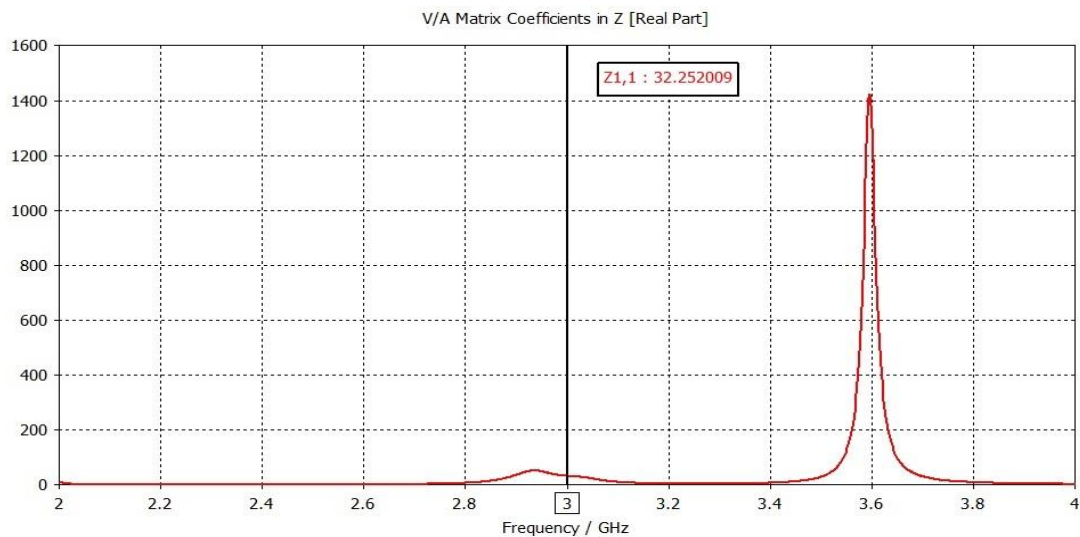


Σχήμα 5.18 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}

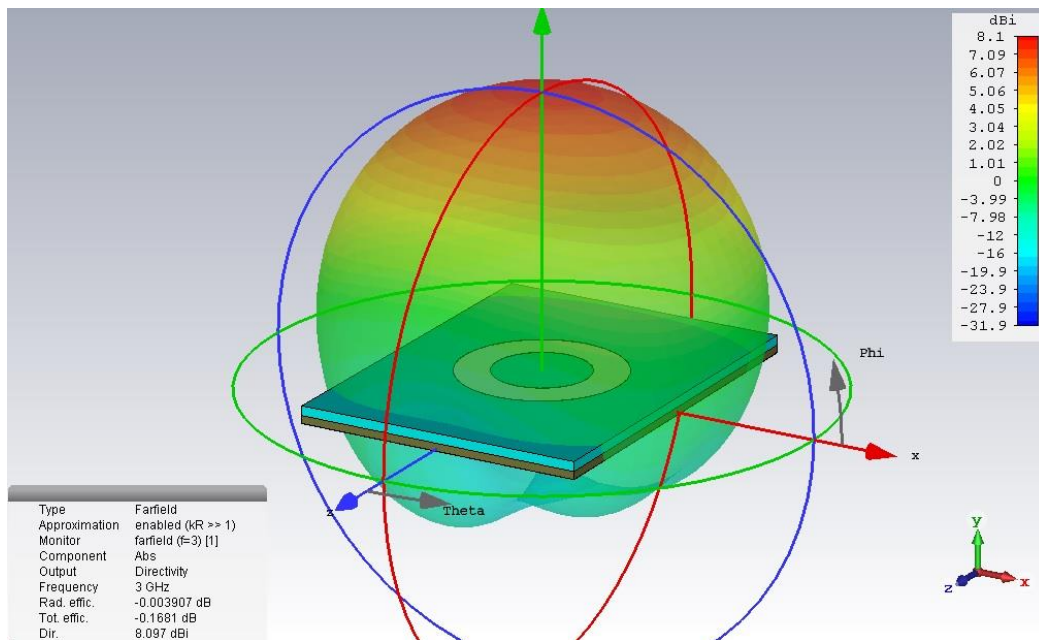


Σχήμα 5.19 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα

Σε ό,τι αφορά την τιμή της σύνθετης αντίστασης, αυτή παρουσιάζει μία όχι αμελητέα απόκλιση από την επιθυμητή τιμή των 50 Ω (σχήμα 5.20), γεγονός που καταδεικνύει την ατελή προσαρμογή της κεραίας. Τέλος, το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας παρουσιάζεται στο σχήμα 5.21.



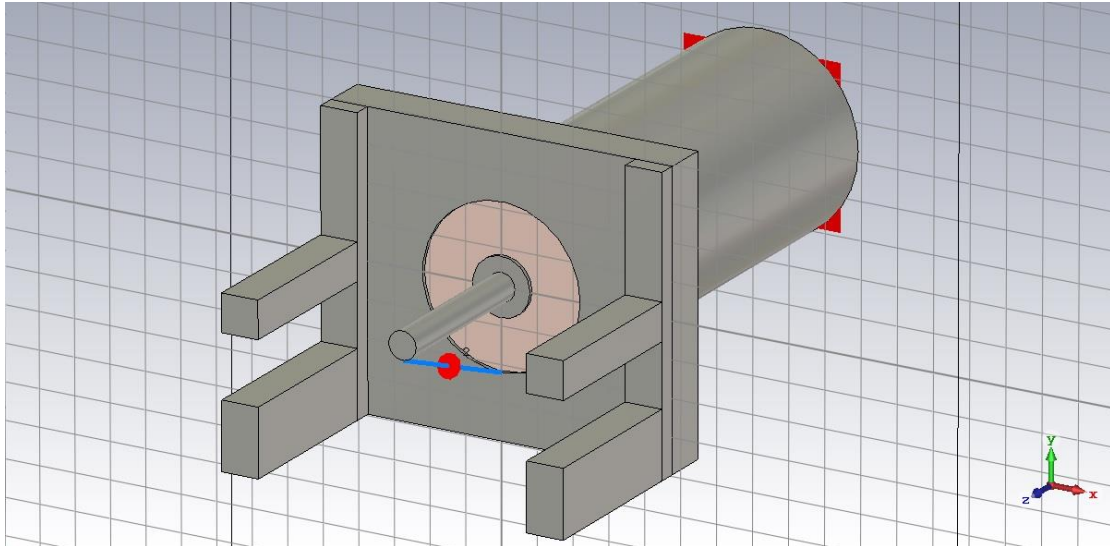
Σχήμα 5.20 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης



Σχήμα 5.21 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας στο μακρινό πεδίο

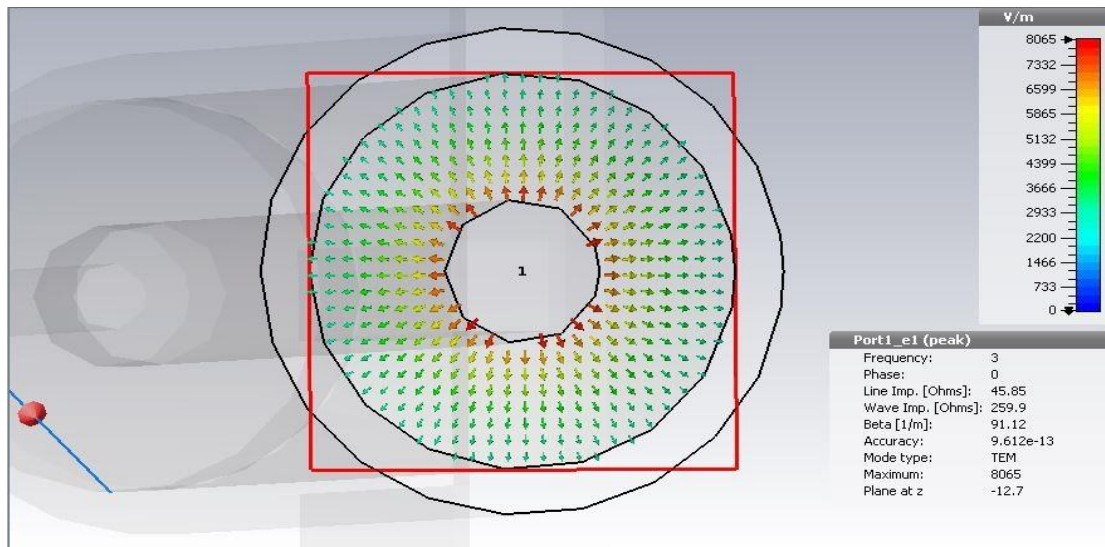
5.6 Μικροταινιακή κεραία τετραγωνικού δακτυλίου και διπλού υποστρώματος με χρήση SMA connector

Στη συνέχεια, κρίνοντας επιτακτική την ανάγκη να πλησιάσουν στην πραγματικότητα κατά το μέγιστο δυνατό, τόσο η σχεδίαση της κεραίας, όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αποφασίστηκε η κατασκευή και η χρήση ενός SMA connector, αντί του ομοαξονικού συνδετήρα, με βάση τις διαστάσεις και τα specifications, όπως αυτά αναφέρονται στο αντίστοιχο datasheet. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε ο SMA connector 526-5779 από την RS Pro™, του οποίου πρώτα πρέπει να εξεταστεί η ομαλή λειτουργία, πριν εισαχθεί στις επόμενες υλοποιήσεις. Για τον λόγο αυτό, εισήχθη μία θύρα κυματοδηγού (waveguide port) στο πίσω μέρος του συνδετήρα, και μία διακριτή θύρα (discrete port) στο εμπρόσθιο (σχήμα 5.22).

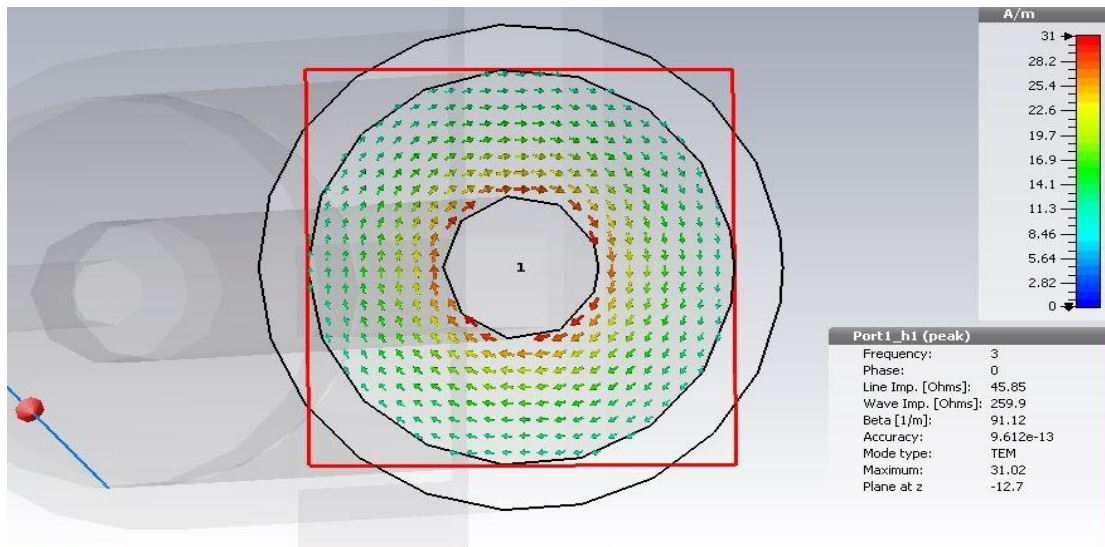


Σχήμα 5.22 SMA connector συνδεδεμένος με δύο θύρες, μία διακριτή (discrete) στο μπροστινό του ακροδέκτη και μία θύρα κυματοδηγού (waveguide) στην υποδοχή του

Στα επόμενα σχήματα, φαίνεται η κατεύθυνση τόσο του ηλεκτρικού όσο και του μαγνητικού πεδίου, καθώς και ότι το εισερχόμενο κύμα ταξιδεύει με παλμό TEM. Επίσης, η εμπέδηση του συνδετήρα υπολογίζεται στα 45.85 Ω, τιμή αρκετά κοντά στην επιθυμητή των 50 Ω, γεγονός που δείχνει την σχεδόν άριστη προσαρμογή και λειτουργία του.

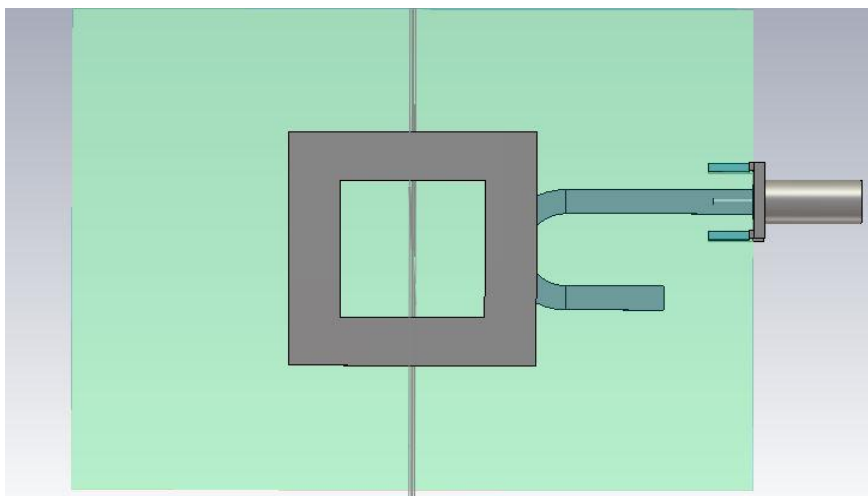


Σχήμα 5.23 Προσομοίωση του συνδετήρα για τον έλεγχο λειτουργίας του ως προς την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου

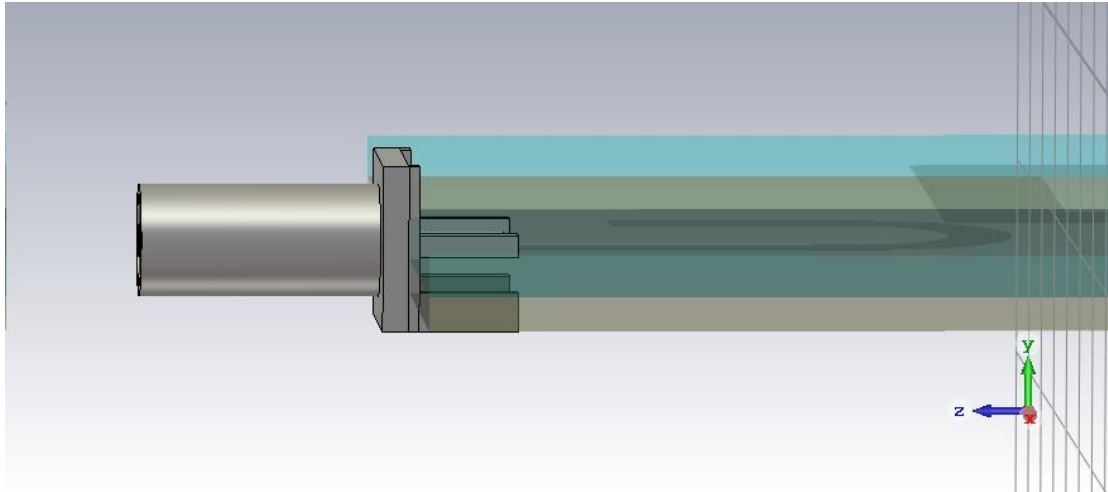


Σχήμα 5.24 Προσομοίωση του συνδετήρα για τον έλεγχο λειτουργίας του ως προς την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου

Σε ό,τι αφορά τη νέα μορφή μικροταινιακής κεραίας που τίθεται προς εξέταση, αυτή αποτελεί τροποποίηση της κεραίας όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.4. Καθώς εδώ εισήχθη ο SMA connector, κρίθηκε αναγκαίο από τα πρώτα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η αλλαγή στο δίκτυο τροφοδοσίας της κεραίας, ώστε να γίνεται αρκετά πιο ομαλά η μεταφορά της ενέργειας από τον SMA connector προς στο ακτινοβόλο επίθεμα. Μία είναι η βασική αλλαγή που πραγματοποιήθηκε στη δομή της κεραίας, και αφορά τη μία πλευρά του μεταλλικού πετάλου ανάμεσα στα δύο υποστρώματα, η οποία και επεκτάθηκε έως το άκρο του υποστρώματος, ώστε να έχει άμεση επαφή με τον SMA connector καθώς αυτός προσαρτηθεί σε αυτή την πλευρά της κεραίας (σχήμα 5.25 & 5.26) [40].



Σχήμα 5.25 Αποψη της κεραίας – Διακρίνεται η σύνδεση του SMA connector με την μεγάλη πλευρά του πετάλου



Σχήμα 5.26 Πλαϊνή όψη της κεραίας – Διακρίνεται ο τρόπος ενσωμάτωσης του SMA connector μεταξύ των δύο υποστρωμάτων

Στο ανωτέρω σχήμα φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο έχει ενσωματωθεί ο συνδετήρας στο κυρίως «σώμα» της κεραίας, αποτελώντας έτσι αναπόσπαστο κομμάτι αυτής.

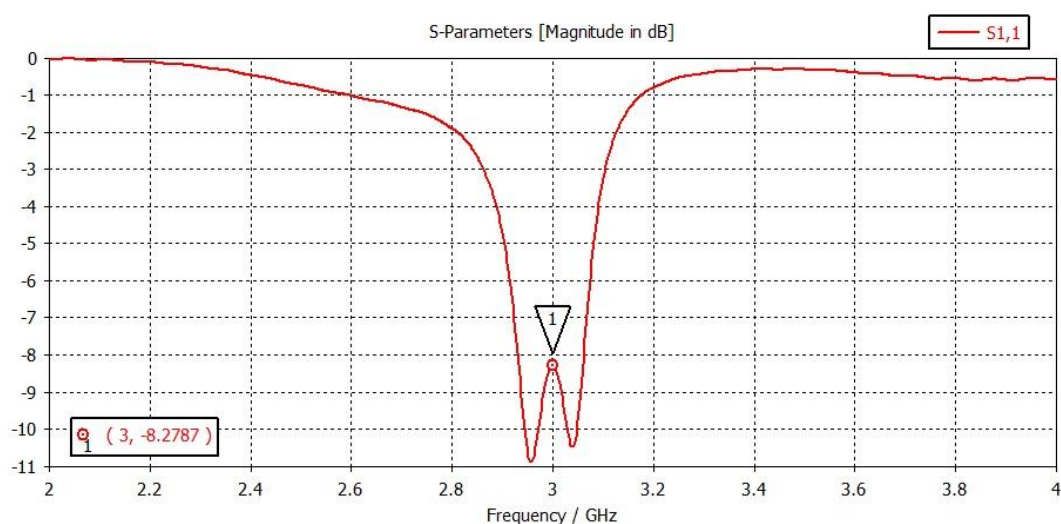
5.6.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις

Αναφορικά με τις διαστάσεις της κεραίας, αυτές ελάχιστα έχουν τροποποιηθεί σε σχέση με τις τιμές της σχεδίασης της παραγράφου 5.4 για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η εξωτερική πλευρά του τετραγωνικού δακτυλίου αγγίζει τα 29.1 mm, ενός το πλάτος του είναι 6.05 mm. Αντίστοιχα, έχουν τροποποιηθεί μερικώς και οι διαστάσεις των γραμμών του πετάλου, με τη μία πλέον να έχει μήκος 11.5 mm, και η πλευρά που επεκτάθηκε ώστε να φτάνει στην άκρη του υποστρώματος να αγγίζει τα 22 mm. Οι υπόλοιπες διαστάσεις παρέμειναν ως έχουν, οδηγώντας έτσι στα κάτωθι αποτελέσματα.

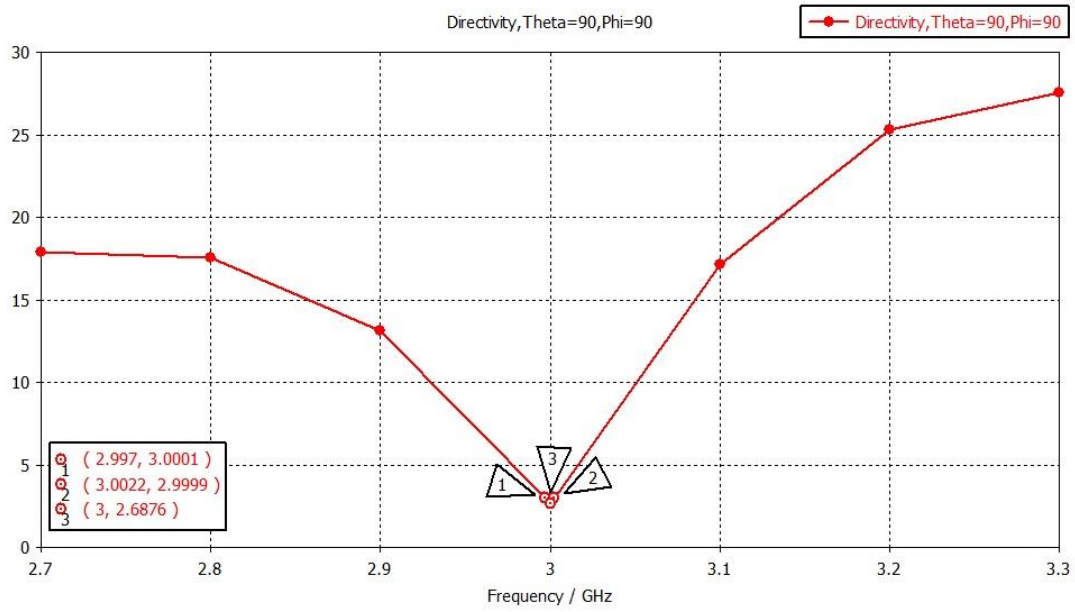
5.6.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Παρότι η σχεδίαση της συγκεκριμένης κεραίας έγινε με γνώμονα την επίτευξη αποτελεσμάτων που θα ανταποκρίνονται κατά το μέγιστο δυνατό στην πραγματικότητα, γεγονός στο οποίο οφείλεται και η προσθήκη του SMA connector, η τελική του ενσωμάτωση στη σχεδίαση, επέφερε μεγάλες αλλαγές στα αποτελέσματα. Ενώ λοιπόν έγιναν οι απαραίτητες προσαρμογές στις διαστάσεις για να αντισταθμιστούν αυτές οι αλλαγές, τα παραχθέντα αποτελέσματα παρουσίασαν ένα όχι και τόσο θετικό πρόσημο.

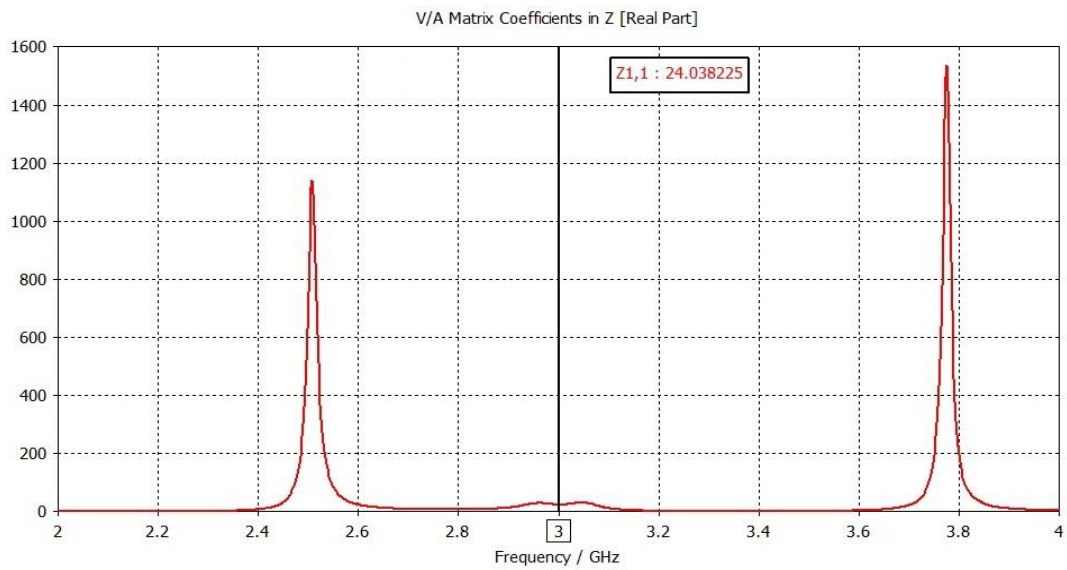
Συγκεκριμένα, στα σχήματα 5.27 και 5.28 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα της S_{11} παραμέτρου και του Axial Ratio. Και ενώ η τιμή αυτού παρουσιάζει ελάχιστο στα 2.68 dB για τη συχνότητα των 3 GHz, τιμή οριακά αποδεκτή, από το S_{11} διάγραμμα φαίνεται πως υπάρχει ανάκλαση ακτινοβολίας σε ποσοστό άνω του 10% (-8.27 dB), γεγονός καθόλου σύμφορο. Επίσης, στο σχήμα 5.29 φαίνεται αρκετά καθαρά και η κακή προσαρμογή της κεραίας εξαιτίας της μεγάλης απόκλισης της τιμής του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης από την επιθυμητή.



Σχήμα 5.27 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}



Σχήμα 5.28 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα



Σχήμα 5.29 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης

Όπως γίνεται κατανοητό με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, ο συγκεκριμένος τύπος κεραίας δεν μπορεί να αποτελέσει κάποιο αξιοποιήσιμο σχέδιο προς κατασκευή και χρήση. Θα πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε τα παραγόμενα αποτελέσματα να ανταποκρίνονται όσο το δυνατό στην πραγματικότητα, συνδυάζοντας παράλληλα τις βέλτιστες δυνατές τιμές στις υπό εξέταση παραμέτρους. Για τον λόγο αυτό, προτάθηκε και σχεδιάστηκε ο τύπος κεραίας της επόμενης παραγράφου, ο οποίος οδήγησε στο βέλτιστο δυνατό αλλά και ζητούμενο αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας.

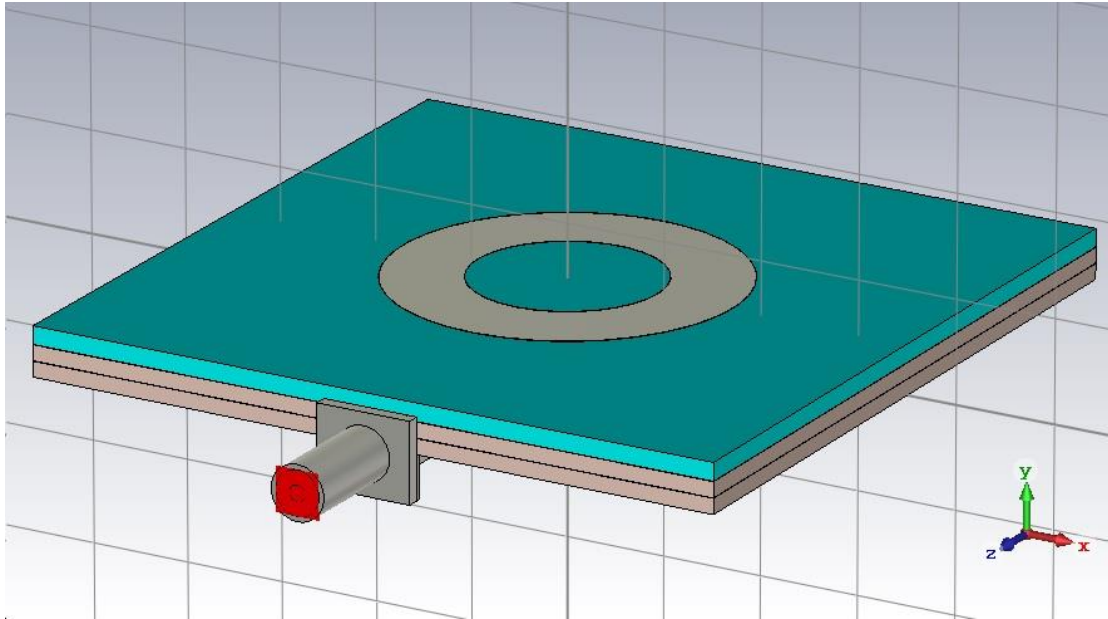
5.7 Μικροταινιακή κεραία τύπου NOSCIPRA (NOn-Serially proximity coupled CIrcularly Polarized Ring Antenna)

Βασισμένη στις προηγούμενες υλοποιήσεις, και στην προσπάθεια της δραστηκής βελτίωσης των τιμών των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την ακτινοβολία και τη γενικότερη λειτουργία μιας κεραίας, δημιουργήθηκε ο τύπος κεραίας NOSCIPRA (NOn-Serially proximity coupled CIrcularly Polarized Ring Antenna). Η κεραία αυτή εμφανίζει κάποιες ιδιαιτερότητες-ιδιομορφίες στον τρόπο κατασκευής της, παρουσιάζοντας όμως ταυτόχρονα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας και λειτουργίας επαρκώς θετικά για την πρακτική αξιοποίησή της [41],[42].

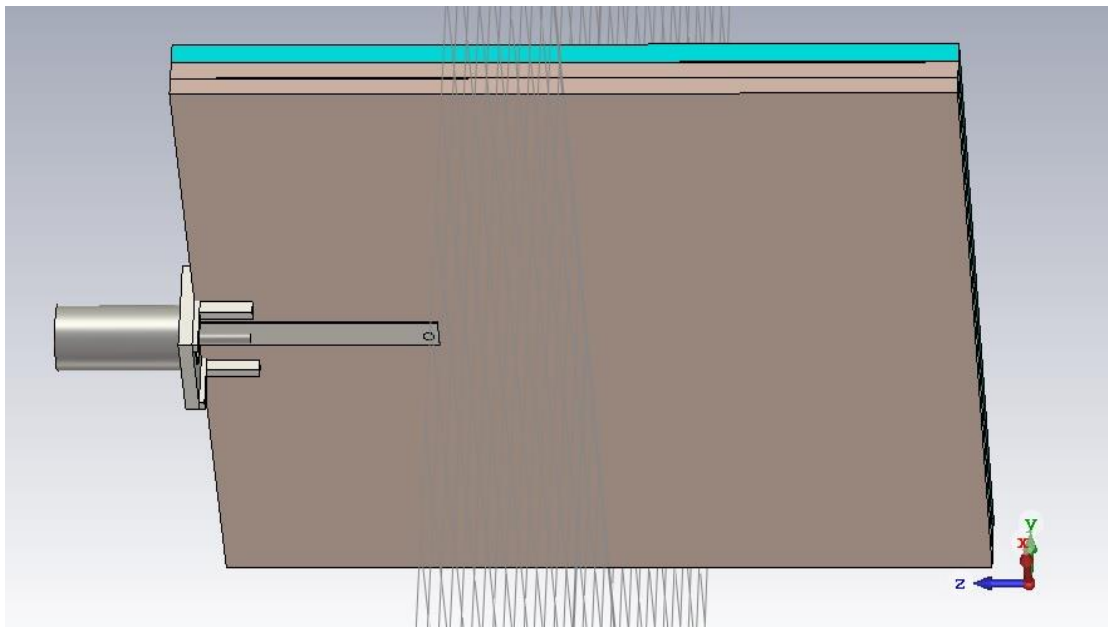
5.7.1 Σχεδίαση – Διαστάσεις

Όπως προαναφέρθηκε, η κεραία παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σε ό,τι αφορά την κατασκευή της, κυρίως σε σχέση με τις προηγούμενες υλοποιήσεις που αναλύθηκαν εκτενώς στις προηγούμενες παραγράφους. Η πιο αξιοσημείωτη αλλαγή αφορά την προσθήκη ενός ακόμη υποστρώματος, και αυτό κυρίως λόγω της τροποποίησης του δικτύου τροφοδοσίας της κεραίας.

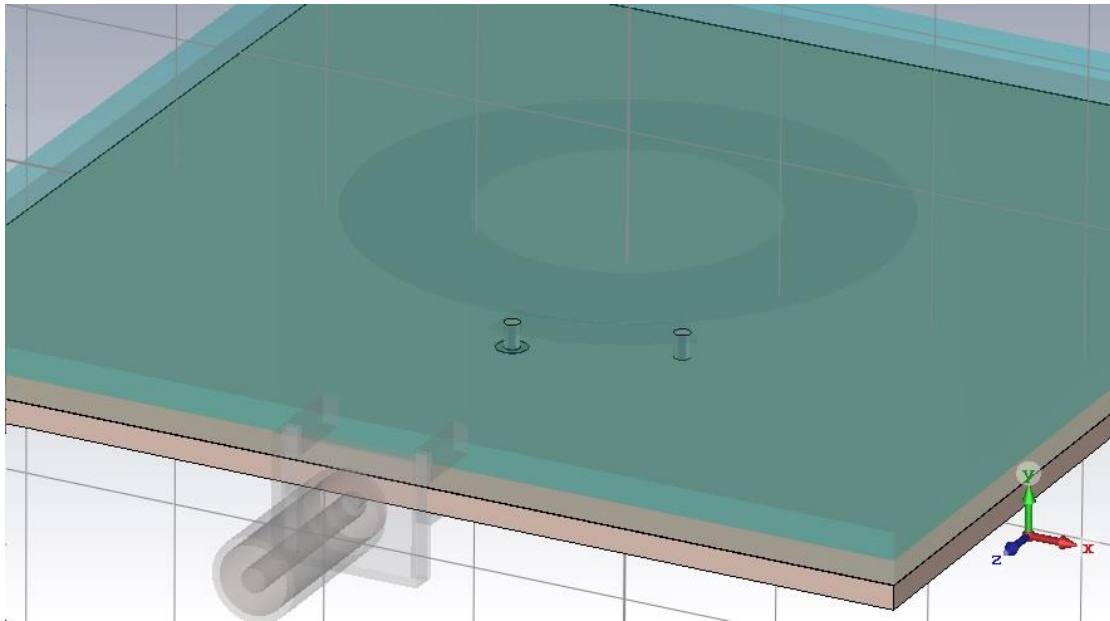
Συγκεκριμένα, η κεραία αποτελείται από τρία υποστρώματα, δύο εκ των οποίων είναι κατασκευασμένα από το υλικό RO4350B ($\epsilon_r=3.48$) από την Rogers CorporationTM, ενώ το τρίτο είναι τύπου Foam ($\epsilon_r=1.1$). Το ένα υπόστρωμα τύπου RO4350B αποτελεί τη βάση της κεραίας, και διαχωρίζεται από το όμοιό του με ένα μεταλλικό (PEC) επίπεδο γείωσης. Το υπόστρωμα τύπου Foam, βρίσκεται πάνω από το δεύτερο υπόστρωμα τύπου RO, και χρησιμεύει κυρίως για τη στήριξη του μεταλλικού επιθέματος στην κορυφή της κεραίας, ενός κυκλικού δακτυλίου στην περίπτωση αυτή. Ενδιάμεσά τους, βρίσκεται το πρώτο βασικό τμήμα του δικτύου τροφοδοσίας, και αφορά ένα μεταλλικό τόξο (arc) κάτω ακριβώς από το επίθεμα, το οποίο στο ένα του άκρο είναι γειωμένο μέσω ενός pin, ενώ το άλλο του άκρο συνδέεται και πάλι με τη χρήση ενός pin, με μία τυπωμένη γραμμή τροφοδοσίας, στην κάτω πλευρά της κεραίας. Τέλος, η συγκεκριμένη γραμμή τροφοδοσίας έρχεται σε άμεση επαφή με έναν SMA connector που βρίσκεται προσαρτημένος σε μία από τις πλευρές της κεραίας (σχήματα 5.30, 5.31, 5.32, 5.33 και 5.34).



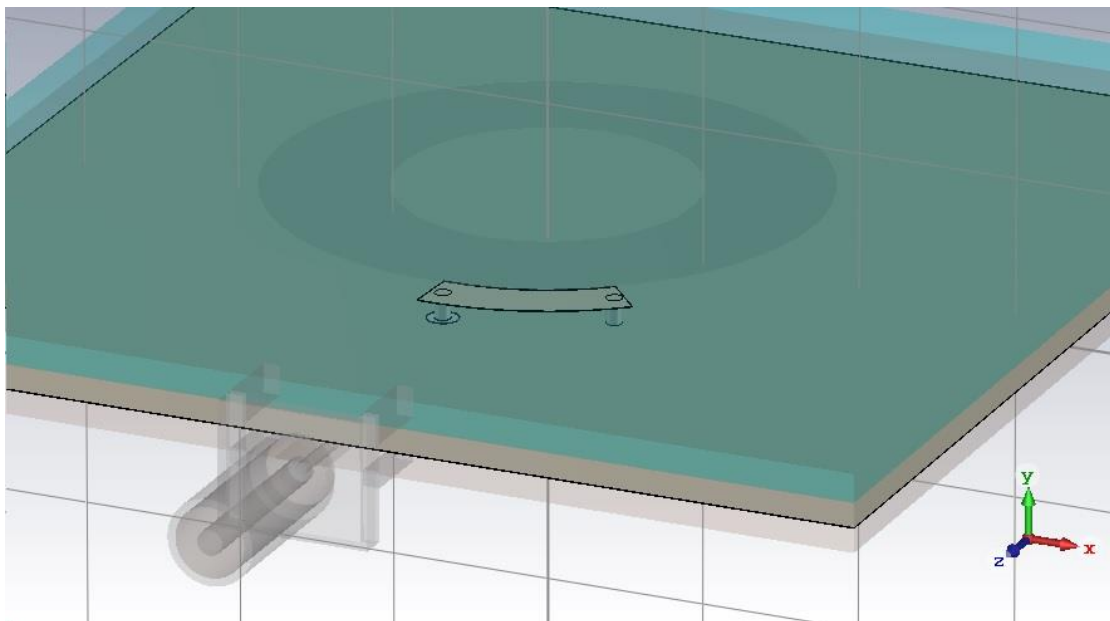
Σχήμα 5.30 Εμπρόσθια όψη της κεραίας NOSCIPRA – Διακρίνονται τα τρία υποστρώματα, ο SMA connector που βρίσκεται προσαρτημένος στη μία πλευρά εξ αυτών, και ο μεταλλικός κυκλικός δακτύλιος στην κορυφή



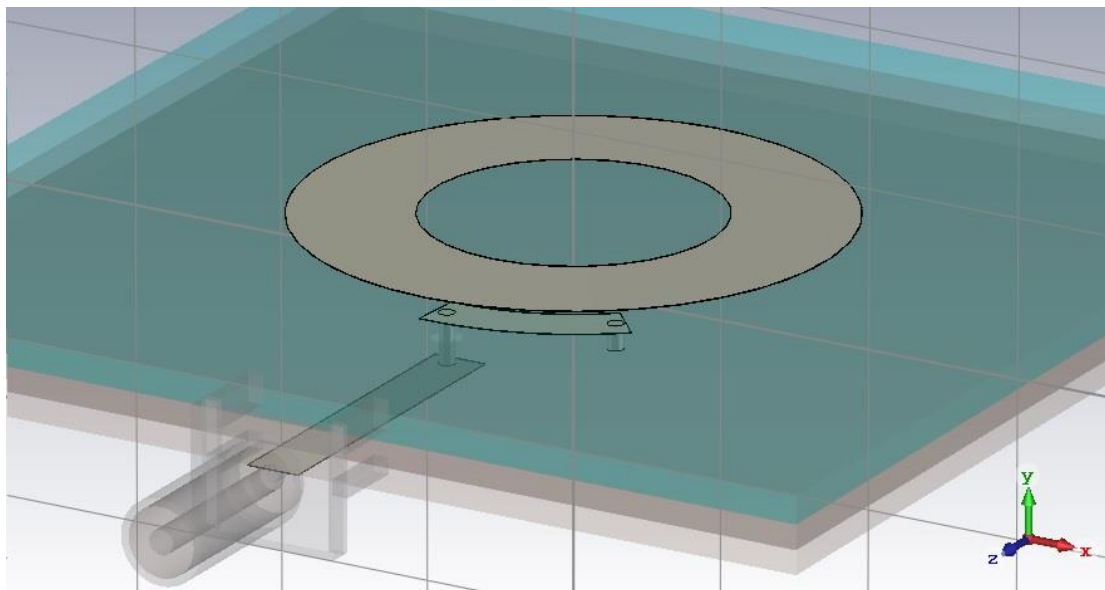
Σχήμα 5.31 Οπίσθια όψη της κεραίας NOSCIPRA – Διακρίνεται η τυπωμένη γραμμή στην πίσω πλευρά του υποστρώματος και ο τρόπος με τον οποίο βρίσκεται σε επαφή με τον μεταλλικό ακροδέκτη του SMA connector



Σχήμα 5.32 Όψη από το εσωτερικό της κεραίας NOSCIPRA – Διακρίνονται τα δύο μεταλλικά rib που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της – Ξεχωρίζει το κενό (πάχους 0.5 mm) μεταξύ του αριστερού rib (που καταλήγει έως την τυπωμένη γραμμή στη βάση) και του επιπέδου γείωσης, ώστε να αποφεύγεται δεύτερη εστία γείωσης



Σχήμα 5.33 Όψη από το εσωτερικό της κεραίας NOSCIPRA – Διακρίνεται το μεταλλικό τόξο το οποίο τροφοδοτείται από το αριστερό rib μέσω της τυπωμένης γραμμής στο πίσω μέρος της κεραίας, και γειώνεται ταυτόχρονα μέσω του δεξιού rib το οποίο εφάπτεται στο επίπεδο γείωσης



Σχήμα 5.34 Συνολική παρουσίαση των μεταλλικών στοιχείων της κεραίας NOSCIPRA

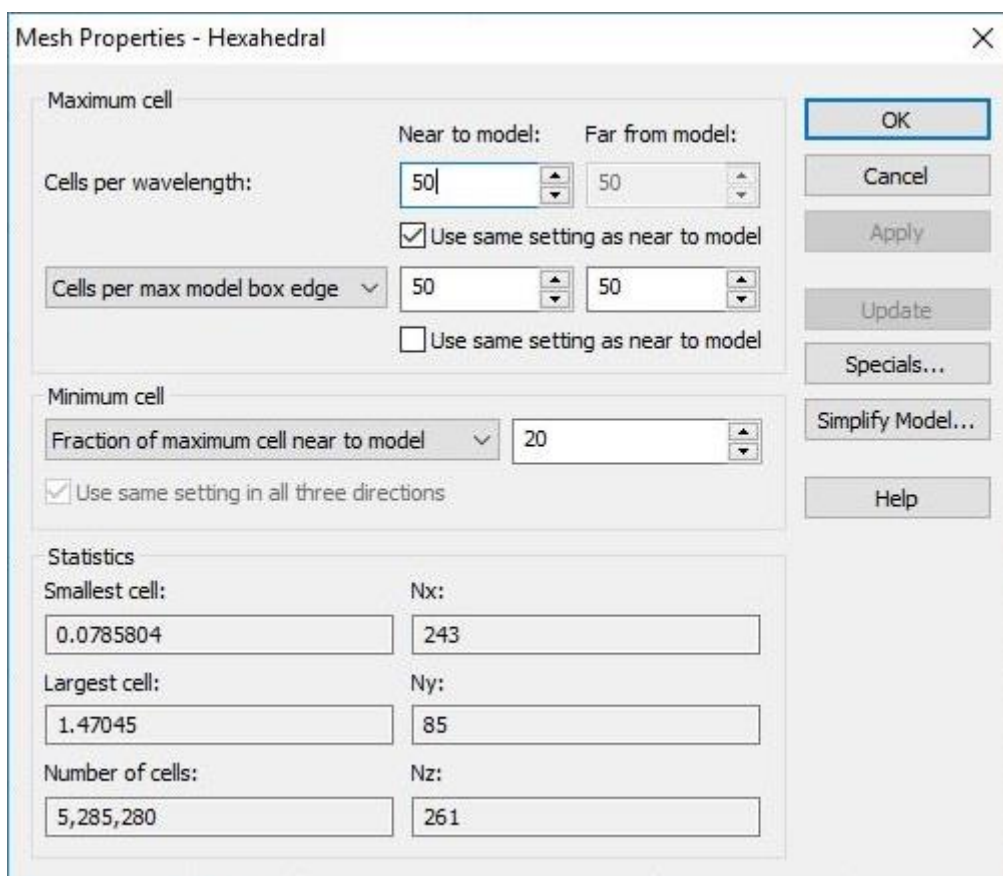
Στο παραπάνω σχήμα, παρουσιάζονται τα μεταλλικά στοιχεία της κεραίας, των οποίων η θέση και η λειτουργία φανερώνουν την πορεία της τροφοδοτούμενης ενέργειας από τον SMA connector, και μέχρι αυτή να φτάσει τελικά στο μεταλλικό επίθεμα στην κορυφή, ώστε να μετατραπεί σε ακτινοβολούμενη. Αναλυτικότερα, η κεραία τροφοδοτείται αρχικά μέσω του συνδετήρα ο οποίος βρίσκεται σε άμεση επαφή με την τυπωμένη γραμμή στο κάτω μέρος της κεραίας. Στη συνέχεια, η τροφοδοτούμενη ενέργεια μεταφέρεται μέσω της τυπωμένης γραμμής και διαμέσου του μεταλλικού pin που εφάπτεται σε αυτή, στο μεταλλικό τόξο που βρίσκεται σε πλήρη κάλυψη από το ακτινοβόλο επίθεμα της κορυφής. Μάλιστα, το στοιχείο αυτό αποτελεί τη βασική διαφορά της συγκεκριμένης σχεδίασης εν συγκρίσει με τις προηγούμενες, καθώς έστω και μία μικρή προεξοχή του τόξου σε σχέση με το επίθεμα, δύναται να προκαλέσει αλλοιώσεις στο διάγραμμα ακτινοβολίας. Τέλος, η ενέργεια που βρίσκεται συγκεντρωμένη εδώ, οδηγείται στον κυκλικό δακτύλιο της κορυφής μέσω της μεθόδου της άμεσης σύζευξης, όπου και τελικά ακτινοβολείται στον ελεύθερο χώρο.

Σε ό,τι αφορά τις διαστάσεις των στοιχείων της κεραίας, πρέπει να τονιστεί πως ο συγκεκριμένος τύπος κεραίας χαρακτηρίζεται από πέντε βασικούς βαθμούς ελευθερίας. Οι δύο πρώτοι αφορούν τη θέση, το μήκος και το πλάτος του τόξου, οι οποίοι κατά κύριο λόγο επηρεάζουν την ποιότητα της κυκλικής πόλωσης. Οι επόμενοι δύο αφορούν το πάχος και τη μικρή διάμετρο του κυκλικού δακτυλίου στην κορυφή της κεραίας, και επιδρούν κυρίως στη συχνότητα λειτουργίας της αλλά και στο προσφερόμενο bandwidth. Οι τιμές όλων των διαστάσεων των στοιχείων της κεραίας που οδήγησαν στα βέλτιστα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Τιμές Παραμέτρων	
Μήκος υποστρωμάτων	70 mm
Πλάτος υποστρωμάτων	70 mm
Πάχος RO4350B υποστρωμάτων	1.524 mm
Πάχος Foam υποστρώματος	1.8 mm
Μικρή ακτίνα κυκλικού δακτυλίου	9.3 mm
Πλάτος κυκλικού δακτυλίου	7.65 mm
Μικρή ακτίνα τόξου	13.44 mm
Πλάτος τόξου	3.43 mm
Επίκεντρη γωνία τόξου	54.05°
Πάχος μεταλλικών επιφανειών	0.035 mm
Διάμετρος pins	0.5 mm
Μήκος pin τροφοδοσίας	3.153 mm
Μήκος pin γείωσης	1.559 mm
Πάχος γραμμής τροφοδοσίας	3.41 mm
Μήκος γραμμής τροφοδοσίας	21.7 mm

Πίνακας 5.3 Τιμές παραμέτρων σχεδίασης της κεραίας NOSCIPRA

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί εδώ πως τα ακόλουθα αποτελέσματα έχουν προκύψει με την τροποποίηση ενός ακόμη βασικού χαρακτηριστικού της προσομοίωσης. Αυτό είναι η διακριτοποίηση του χώρου σε κελιά. Όλες οι προηγούμενες προσομοιώσεις εκτελέστηκαν με τις προεπιλεγμένες τιμές διακριτοποίησης, της τάξης των 15 κελιών ανά μήκος κύματος (cells/wavelength). Καθώς όμως η συγκεκριμένη υλοποίηση προσέφερε εξαρχής πολύ σημαντικά και αξιόλογα αποτελέσματα, κρίθηκε αναγκαίο η αύξηση των κελιών του χώρου, ούτως ώστε τα αποτελέσματα να ανταποκρίνονται όλο και περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες. Έτσι, όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα, αποφασίστηκε η αύξηση των κελιών σε 50 ανά μήκος κύματος, σε όλο τον χώρο πέριξ της κεραίας. Η αλλαγή αυτή, παρότι αύξησε δραματικά τον χρόνο ολοκλήρωσης της προσομοίωσης, θεωρήθηκε αναγκαία για την εξαγωγή ακόμη πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

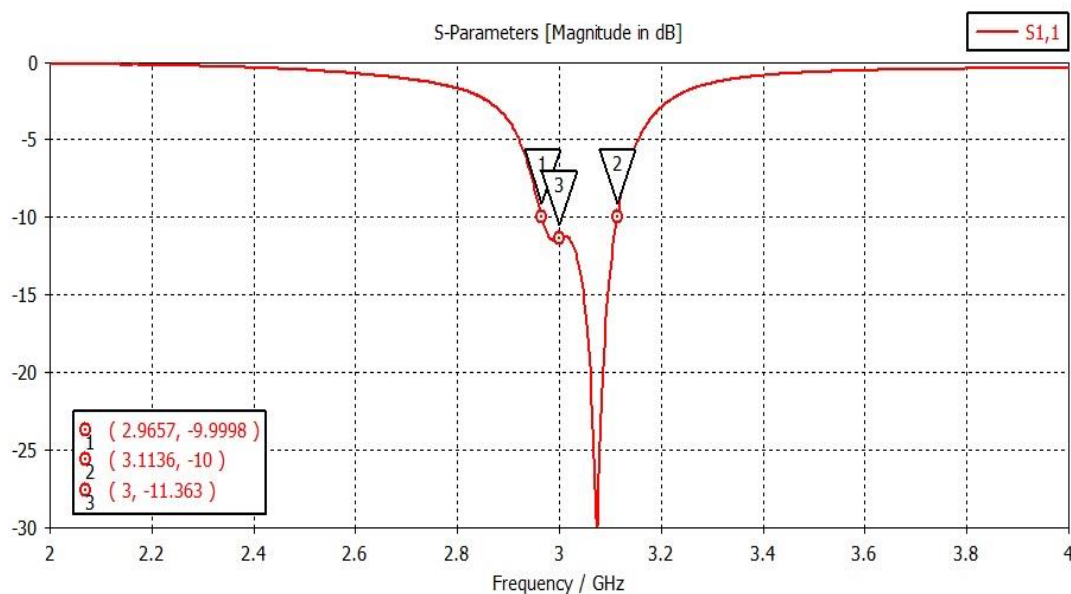


Σχήμα 5.35 Μενού επιλογής αριθμού κελιών διακριτοποίησης του χώρου

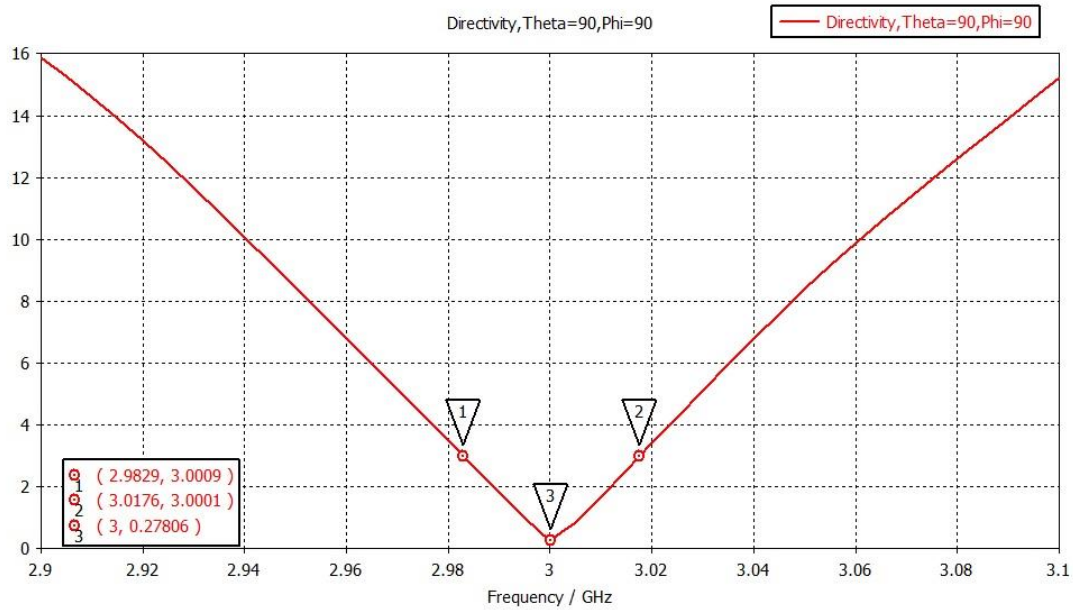
5.7.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Μελετώντας αρχικά τα πιο σημαντικά διαγράμματα που αφορούν την παράμετρο S_{11} και την τιμή του Axial Ratio, καταλαβαίνει εύκολα κανείς πως η συγκεκριμένη υλοποίηση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.36 φαίνεται καθαρά (-11.36 dB) πως ένα πολύ μικρό ποσοστό ενέργειας (<10%) ανακλάται πίσω και δεν οδεύει προς ακτινοβολία. Μάλιστα, το εύρος ζώνης της ακτινοβολίας εμφανίζεται σχετικά βελτιωμένο σε σχέση με τις προηγούμενες υλοποιήσεις, αγγίζοντας το 4.93%.

Το σημαντικότερο όμως επίτευγμα που προφέρει η συγκεκριμένη υλοποίηση, αφορά το ίσως πλέον ζητούμενο της παρούσας εργασίας που είναι η ποιότητα της κυκλικής πόλωσης. Κοιτώντας λοιπόν το διάγραμμα του Axial Ratio (σχήμα 5.37) παρατηρείται η προφανέστατη βελτίωση της ελάχιστης τιμής της κυκλικής πόλωσης εν συγκρίσει με τις ανωτέρω υλοποιήσεις, με τιμή που φτάνει τα 0.28 dB. Η τιμή αυτή, αγγίζει το ελάχιστο όριο των 0 dB, καθιστώντας την κατασκευή αυτή ως την πλέον αποδοτική. Σε ό,τι αφορά το 3-dB bandwidth, παρουσιάζει και αυτό αισθητή βελτίωση, με τιμή στο 1.16%.

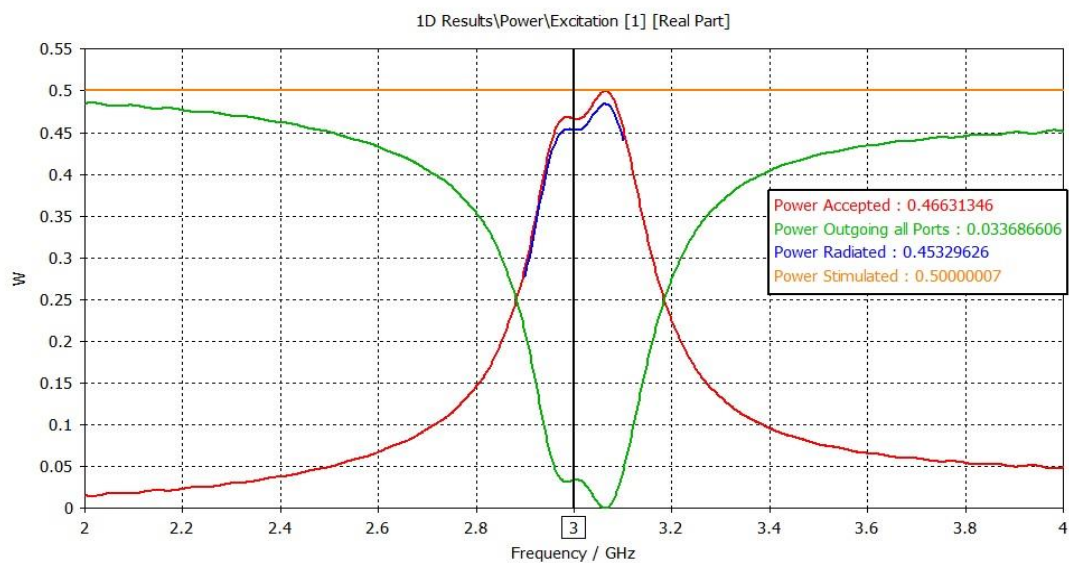


Σχήμα 5.36 Διάγραμμα της παραμέτρου S_{11}



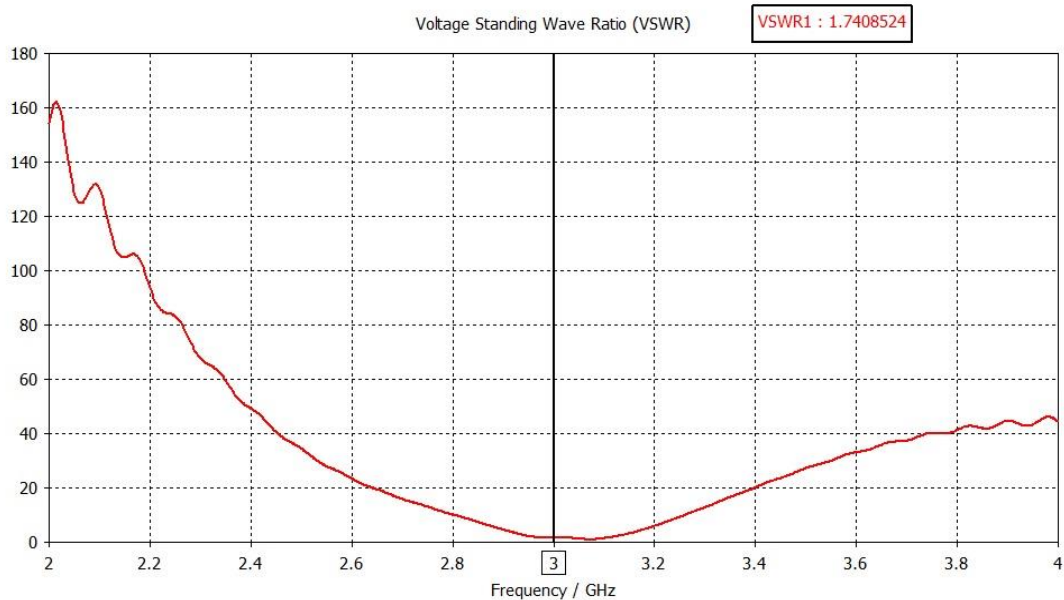
Σχήμα 5.37 Axial Ratio διάγραμμα σε σχέση με τη συχνότητα

Με βάση τα παραπάνω αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα, κρίνεται αναγκαία η μελέτη και των υπόλοιπων σημαντικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την ακτινοβολία και τη γενικότερη λειτουργία μιας κεραίας. Βασική τιμή προς εξέταση, είναι αυτή της εκπεμπόμενης ισχύος της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται πως με ενέργεια εισόδου τα 0.5 Watt, η συνολική ενέργεια που ακτινοβολήθηκε άγγιξε τα 0.45 Watt, καθιστώντας την κεραία ιδιαίτερος αποδοτική.



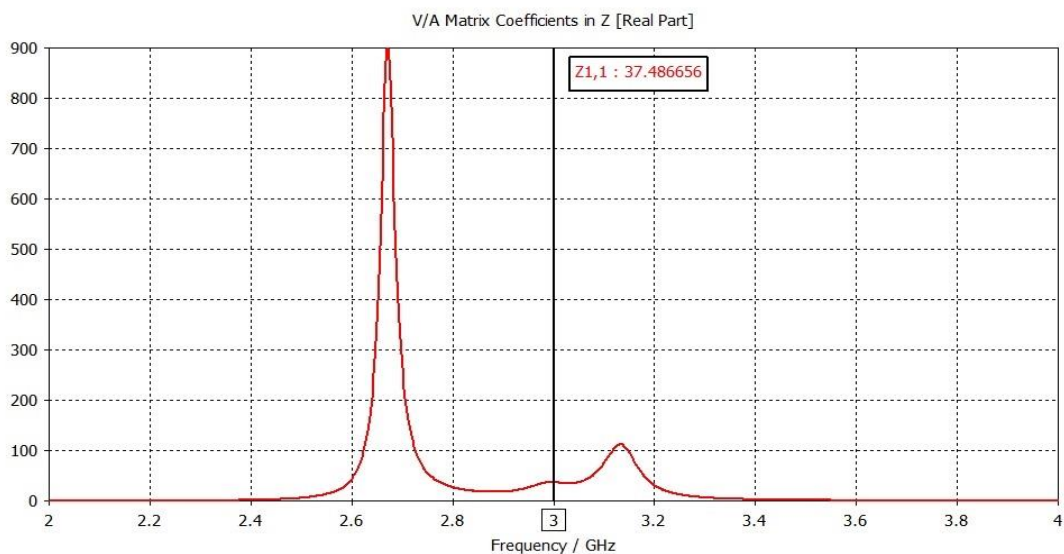
Σχήμα 5.38 Διάγραμμα ισχύος της κεραίας NOSCIPRA

Στη συνέχεια, μελετάται ο λόγος του στάσιμου κύματος (VSWR) της κεραίας. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται πως στην συχνότητα των 3 GHz, η τιμή του VSWR είναι 1.74, τιμή αρκετά κοντά στην άριστη της μονάδας, γεγονός που επίσης δείχνει το αρκετά μικρό ποσοστό της προσφερόμενης ενέργειας το οποίο τελικά ανακλάται και δεν οδεύει προς εκπομπή.



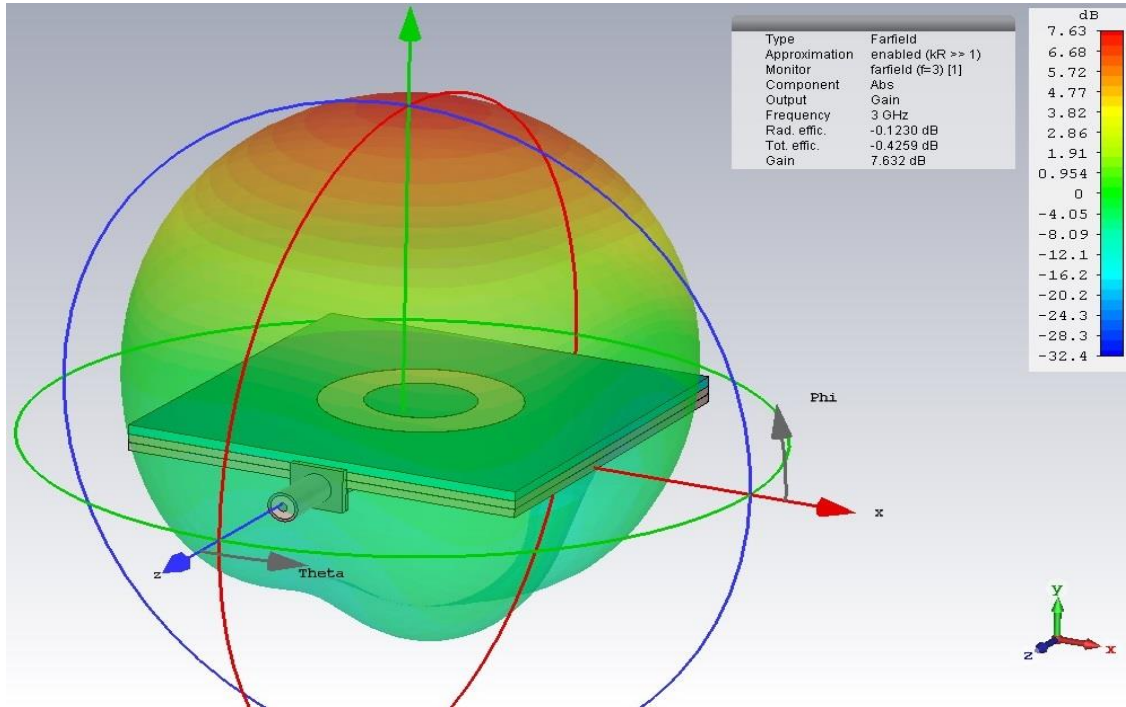
Σχήμα 5.39 Διάγραμμα του λόγου του στάσιμου κύματος της κεραίας NOSCIPRA

Σε ό,τι αφορά την τιμή του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης, αυτή βρίσκεται στα 37.49 Ω, γεγονός που φανερώνει την σχετικά καλή προσαρμογή της κεραίας ως προς την αντίσταση εισόδου.

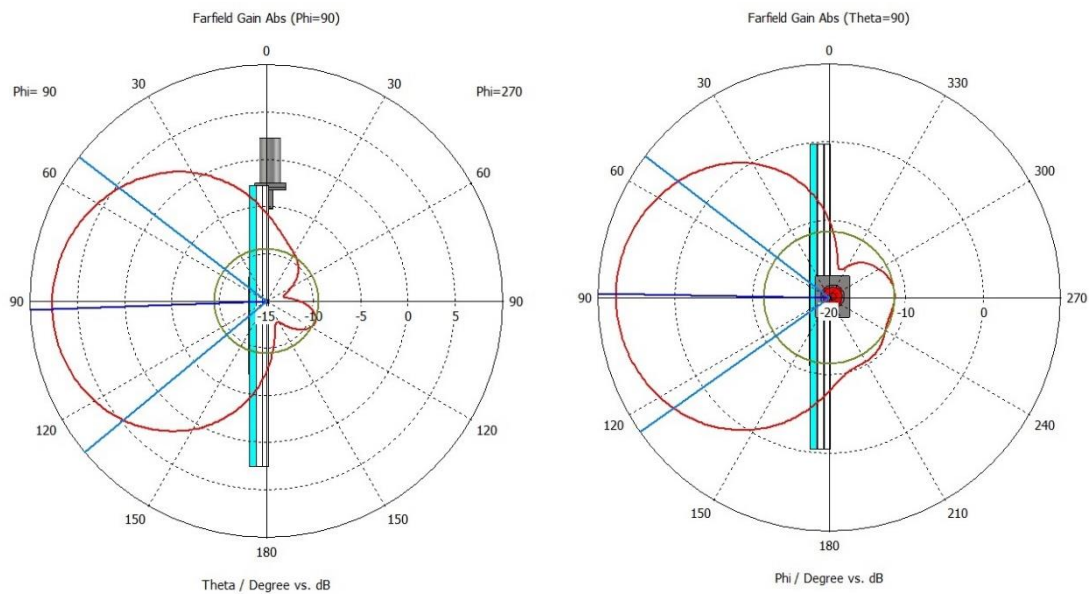


Σχήμα 5.40 Διάγραμμα του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης

Για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας της κεραίας, παρατίθεται ακολούθως το διάγραμμα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου τόσο σε τρισδιάστατη (σχήμα 5.41) όσο και πολική (polar) (σχήμα 5.42) μορφή.



Σχήμα 5.41 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας NOSICIPRA

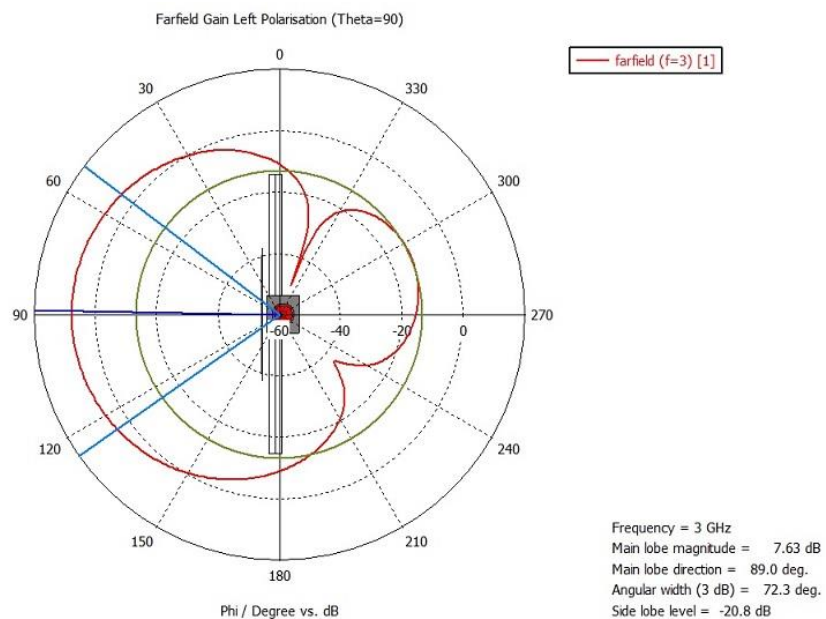


Σχήμα 5.42 Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας NOSICIPRA – όψη από το zy-επίπεδο (αριστερά) και το xy-επίπεδο (δεξιά)

Από το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να εξαγεί κανείς κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Το σημαντικότερο έχει να κάνει με το κέρδος που εμφανίζει η κεραία, με τιμή στα 7.63 dB. Με βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα τις πολύ μικρές της διαστάσεις, η κεραία εμφανίζει αξιοσημείωτο κέρδος, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερος αποδοτική παρά το μικρό της μέγεθος. Μάλιστα, όπως ήταν αναμενόμενο αλλά και επιθυμητό, η μέγιστη τιμή του κέρδους εμφανίζεται στο πεδίο του χώρου πάνω ακριβώς από την κορυφή της κεραίας, πάνω από το ακτινοβόλο επίθεμα δηλαδή (boresight).

Μάλιστα, επαληθεύοντας τα πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα της S_{11} παραμέτρου, ανάλογα παρουσιάζονται και οι τιμές του radiation efficiency και του total efficiency της κεραίας, όπως φαίνονται στο τρισδιάστατο διάγραμμα. Με αριθμούς που αγγίζουν τα -0.1230 dB και -0.4259 dB αντίστοιχα, έχοντας ως βέλτιστη τιμή τα 0 dB, εύκολα καταλαβαίνει κανείς πως η κεραία αποδίδει αρκούντως ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια της προσημείωσης. Εμφανίζει δηλαδή, ένα ποσοστό της τάξης άνω του 90% ισχύος που ακτινοβολείται σε σχέση με την ισχύ που εισήλθε στη διάταξη.

Τέλος, για το άκρως σημαντικό στοιχείο ακτινοβολίας που είναι η φορά της κυκλικής πόλωσης, το επόμενο διάγραμμα της προσομοίωσης προσδίδει αριστερή φορά στην πόλωση, γεγονός που θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν σε περίπτωση χρήσης της κεραίας σε πραγματικές συνθήκες.



Σχήμα 5.43 Διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολικές συντεταγμένες που εξηγεί τη φορά της κυκλικής πόλωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Συμπεράσματα

Βασικός στόχος της εργασίας αυτής ήταν η δημιουργία μίας μικροταινιακής κεραίας κυκλικής πόλωσης, για εφαρμογές δορυφορικών τηλεπικοινωνιών. Αρχικά, κρίθηκε αναγκαίο να γίνει κατανοητή στον αναγνώστη κάθε πτυχή της απαιτούμενης θεωρίας για την υλοποίηση της σχεδίασης, αλλά και τον τρόπο που αυτή εφαρμόζεται στην πράξη.

Με κύριο γνώμονα λοιπόν την εξοικείωση του αναγνώστη με το αντικείμενο της εργασίας, στα κεφάλαια 2,3 και 4 έγινε ενδελεχής αναφορά σε όλες εκείνες τις παραμέτρους που συνθέτουν το θέμα της εργασίας. Τυπωμένες γραμμές, μικροταινιακές κεραίες και δορυφορικές επικοινωνίες, αποτέλεσαν τον βασικό πυρήνα της θεωρίας, δημιουργώντας έτσι τον δρόμο που θα οδηγούσε στη δημιουργία της ζητούμενης μικροταινιακής κεραίας.

Μετά την λεπτομερή αναφορά στην απαιτούμενη θεωρία, το κεφάλαιο 5 ασχολείται με τον κύριο σκοπό της εργασίας. Την κατασκευή δηλαδή μιας μικροταινιακής κεραίας, η οποία θα εμφάνιζε όσο το δυνατόν καθαρότερη κυκλική πόλωση, ακτινοβολώντας στη συχνότητα των 3 GHz, έχοντας ταυτόχρονα τις μικρότερες δυνατές απώλειες ακτινοβολίας. Καταλαβαίνει εύκολα κανείς, πως το εγχείρημα αυτό διόλου εύκολο δεν θα μπορούσε να χαρακτηριστεί, απαιτώντας έτσι τη σταδιακή δημιουργία σχεδίων, που θα οδηγούσαν τελικά στο βέλτιστο και ζητούμενο αποτέλεσμα.

Έτσι, το κεφάλαιο ξεκίνησε με την κατασκευή δύο αρκετά απλοϊκών σχεδίων μικροταινιακής κεραίας ενός υποστρώματος, με μόνη διαφορά το σχήμα του ακτινοβόλου επιθέματος. Τα αποτελέσματα ειδικά της πρώτης σχεδίασης, αυτής με το τετραγωνικό επίθεμα, ήταν αρκετά ενθαρρυντικά, δίνοντας έτσι το έναυσμα για την περαιτέρω αξιοποίηση της σχεδίασης.

Στη συνέχεια, και μετά από αρκετές διαφορετικές δοκιμές, προέκυψε ένα αρκετά διαφοροποιημένο σχέδιο εν συγκρίσει με τα προηγούμενα, με βασική διαφορά το δίκτυο τροφοδοσίας της κεραίας, αλλά και την προσθήκη ενός ακόμη υποστρώματος. Μάλιστα, για ακόμη μία φορά, δημιουργήθηκαν όμοιες κατασκευές, με τη μόνη διαφορά τους να εντοπίζεται και πάλι στο σχήμα του μεταλλικού επιθέματος στην κορυφή. Και οι δύο αυτές υλοποιήσεις εμφάνισαν εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα, όχι όμως αρκετά ώστε να θεωρηθούν αξιοποιήσιμα. Όμως, η πηγή τροφοδοσίας όλων των παραπάνω κεραιών ήταν είτε μία ιδεατή θύρα κυματοδηγού είτε ένας ιδεατός ομοαξονικός συνδετήρας, κάτι που δεν αντικατόπτριζε επακριβώς την πραγματικότητα. Έτσι, αποφασίστηκε η δημιουργία και η χρήση ενός SMA connector, ο οποίος θα ήταν βασισμένος σε πραγματική υλοποίηση. Κατά συνέπεια, ο SMA connector ενσωματώθηκε σε μία εκ των δύο τελευταίων σχεδιάσεων, δημιουργώντας έτσι μία κατασκευή που ανταποκρίνεται 100% στην πραγματικότητα. Τα αποτελέσματα όμως της πρώτης αυτής προσπάθειας, δεν υπήρξαν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά.

Συνέπεια αυτού, ήταν η επιτακτική ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία της σχεδίασης, αλλά κυρίως για σημαντική αλλαγή στα φυσικά χαρακτηριστικά της κεραίας. Κρατώντας λοιπόν ως βάση την παραπάνω σχεδίαση, τροποποιώντας το δίκτυο τροφοδοσίας και προσθέτοντας ακόμη ένα υπόστρωμα, προέκυψε το τελικό σχέδιο μικροταινιακής κεραίας, που εμφάνισε σχεδόν άριστα αποτελέσματα. Η κεραία αυτή, αποτελεί σχέδιο τύπου NOSCIPRA, μιας σχετικά περίπλοκης διάταξης, της οποίας όμως οι τιμές των υπό εξέταση παραμέτρων χαρακτηρίζονται από το αρκετά θετικό τους πρόσημο.

Πιο συγκεκριμένα, από το διάγραμμα της S_{11} παραμέτρου φάνηκε καθαρά πως η ανάκλαση του ποσοστού της ενέργειας που εισέρχεται στην κεραία μέσω του SMA connector, περιορίζεται σε λιγότερο από το 10% (-11.36 dB) της συνολικής, γεγονός αρκετά επιθυμητό. Το σπουδαιότερο όμως αποτέλεσμα, προέκυψε από το Axial Ratio διάγραμμα, καθώς η τιμή του άγγιξε τα 0.28 dB και μάλιστα για μια αρκετά σεβαστή τιμή του 3-dB bandwidth (1.16 %), προσδίδοντας έτσι σχεδόν τέλεια μορφή κυκλικής πόλωσης στην ακτινοβολούμενη ενέργεια. Επίσης, αρκετά θετικές ήταν και οι τιμές της παραγόμενης ισχύος και του VSWR.

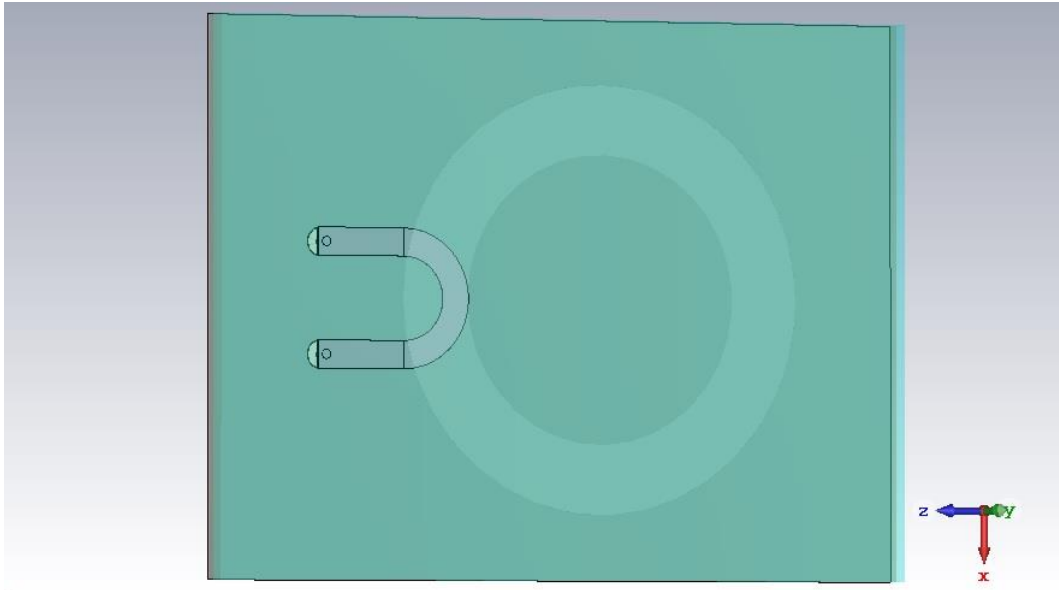
6.2 Μελλοντική έρευνα

Όπως αναλύθηκε εκτενώς και στο κεφάλαιο 3, τα πλεονεκτήματα των μικροταινιακών κεραιών είναι αναρίθμητα, και η χρήση τους αυξάνει ολοένα και περισσότερο στη σύγχρονη τεχνολογία, κυρίως μάλιστα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα πάνω στην περαιτέρω αξιοποίηση των θετικών χαρακτηριστικών αυτών των κεραιών θα πρέπει να συνεχιστεί με αμείωτο ρυθμό, προσφέροντας ακόμα περισσότερες εφαρμογές στις ήδη υπάρχουσες.

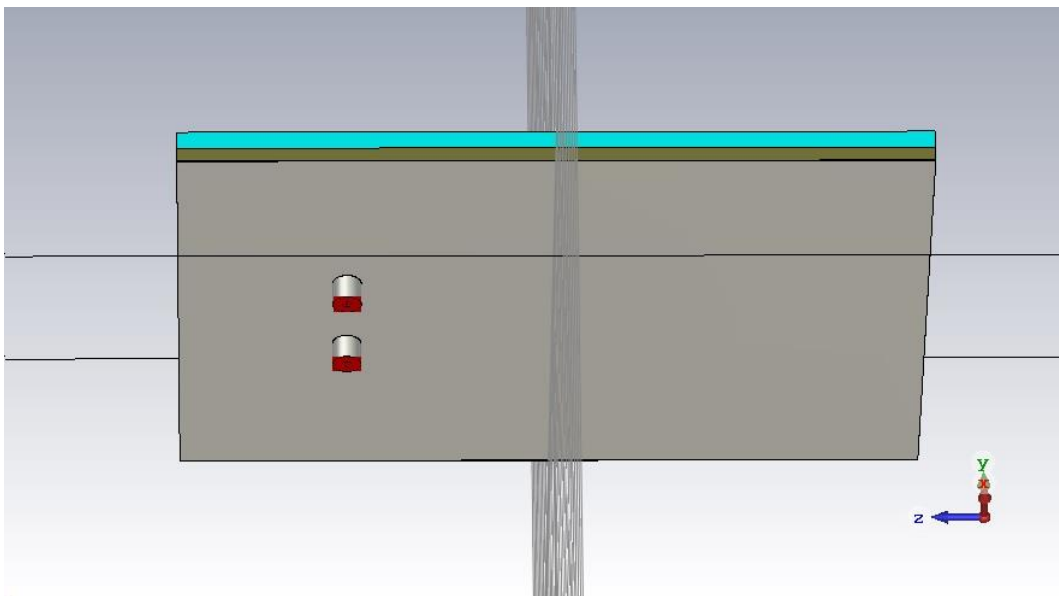
Σπουδαία σημασία για την εξέλιξη της παρούσας εργασίας, θα επέφερε η τεχνική υλοποίηση της κεραίας, η εκτύπωσή της δηλαδή με φυσικά μέσα, αλλά και η σύνδεσή της με τον SMA connector που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση. Έτσι, θα μπορούσε να μετρηθεί σε πραγματικές συνθήκες ο συντελεστής ανάκλασης της ενέργειας (S_{11} παράμετρος), όπως και να μετρηθεί το μακρινό πεδίο της κεραίας μέσα σε έναν ανηχοϊκό θάλαμο.

Μια ακόμη σημαντική μελέτη που θα μπορούσε να γίνει μελλοντικά, είναι η δημιουργία μιας μικροταινιακής κεραίας επαναπροσδιοριζόμενης (reconfigurable) πόλωσης. Μάλιστα, πρέπει να τονιστεί εδώ, πως κατά τη διάρκεια της μελέτης της παρούσας εργασίας και της διεξαγωγής των προσομοιώσεων των διαφόρων μοντέλων, υπήρξε η απόπειρα δημιουργίας ενός σχετικού μοντέλου μικροταινιακής κεραίας, χωρίς όμως τον απαιτούμενο χρόνο για την βελτιστοποίηση των σχεδίων. Ως έναυσμα για την διόρθωσή τους αλλά και την περαιτέρω αξιοποίησή τους, παρατίθενται παρακάτω δύο βασικές προσπάθειες υλοποίησης μιας επαναπροσδιοριζόμενης ως προς την πόλωση κεραίας.

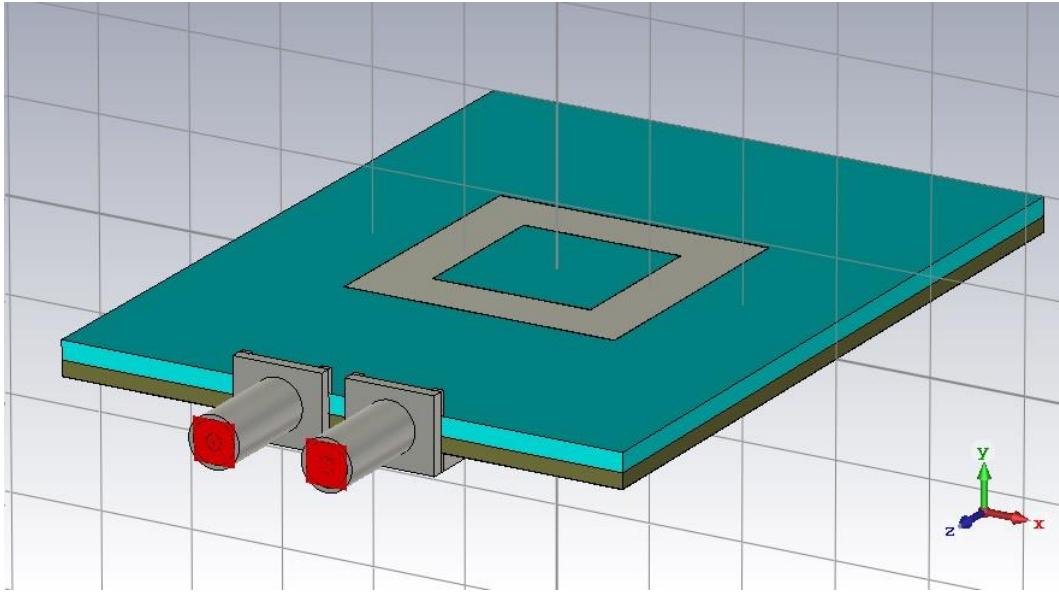
Η πρώτη προσπάθεια αφορά μια παραλλαγή των κεραιών των παραγράφων 5.4, 5.5 και 5.6. Η βασική διαφορά έγκειται στην ύπαρξη μιας ακόμη πηγής τροφοδοσίας σε ακριβώς αντιδιαμετρικό σημείο με την πρώτη, δίνοντας έτσι αντίθετη φορά στο ρεύμα, δημιουργώντας τελικά πόλωση επίσης αντίθετης φοράς με την αρχική. Όπως φαίνεται και στα επόμενα σχήματα, δύο σχέδια χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη υλοποίηση, ένα με τη χρήση δύο ιδεατών ομοαξονικών συνδετήρων (σχήματα 6.1 & 6.2), και ένα με τη χρήση δύο SMA connectors (σχήματα 6.3 & 6.4).



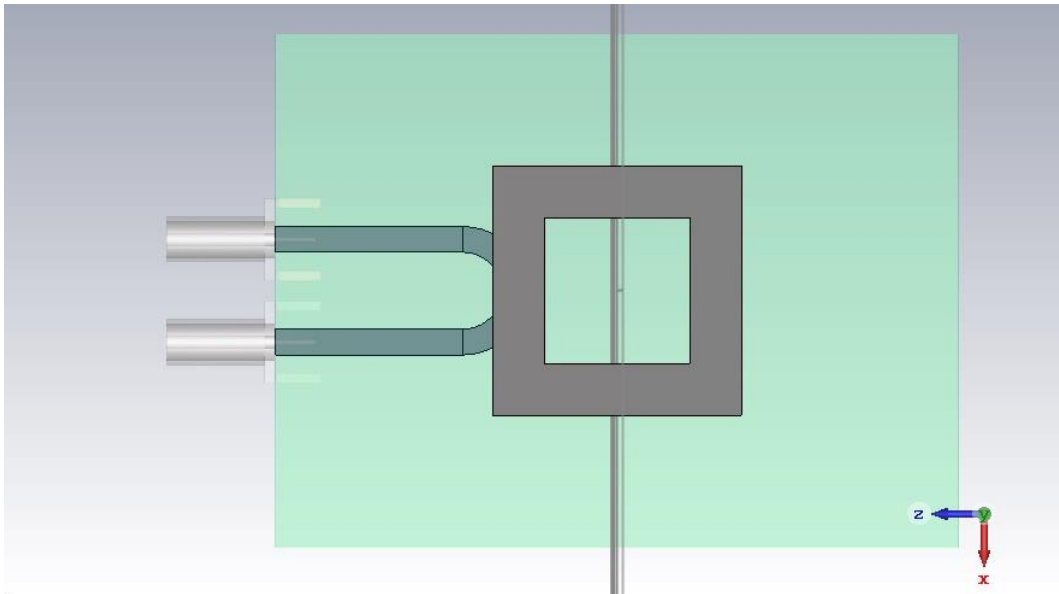
Σχήμα 6.1 Εσωτερική όψη της κεραίας – Διακρίνεται η σχετική θέση του μεταλλικού πετάλου σε σχέση με τον κυκλικό δακτύλιο της επιφάνειας αλλά και η σύνδεση των δύο πλευρών του με τους δύο ομοαξονικούς συνδετήρες



Σχήμα 6.2 Κάτω πλευρά της κεραίας – Διακρίνονται οι δύο ομοαξονικοί συνδετήρες, οι οποίοι τροφοδοτούνται από δύο θύρες κυματοδηγού

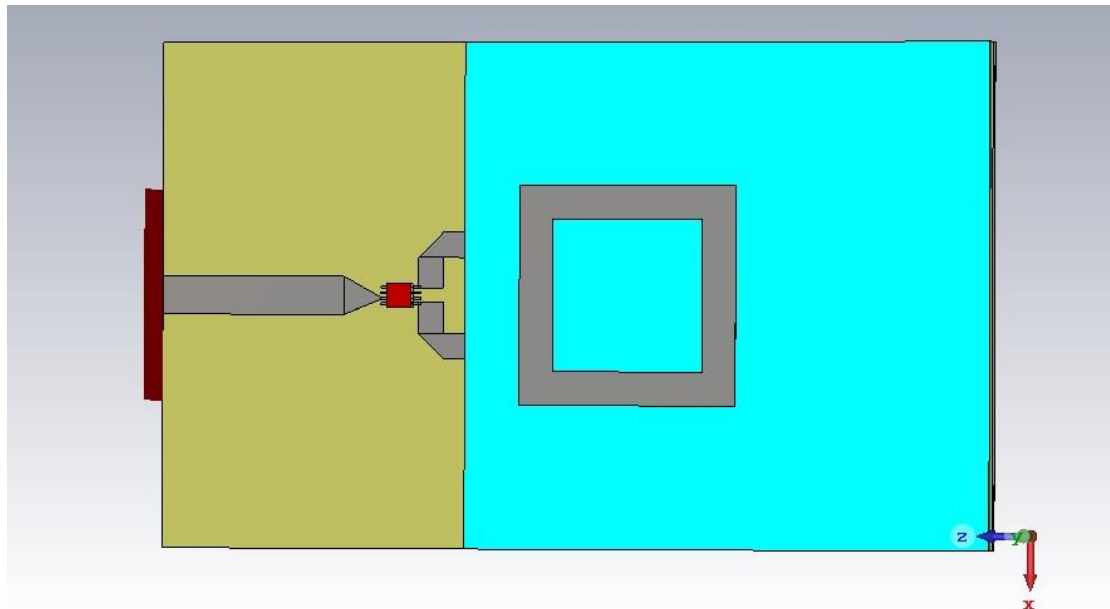


Σχήμα 6.3 Αποψη της κεραίας η οποία χρησιμοποιεί δύο SMA connectors (κατ' επιλογή) για την τροφοδοσίας της

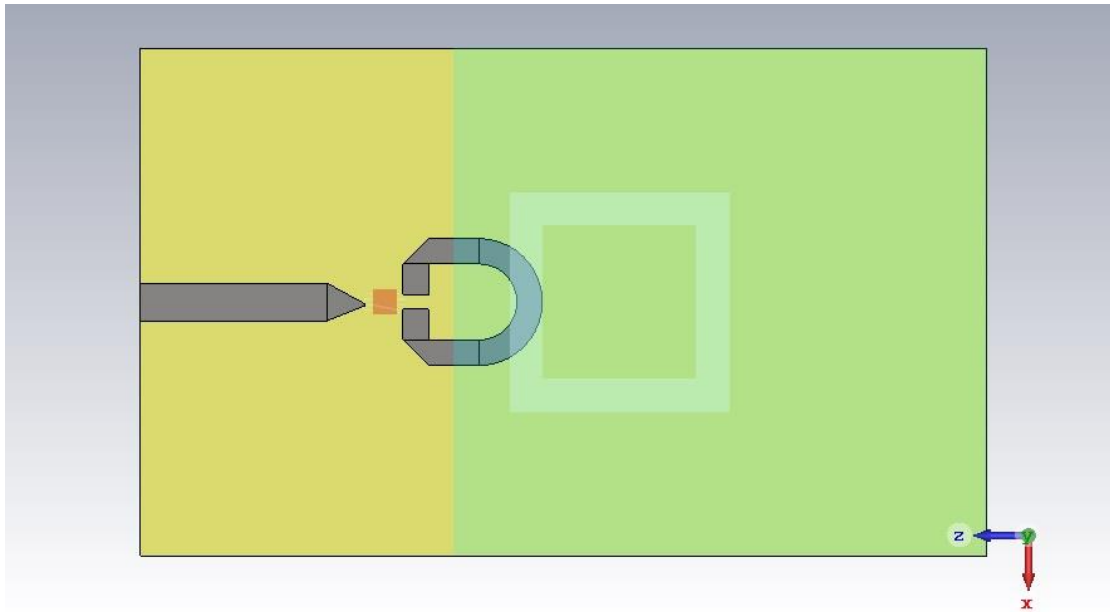


Σχήμα 6.4 Εσωτερική όψη της κεραίας - Διακρίνεται η σχετική θέση του μεταλλικού πετάλου σε σχέση με τον τετραγωνικό δακτύλιο της επιφάνειας αλλά και ο τρόπος σύνδεσης των πλευρών του πετάλου με τους δύο SMA connectors

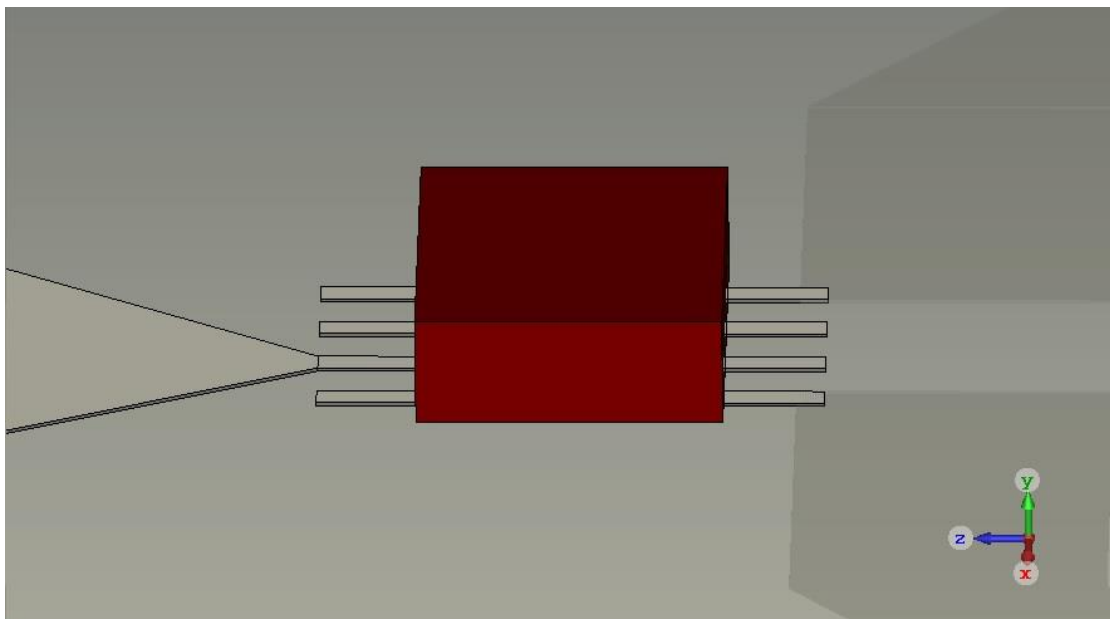
Ένα ακόμη πιο φιλόδοξο σχέδιο, ήταν η δημιουργία μιας μικροταινιακής κεραίας στην οποία θα ήταν προσαρτημένο έναν διακόπτη (switch), το οποίο θα επέτρεπε την εκτροπή της εισερχόμενης ενέργειας, από μία μόνο πηγή, με στόχο την κατ' επιλογή αλλαγή της φοράς πόλωσης. Έτσι, κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε το switch HMC536MS8G, με μέγιστη συχνότητα λειτουργίας τα 6 GHz. Ως βάση χρησιμοποιήθηκε και πάλι η κεραία της παραγράφου 5.4, προσδίδοντας όμως κάποιες αναγκαστικές αλλαγές στον τρόπο τροφοδοσίας της, ούτως ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σωστά το switch πάνω στην υπόλοιπη διάταξη. Στα επόμενα σχήματα φαίνονται όλες οι αλλαγές στα στοιχεία της κεραίας, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο το switch έρχεται σε επαφή με αυτά.



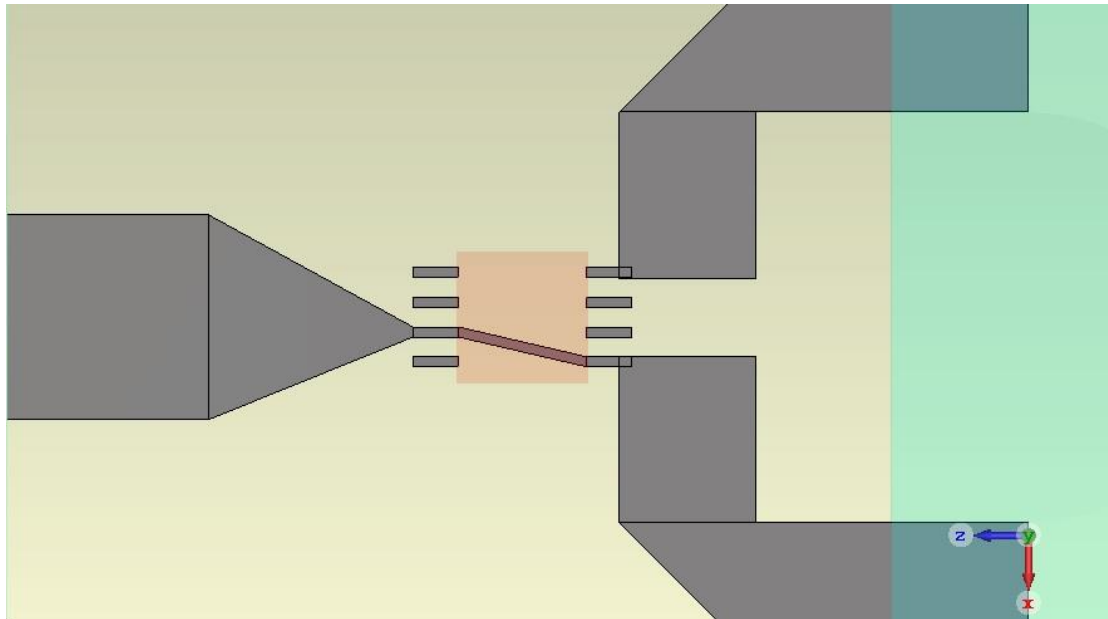
Σχήμα 6.5 Άποψη της reconfigurable κεραίας – Διακρίνονται κατά σειρά από αριστερά: Ενδιάμεσα των δύο υποστρωμάτων – η θύρα κυματοδηγού, η τυπωμένη γραμμή υπεύθυνη για τη μεταφορά της ενέργειας τροφοδοσίας, το switch και οι άκρες των πλευρών του πετάλου - Στο πάνω μέρος της κεραίας (δεύτερο υπόστρωμα) βρίσκεται ο τετραγωνικός δακτύλιος



Σχήμα 6.6 Εσωτερικό της reconfigurable κεραίας – Διακρίνεται η θέση του πετάλου μεταξύ των δύο υποστρωμάτων σε σχέση με αυτή του ακτινοβόλου επιθέματος της κορυφής



Σχήμα 6.7 Άποψη του switch – Διακρίνεται ο τρόπος σύνδεσης του στα αριστερά με την τυπωμένη γραμμή τροφοδοσίας μέσω μεταλλικής τριγωνικής επιφάνειας, και στα δεξιά τα δύο σημεία επαφής του με τις πλευρές του πετάλου



Σχήμα 6.8 Εσωτερική δομή του switch – Διακρίνεται μία μεταλλική γραμμή η οποία ενώνει το pin εισόδου με αυτό της εξόδου στα δεξιά

Για λόγους απλούστευσης, το switch κατασκευάστηκε κατ' αυτή τη μορφή, και σε ό,τι αφορά τον τρόπο επιλογής του pin εξόδου της ενέργειας, εδώ επιλέχθηκε τυχαία η δεξιά διάδος (σχήμα 6.8). Σχηματικά, αυτό έγινε με την χρήση μιας τυπωμένης μεταλλικής γραμμής στο κάτω μέρος του switch, η οποία συνδέει το pin εισόδου του switch με το επιλεγμένο pin εξόδου. Στην πραγματικότητα, η επιλογή της διάδου, γίνεται με την εφαρμογή μικρής τάσης σε μία εκ των δύο ακριανών pin της εξωτερικής μεριάς του switch, ακολουθώντας έναν πίνακα αληθείας, ο οποίος προσδιορίζει τελικά την επιλογή αυτή.

Τέλος, εξίσου σημαντική θα ήταν και η μελέτη – δημιουργία μιας συστοιχίας μικροταινιακών κεραιών τύπου NOSCIPRA, καθώς λόγω του σχετικά μικρού κέρδους που εμφανίζει η κεραία μεμονωμένα, μόνο με τη μορφή συστοιχίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα πραγματικό σύστημα δορυφορικών τηλεπικοινωνιών. Ο συνδυασμός δηλαδή ενός αριθμού κεραιών NOSCIPRA σε μία συγκεκριμένη διάταξη, θα μπορούσε να επιφέρει το απαιτούμενο συνολικό κέρδος αλλά και bandwidth, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί απρόσκοπτη επικοινωνία με έναν LEO δορυφόρο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

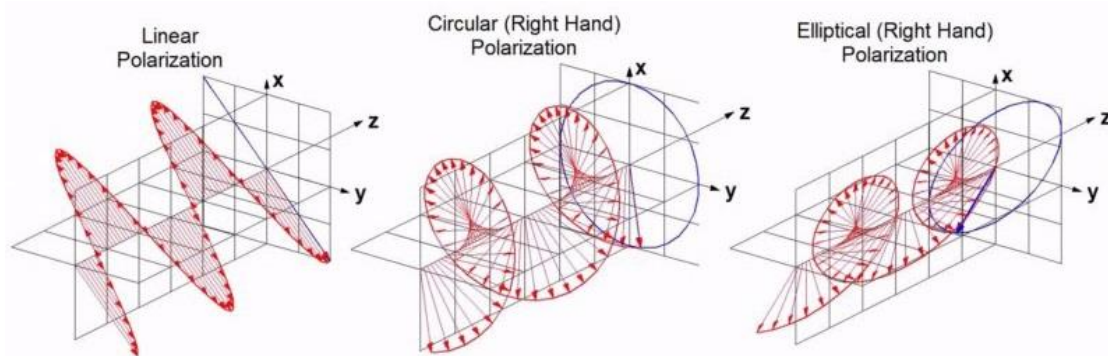
A.1 Πόλωση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Η πόλωση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος περιγράφεται από τη διεύθυνση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Όταν το κύμα είναι μη πολωμένο, το διάνυσμα του ηλεκτρικού του πεδίου κινείται τυχαία στον χώρο χωρίς να εμφανίζει συγκεκριμένη κατεύθυνση. Όταν όμως το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου διαγράφει μια ορισμένη τροχιά στον χώρο, τότε το κύμα θεωρείται πολωμένο.

Ανάλογα με τη διεύθυνση ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου διακρίνονται τρία είδη πόλωσης. Το πρώτο είδος αφορά ένα γραμμικά πολωμένο κύμα το οποίο παρουσιάζει τη λεγόμενη **γραμμική** πόλωση. Αυτό συμβαίνει όταν η διεύθυνση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} είναι η ίδια κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται συνεχώς πάνω στην ίδια ευθεία.

Αντίστοιχα, όταν το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου διαγράφει κυκλική τροχιά, τότε η πόλωση ονομάζεται **κυκλική**. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η μορφή πόλωσης, προέρχεται από τη σύνθεση δύο γραμμικά πολωμένων κυμάτων με διευθύνσεις πόλωσης κάθετες μεταξύ τους, των οποίων η ταλάντωση των ηλεκτρικών τους πεδίων εμφανίζει ίδια συχνότητα και διαφορά φάσης 90° .

Τέλος, γενικευμένη περίπτωση των δύο ανωτέρω μορφών πόλωσης, αποτελεί η **ελλειπτική** πόλωση. Αυτή εμφανίζεται όταν το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} διαγράφει μια ελλειπτική τροχιά. Ειδικότερα, ένα ελλειπτικά πολωμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να δημιουργηθεί όπως ένα κυκλικά πολωμένο, με τη διαφορά πως τα δύο κάθετα κύματα δεν εμφανίζουν το ίδιο πλάτος.

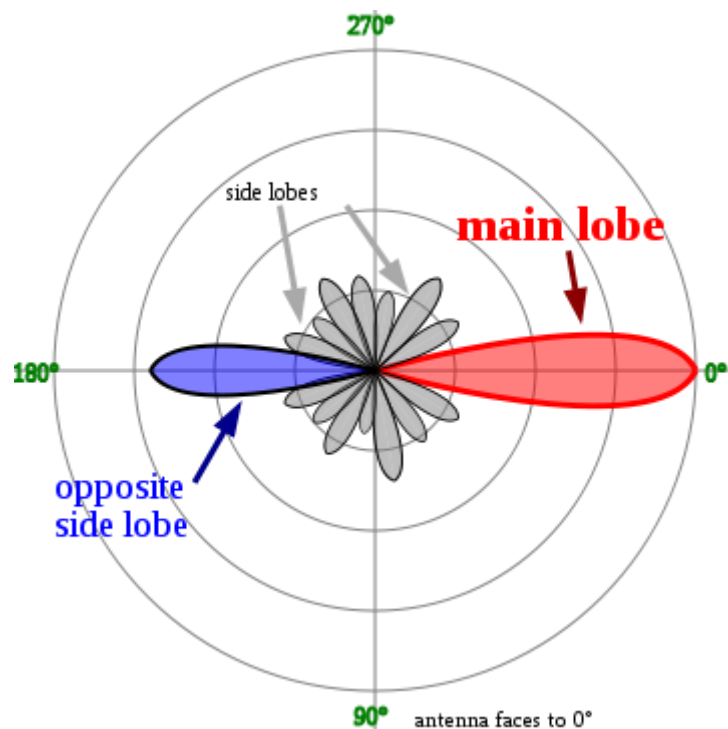


Σχήμα A. 1 Γραμμική πόλωση κύματος (αριστερά) Κυκλική πόλωση κύματος (κέντρο)
Ελλειπτική πόλωση κύματος (δεξιά)

A.2 Διάγραμμα Ακτινοβολίας

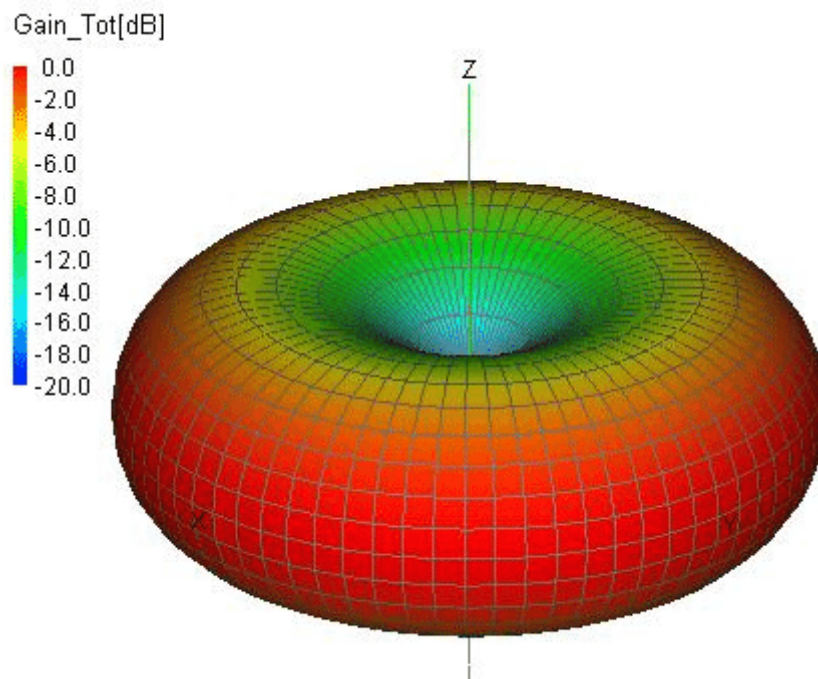
Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας εκφράζει τη μεταβολή της ισχύος που εκπέμπεται από αυτή ως συνάρτηση της κατεύθυνσης ή των χωρικών συντεταγμένων μακριά από την κεραία. Αυτή η μεταβολή της ισχύος ως συνάρτηση της κατεύθυνσης παρατηρείται στο λεγόμενο μακρινό πεδίο (farfield) της κεραίας.

Κάθε κεραία ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει (κατευθυντική ή μη) παρουσιάζει συγκεκριμένα μοτίβα στο διάγραμμα ακτινοβολίας. Σε μία κατευθυντική κεραία, ο κύριος λοβός ακτινοβολίας (main lobe) είναι το τμήμα του διαγράμματος που ξεχωρίζει λόγω των μέγιστων τιμών που λαμβάνει. Η βαθμονόμηση του διαγράμματος ακτινοβολίας γίνεται σε μοίρες (360°) και συνήθως ο άξονας του κύριου λοβού τοποθετείται στις 0° . Ο λοβός που βρίσκεται 180° αντίθετα από τον κύριο λοβό ονομάζεται οπίσθιος λοβός και κατά περίπτωση είναι επιθυμητός. Οι υπόλοιποι λοβοί που εμφανίζονται στο διάγραμμα, ονομάζονται πλευρικοί λοβοί ακτινοβολίας και συνήθως απεικονίζουν ακτινοβολία σε μη επιθυμητές κατευθύνσεις, φαινόμενο αρκετά συνηθισμένο. Επίσης, υπάρχουν σημεία, τα λεγόμενα σημεία μηδενισμού, στα οποία τα εκπεμπόμενα κύματα συναντώνται με διαφορά φάσης 180° , μηδενίζοντας έτσι τη συνολική ακτινοβολία εκεί.



Σχήμα A. 2 Απεικόνιση σε δύο διαστάσεις ενός τυπικού κατευθυντικού διαγράμματος ακτινοβολίας – Διακρίνονται ο κύριος λοβός ακτινοβολίας, ο οπίσθιος και οι πλευρικοί

Στο σχήμα A.2 απεικονίζεται σε δύο διαστάσεις (2-D) το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κατευθυντικής κεραίας, το οποίο εμφανίζει όλα τα παραπάνω προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Η απεικόνιση όμως του διαγράμματος σε δύο διαστάσεις, γίνεται κυρίως για λόγους ευκολίας και καλύτερης κατανόησης του τρόπου ακτινοβολίας της κεραίας. Είναι όμως αρκετά συνήθης και η αναπαράσταση της ακτινοβολίας σε διάγραμμα τριών διαστάσεων (3-D), το οποίο επί της ουσίας είναι η σύνθεση όλων των 2-D διαγραμμάτων της κεραίας. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο μίας ομοιοκατευθυντικής (omnidirectional) κεραίας, η οποία ακτινοβολεί συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα πάνω στον οποίο βρίσκεται.



Σχήμα A. 3 Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο μιας ομοιοκατευθυντικής κεραίας

A.3 Εμπέδηση Κεραιών

Ένα πολύ βασικό χαρακτηριστικό στη μελέτη των κεραιών, αποτελεί το μέγεθος της σύνθετης αντίστασης εισόδου της κεραίας, ή αλλιώς εμπέδηση της κεραίας. Η τιμή αυτή εκφράζει την αντίσταση η οποία εάν τεθεί στο άκρο της γραμμής τροφοδοσίας αντί της κεραίας, θα λάβει την ίδια ισχύ με αυτή που θα λάμβανε η κεραία.

Η σύνθετη αντίσταση, εξ ου και η ονομασία της, αποτελείται από δύο μέρη, το πραγματικό και το φανταστικό, με τη σχέση που τη χαρακτηρίζει να είναι της μορφής $Z_{in} = R + jX$, όπου R είναι η ωμική αντίσταση και X η αντίδραση. Βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία της κεραίας, είναι το πραγματικό μέρος να βρίσκεται πολύ κοντά στην τιμή των 50Ω , όσο και η χαρακτηριστική αντίσταση του ομοαξονικού καλωδίου, και το φανταστικό μέρος να αγγίζει τα 0Ω . Μάλιστα, η τιμή που εμφανίζει το φανταστικό μέρος, θετική ή αρνητική, καθορίζει το είδος της ενέργειας (επαγωγική ή χωρητική) που αποθηκεύεται κατά την είσοδό της στην κεραία.

Σε ό,τι αφορά την τιμή της σύνθετης αντίστασης εισόδου, αυτή εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες. Ο πρώτος αφορά τη γεωμετρία και τον τρόπο κατασκευής της κεραίας, και ο δεύτερος το περιβάλλον λειτουργίας στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί η κεραία. Στις περισσότερες όμως των περιπτώσεων, το στοιχείο που επηρεάζει άμεσα και κατά μεγαλύτερο ποσοστό την τιμή της σύνθετης αντίστασης, είναι η γεωμετρία της κεραίας. Το γεγονός αυτό καθιστά τη διαδικασία κατασκευής της αρκετά απαιτητική, καθώς εκτός από την επίτευξη ικανοποιητικών τιμών ακτινοβολίας, είναι σημαντική και η σωστή προσαρμογή της κεραίας, κάτι που αντικατοπτρίζει η τιμή της σύνθετης αντίστασης.

A.4 Παράμετροι Σκέδασης (S-Parameters)

Οι S-παράμετροι περιγράφουν τη σχέση που χαρακτηρίζει τη ροή ενέργειας μέσα σε ένα μικροκυματικό κύκλωμα, ως συνάρτηση των θυρών (ports) εισόδου-εξόδου του κυκλώματος αυτού. Αφορούν δε μία προκαθορισμένη συχνότητα λειτουργίας, και θεωρούν ως port κάθε σημείο του κυκλώματος στο οποίο μπορεί να εφαρμοστεί τάση και να εισέλθει ρεύμα κάποιας έντασης.

Πιο συγκεκριμένα, για ένα μικροκυματικό κύκλωμα που περιλαμβάνει N αριθμό θυρών, υπάρχουν N^2 S -παράμετροι που μπορούν να το περιγράψουν. Για παράδειγμα, ένα κύκλωμα με μία θύρα εισόδου-εξόδου, χαρακτηρίζεται μόνο από την παράμετρο S_{11} . Ένα κύκλωμα με δύο θύρες, χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$, οι οποίες συνήθως παρίστανται με τη μορφή πίνακα ως εξής: $\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}$ για τις δύο θύρες, ή $\begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{pmatrix}$ για ένα N -θυρο κύκλωμα, με $N \geq 2$.

Το τυχαίο στοιχείο S_{ij} του ανωτέρω πίνακα, υποδηλώνει το ποσοστό της ενέργειας το οποίο καταλήγει τελικά στη θύρα i του κυκλώματος, σε σχέση με την ποσότητα της ενέργειας που εισήλθε αρχικά στο κύκλωμα από τη θύρα j . Με άλλα λόγια, η S_{ij} - παράμετρος, προσδιορίζει το κλάσμα της ενέργειας που μεταδίδεται από τη θύρα j στη θύρα i του κυκλώματος, για δεδομένη συχνότητα και χαρακτηριστική εμπέδηση Z_o του συστήματος.

Σε ό,τι αφορά το θέμα της παρούσας εργασίας, καθώς εξετάστηκε και κατασκευάστηκε τελικά ένα μονόθυρο κύκλωμα, η μοναδική παράμετρος σκέδασης που το χαρακτηρίζει είναι η S_{11} , και προσδιορίζει το ποσοστό της ενέργειας που προήλθε από τη θύρα 1 και κατέληξε πάλι σε αυτή, τη λεγόμενη και ανακλώμενη ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή λοιπόν, η παράμετρος S_{11} ταυτίζεται με τον συντελεστή ανάκλασης, ο οποίος ορίζεται ως $\Gamma = S_{11} = V_o/V_i$, με V_i το εισερχόμενο και V_o το εξερχόμενο σήμα τάσης.

Για την ομαλή λειτουργία μια κεραίας, ο συντελεστής ανάκλασης θα πρέπει να βρίσκεται κάτω από την τιμή των -10 dB στη ζητούμενη συχνότητα λειτουργίας της, ούτως ώστε το ποσοστό της ενέργειας που ανακλάται πίσω να είναι λιγότερο από το 10% της συνολικής, αφήνοντας έτσι το υπόλοιπο ποσοστό με τιμή άνω του 90% να οδηγηθεί προς ακτινοβολία.

A.5 VSWR

Η παράμετρος VSWR ή αλλιώς Voltage Standing Wave Ratio, αποτελεί μία συνάρτηση του συντελεστή ανάκλασης Γ (ή S_{11}) και περιγράφει την ενέργεια που ανακλάται από την υπό εξέταση κεραία. Δεδομένου λοιπόν του συντελεστή ανάκλασης Γ , η παράμετρος VSWR ορίζεται ως:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Όπως φαίνεται καθαρά από την παραπάνω σχέση, η τιμή του VSWR είναι πάντοτε πραγματική και θετική, με ελάχιστη τιμή το 1. Σε αυτή την περίπτωση, που είναι και η ιδεατή, ο συντελεστής ανάκλασης Γ έχει την τιμή 0, που σημαίνει ότι όλη η ενέργεια που παρέχεται στην κεραία οδεύει προς ακτινοβολία, και πως κανένα ποσοστό αυτής δεν ανακλάται πίσω.

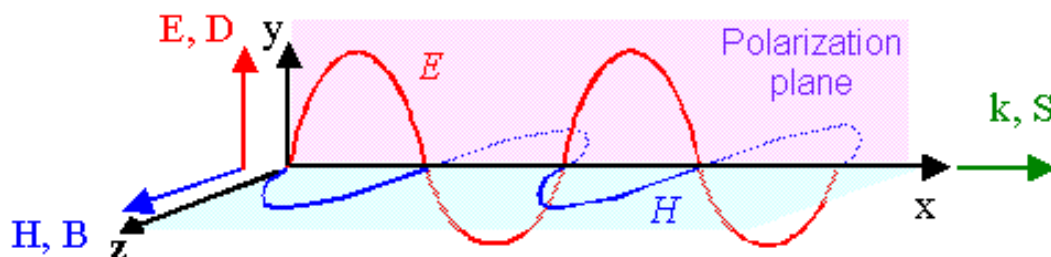
Μάλιστα, πολλές φορές κατά την κατασκευή μιας κεραίας, ζητείται η ταυτόχρονη ικανοποίηση των τιμών τουλάχιστον δύο παραμέτρων, όπως είναι το bandwidth και το VSWR. Για παράδειγμα, ζητείται μία κεραία να λειτουργεί μεταξύ των 2.9 GHz και των 3.1 GHz, εμφανίζοντας παράλληλα $VSWR < 2$. Αυτό σημαίνει πως η κεραία πρέπει να λειτουργεί με bandwidth στα 200 MHz, και να εμφανίζει συντελεστή ανάκλασης < 0.333 , τιμή που αντιστοιχεί σε περίπου -9 dB ανακλώμενης ενέργειας.

Σημαντικό όμως να τονιστεί εδώ, πως ενώ το VSWR είναι μία παράμετρος που δείχνει το ποσό της ενέργειας που καταφθάνει τελικά στην κεραία, δεν ορίζει ακριβώς το ποσοστό της ενέργειας που τελικά θα ακτινοβοληθεί, καθώς η συνολική γεωμετρία της κεραίας, αλλά και το περιβάλλον στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί, είναι πιθανό να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα της ακτινοβολίας.

A.6 Διάνυσμα Poynting

Το διάνυσμα Poynting αναπαριστά τη μεταφορά ενέργειας ενός Η/Μ κύματος ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας, και επί της ουσίας περιγράφει τη ροή ενέργειας (σε W/m^2) ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε κάποιο μέσο διάδοσης.

Για παράδειγμα, το διάνυσμα Poynting μέσα σε έναν διηλεκτρικό μονωτή ενός ομοαξονικού καλωδίου είναι σχεδόν παράλληλο στον άξονα του σύρματος, ούτως ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να ρέει διαμέσου του διηλεκτρικού μεταξύ των αγωγών. Πιο συγκεκριμένα, η κατεύθυνση της ενεργειακής ροής είναι κάθετη στα διανύσματα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου (\mathbf{E} και \mathbf{H} αντίστοιχα), και ταυτίζεται με την κατεύθυνση του διανύσματος Poynting. Συνεπώς, το διάνυσμα Poynting μπορεί να οριστεί ως το εξωτερικό γινόμενο των \mathbf{E} και \mathbf{H} διανυσμάτων, και συγκεκριμένα από τη σχέση $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$. Στο επόμενο σχήμα διακρίνεται η κατεύθυνση του διανύσματος Poynting (\mathbf{S}), σε σχέση με αυτή του ηλεκτρικού \mathbf{E} και μαγνητικού \mathbf{H} πεδίου, κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον χώρο.



Σχήμα A. 4 Απεικόνιση του διανύσματος Poynting κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον χώρο

A.7 CST

Ο Ηλεκτρομαγνητικός Προσομοιωτής CSTTM διαθέτει ένα αρκετά εύχρηστο σχεδιαστικό περιβάλλον το οποίο προσφέρεται για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη πολύπλοκων ρεαλιστικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των μοντέλων προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων Maxwell μέσω κατάλληλων αλγορίθμων.

Όπως και τα υπόλοιπα πακέτα αντίστοιχου λογισμικού, έτσι και το πρόγραμμα CSTTM δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης πολύπλοκων γεωμετριών, προσφέροντας ταυτόχρονα έλεγχο για τυχόν σφάλματα κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, αλλά και δυνατότητα απεικόνισης όλων των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που συνοδεύουν τα παραχθέντα αποτελέσματα. Σπουδαιότερη όμως συμβολή ενός ηλεκτρομαγνητικού προσομοιωτή είναι η δραστική μείωση του χρόνου που απαιτείται για τον σχεδιασμό και κυρίως για την επίλυση όλων εκείνων των αριθμητικών μεθόδων που είναι απαραίτητες για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά την επίλυση μιας προσομοίωσης ως προς τον επιθυμητό υπολογιστικό χώρο, και διαχωρίζονται στις χωρικές και στις επιφανειακές μεθόδους. Οι μεν χωρικές μέθοδοι, αφορούν τη διακριτοποίηση του χώρου προσομοίωσης τόσο σε όλη την έκταση της υπό μελέτης διάταξης, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο. Οι δε επιφανειακές μέθοδοι, περιγράφουν τη διακριτοποίηση μόνο των επιφανειών των γεωμετρικών κατασκευών, και την επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών εξισώσεων πάνω σε αυτές.

Η επιλογή όμως μιας υπολογιστικής μεθόδου, δεν αρκεί για την επίλυση ενός ηλεκτρομαγνητικού συστήματος. Σπουδαίο ρόλο επιτελεί και η διαδικασία επίλυσης μιας μεθόδου, κάτι που μπορεί να γίνει είτε στο πεδίο της συχνότητας, είτε στο πεδίο του χρόνου. Η διαδικασία επίλυσης στο πεδίο της συχνότητας, είναι μια ιδιαίτερα απαιτητική διεργασία ως προς την υπολογιστική μνήμη αλλά και τον χρόνο, καθώς προϋποθέτει την επίλυση των παραχθέντων συστημάτων εξισώσεων, ως προς κάθε ζητούμενη συχνότητα. Αντίθετα, μέσω ενός συγκεκριμένου αλγορίθμου, είναι δυνατή η επίλυση των εξισώσεων πεδίου κατευθείαν στο πεδίο του χρόνου, καθιστώντας αυτή τη μέθοδο χρονικά σύμφωνη. Μάλιστα, με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier, τα παραχθέντα χρονικά αποτελέσματα μπορούν να εκφραστούν εύκολα ως προς το πεδίο της συχνότητας.

Με βάση τα παραπάνω, πρέπει να τονιστεί εδώ πως το πρόγραμμα CSTTM είναι ένας FDTD (Finite-Difference Time-Domain) ηλεκτρομαγνητικός προσομοιωτής, ο οποίος στηρίζεται στις χωρικές μεθόδους για τη διακριτοποίηση του χώρου προσομοίωσης (σε εξάεδρα), τις οποίες και επιλύει στο πεδίο του χρόνου. Παρά την όμως αρκετά εξελιγμένη λειτουργία του, παρέχει στον χρήστη ένα εξαιρετικά φιλικό περιβάλλον σχεδίασης, προσφέροντας παράλληλα όλα τα δυνατά και απαραίτητα αποτελέσματα κατά την επίλυση μιας ηλεκτρομαγνητικής διάταξης, και μάλιστα σε σημαντικά περιορισμένο χρονικό διάστημα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. David M. Pozar (2012) Microwave Engineering 4th edition, John Wiley & Sons, Inc.
2. Inder J. Bahl, Maurizio Bozzi, Ramesh Garg (2013) Microstrip Lines and Slotlines 3rd edition, Artech House.
3. Kanatas, P. Constantinou. G. Pantos (2010) "Wireless Communications", ISBN 978-960-93-1889-1 (Greek Language).
4. Leo G. Maloratsky (2000) Reviewing the Basics of Microstrip Lines, Retrieved from <https://www.researchgate.net>.
5. Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder J. Bahl, A. Ittipiboon (2001) Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House.
6. Constantine A. Balanis (2005) Antenna Theory Analysis and Design 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc.
7. James R. James (1989) Handbook of Microstrip Antennas Volume I, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
8. James R. James (1989) Handbook of Microstrip Antennas Volume II, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
9. S. F. Roslan, M. R. Kamarudin, Senior Member, IEEE, M. Khalily, Member, IEEE, and M. H. Jamaluddin, Member, IEEE (2004) "An MIMO Rectangular Dielectric Resonator Antenna for 4G Applications".
10. Bhimakant H. Bansod, Deeplaxmi Niture (2015) Compact two port MIMO microstrip antenna for 4G applications, International Conference on Information Processing (ICIP).
11. J.J. Schuss, T. Carlson, R. Francois (1993) "Design of the Iridium phased array antennas", IEEE AP-S Symp. Digest.
12. J. Xia, S.H. Tan, K. Arichandran (1999) Application of Microstrip Antennas in small satellites, European Space Agency (ESA), ESA-SP Vol. 430, 1999.
13. R.Lelaratne and R.J.Langley, "Dual-band patch antenna for mobile satellite systems," IEE Proceedings Microwave Antennas and Propagation, 2000.
14. Nishimura, S., Nakano, K., and Makimoto, T. (1979): 'Franklin-type microstrip line antenna', International Symposium Digest, 'Antennas and Propagation'.

15. Ralph Pokuls, Jaroslav Uher, Member, IEEE, and D. M. Pozar, Fellow, IEEE (1998) Dual-Frequency and Dual-Polarization Microstrip Antennas for SAR Applications, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. 46.
16. Stojče Dimov Ilčev (2017) Global Mobile Satellite Communications Theory 2nd Edition Volume 2, Springer International Publishing Switzerland.
17. Timothy Pratt, Charles W. Bostian, Jeremy E. Allnutt Satellite Communications 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
18. Finkenzeller, K., (2003) RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contact-less Smart Cards and Identification, 2nd edition, Wiley & Sons, Inc.
19. G. Monti, L. Catarinucci, and L. Tarricone (2009) Compact Microstrip Antenna For RFID Applications, Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 8.
20. Lal Chand Godara (2002) Handbook of Antennas in Wireless Communications, CRC Press LLC.
21. Neha Parmar, Manish Saxena, Krishnkant Nayak (2014) Review of Microstrip Patch Antenna for WLAN and WiMAX Application, Neha Parmar et al Int. Journal of Engineering Research and Applications ISSN : 2248-9622, Vol. 4.
22. Ahmed Kishk (2013) Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications, InTech.
23. Shreema Manna (2016) Rectangular Microstrip Patch Antenna for Medical Applications, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering.
24. Girish Kumar, K. P. Ray (2003) Broadband Microstrip Antennas, Artech House.
25. Amit Kumar, Jaspreet Kaur, Rajinder Singh (2013) Performance Analysis of Different Feeding Techniques, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering
26. U.Srinivasa Rao, P Siddaiah (2015) Performance Enhancement of Microstrip Line Quarter Wave Transformer Circular Patch Antenna with Narrow Slit at L Band, International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR).
27. Alak Majumder (2013) Rectangular Microstrip Patch Antenna Using Coaxial Probe Feeding Technique to Operate in S-Band, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT).
28. Ruchi Varma, Dr. Jayanta Ghosh Design and Optimization of Proximity Coupled Antenna Using GA.

29. Michael Paul Civerolo (2010) Aperture Coupled Microstrip Antenna Design and Analysis, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
30. Gerard Maral Michel Bousquet (2009) Satellite Communications Systems 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc.
31. International Telecommunications Union (2002) ITU handbook on satellite communications, Wiley-Interscience.
32. Stojče Dimov Ilčev (2018) Global Mobile Satellite Communications Theory 2nd Edition, Springer International Publishing Switzerland.
33. B. R. Elbert (2008) "Introduction to Satellite Communication", Artech House, Inc.
34. W. L. Pritchard, H. G. Suyderhoud, R. A. Nelson (1993) "Satellite Communication Systems Engineering" 2nd edition, Prentice Hall.
35. R. W. Jones (2001) "Handbook on Satellite Communications" 3rd edition, John Wiley and Sons, Inc.
36. Abbas Jamalipour (1998) Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Networks, Artech House, Inc.
37. G. Sebestyen, S. Fujikawa, N. Galassi, A. Chuchra (2018) Low Earth Orbit Satellite Design, Microcosm Press and Springer.
38. Intelsat (2013) Circular Polarization vs. Linear Polarization.
39. Kin-Fai Tong, Member, IEEE, Jingjing Huang (2008) New Proximity Coupled Feeding Method for Reconfigurable Circularly Polarized Microstrip Ring Antennas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
40. Kin-Fai Tong, Member, IEEE (2006) A new single-feed proximity coupled circularly polarized square ring antenna, Microwave Conference, Asia-Pacific.
41. L. Marantis, E. DeWitte, Kin-Fai Tong, P.V. Brennan (2007) Circularly Polarized Array of Ring Antennas using Novel Proximity-Coupled Feeds, Loughborough Antennas and Propagation Conference.
42. L. Marantis, E. DeWitte, P.V. Brennan (2007) Design, modelling and measurement of CP antenna elements distributed on a large sphere, 5th European Workshop on Conformal Antennas.