ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σχεδίαση και προσομοίωση στοιχειοκεραίας για δορυφορικές επικοινωνίες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ουρανίδης
ΤΛ20043

Επιβλέπων: Χρήστος Νικολόπουλος, Αν. Καθηγητής Ελ.Με.Πα.

Χανιά, 8/1/2026

This page is intentionally blank

HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

Design and simulation of an antenna array for satellite communications

DIPLOMA THESIS

Dimitrios Ouranidis
TL20043

Supervisor: Christos Nikolopoulos, Assoc. Professor HMU.

Chania, 8/1/2026

This page is intentionally blank

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σχεδίαση και προσομοίωση στοιχειοκεραίας για δορυφορικές επικοινωνίες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ουρανίδης

Επιβλέπων: **Χρήστος Νικολόπουλος**, Αν. Καθηγητής Ελ.Με.Πα

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την **08.01.2026**

.....	.....	.....
Χρήστος Νικολόπουλος	Ιωάννης Βαρδιάμπασης	Ανάργυρος Μπακλέζος
Αν. Καθηγητής Ελ.Με.Πα.	Καθηγητής Ελ.Με.Πα.	Επ. Καθηγητής Ελ.Με.Πα.

……
Δημήτριος Ουρανίδης
Διπλωματούχος Ηλεκτρονικός Μηχανικός Ελ.Με.Πα

Copyright ©ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ,2026
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους γονείς μου για τη διαρκή στήριξη και ενθάρρυνσή τους, καθώς και στους φίλους μου για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράστασή τους καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

This page is intentionally blank

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 11
ABSTRACT 12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 13
1.1 Δορυφορικές επικοινωνίες 13
1.2 Μικροταινιακές Κεραίες 18
1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα κεραιών τύπου patch 19
1.3.1 Δομή και βασικά μικροταινιακής κεραίας 20
1.3.2 Μέθοδοι τροφοδοσίας 21
1.3.2.1 Ομοαξονική τροφοδοσία 21
1.3.2.2 Τροφοδοσία με σύζευξη μέσω σχισμής 21
1.3.2.3 Τροφοδοσία με άμεση σύζευξη 22
1.3.3 Μέθοδοι Ανάλυσης 22
1.3.4 Υπολογισμός Παραμέτρων 23
1.3.4.1 Υπόστρωμα 23
1.3.4.2 Διαστάσεις Patch 23
1.4 Ορθογωνική μικροταινιακή κεραία 24
1.4.1 Τροφοδοσία 25
2. ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ 27
2.1 Στοιχειοκεραίες 27
2.1.1 Πλεονεκτήματα Στοιχειοκεραιών [22] 29
2.1.2 Μειονεκτήματα Στοιχειοκεραιών [22] 29
2.1.3 Εφαρμογές 30
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ 31
3.1 Λογισμικό προσομοίωσης ANSYS HFSS 31
3.2 Σχεδίαση μικροταινιακής κεραίας τύπου patch 32
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 41
4.1 Αποτελέσματα που αφορούν την μικροταινιακή κεραία 41
4.2 Αποτελέσματα που αφορούν την στοιχειοκεραία 42
4.3 Αποτελέσματα που αφορούν για το μονό στοιχείο τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία 44
4.4 Αποτελέσματα που αφορούν την συστοιχία τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία. 46
5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 49
6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ 51

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Σπούτνικ 1[1] 13
Σχήμα 1-2. Τροχιές Δορυφόρων 14
Σχήμα 1-3. Διάγραμμα ακολουθιών γεγονότων από την στιγμή που ενεργοποιείται ο ραδιοπομπός, έως την εκτόξευση μέσων έρευνας και διάσωσης στο σημείο [6]. 16
Σχήμα 1-4. Αντιπροσωπευτικά σχήματα μικροταινιακών στοιχείων [14] 20
Σχήμα 1-5. Ομοαξονική τροφοδοσία [16] 21
Σχήμα 1-6. Τροφοδοσία με σύζευξη μέσω σχισμής [17] 22
Σχήμα 1-7. Τροφοδοσία με άμεση σύζευξη [18] 22
Σχήμα 1-8. Μικροταινιακή κεραία με ορθογώνιο patch [19] 24
Σχήμα 2-1. Διάγραμμα ακτινοβολίας μιας συστοιχίας κεραιών patch σε 3D [23] 28

Σχήμα 2-2. Στοιχειοκεραία 2x2 με κατανεμημένη τροφοδοσία [24]....29
Σχήμα 2-3. Στοιχειοκεραία από ορθογωνικά μικροταινιακά στοιχεία 10 x 10, με εύρος συχνοτήτων λειτουργείας 2-2.3 GHz. Χρησιμοποιείται σε συστήματα διαστημικών επικοινωνιών [14]....30
Σχήμα 3-1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) με εικόνα [27] 31
Σχήμα 3-2. Γραφικό περιβάλλον ANSYS HFSS....32
Σχήμα 3-3. Τελική Απεικόνιση 1ου σχεδίου δομής....33
Σχήμα 3-4. Επεξήγηση Δομής....34
Σχήμα 3-5. Επίπεδο Γείωσης 34
Σχήμα 3-6. Περιοχή ακτινοβολίας 35
Σχήμα 3-7. Νέες τιμές παραμέτρων....36
Σχήμα 3-8. Τελική δομή 36
Σχήμα 3-9. Τελική δομή array 2x2 37
Σχήμα 3-10. Μικροταινιακή κεραία τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία. 37
Σχήμα 3-11. Διαδικασία ορισμός δύο ζευγών επιπέδων τύπου Lattice pair. 38
Σχήμα 3-12. Δημιουργία open region. 39
Σχήμα 3-13. Δημιουργία Συστοιχίας 2x2 με ομοαξονική τροφοδοσία. 39
Σχήμα 3-14. Τελική απεικόνιση συστοιχίας 2x2 τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία. 40
Σχήμα 4-1. Διάγραμμα S11 μικροταινιακής 41
Σχήμα 4-2. Εύρος Ζώνης δομής. 41
Σχήμα 4-3. Συνολική απολαβή δομής. (5,6 db) 42
Σχήμα 4-4. Διάγραμμα ακτινοβολίας μικροταινιακής για θ=-180 μοίρες έως 180 μοίρες και φ=180 μοίρες 42
Σχήμα 4-5. Διάγραμμα S11 Συστοιχίας 43
Σχήμα 4-6. Συνολική απολαβή συστοιχίας (10,76 db) 43
Σχήμα 4-7. Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας συστοιχίας. 44
Σχήμα 4-8. Διάγραμμα S11 με ομοαξονική τροφοδοσία. 44
Σχήμα 4-9. Συνολική απολαβή δομής με ομοαξονική τροφοδοσία. (6,94 db)....45
Σχήμα 4-10. Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας με ομοαξονική τροφοδοσία. 45
Σχήμα 4-11 Διάγραμμα S11 συστοιχίας με ομοαξονική τροφοδοσία 46
Σχήμα 4-12. Συνολική απολαβή συστοιχίας με ομοαξονική τροφοδοσία. (9,68 db)....47
Σχήμα 4-13. Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας συστοιχίας με ομοαξονική τροφοδοσία. 47
Σχήμα 5-1. Εύκαμπτο φύλλο κεραίας φάσης [30]. 50

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1. Τροχιές και χιλιομετρική απόσταση 14
Πίνακας 1-2. Λειτουργεία συχνότητας ζωνών. 17
Πίνακας 3-1. Τιμές παραμέτρων 1ης Δομής....33

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου και πραγματεύεται τη σχεδίαση και προσομοίωση μικροταινιακών κεραιών και στοιχειοκεραιών για εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών. Το αντικείμενο της εργασίας εντάσσεται σε έναν ιδιαίτερα δυναμικό και τεχνολογικά απαιτητικό τομέα των τηλεπικοινωνιών, ο οποίος γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για αξιόπιστη, υψηλής ταχύτητας και παγκόσμιας κάλυψης μετάδοση δεδομένων.

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη των βασικών αρχών λειτουργίας των μικροταινιακών κεραιών τύπου patch, η ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους, καθώς και η διερεύνηση της συμπεριφοράς τους όταν χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία σε στοιχειοκεραίες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σχεδίαση κεραίας με κεντρική συχνότητα λειτουργίας τα 22 GHz, συχνότητα που παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον για σύγχρονα δορυφορικά συστήματα, καθώς και στη διαμόρφωση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων με στόχο τη βελτίωση του κέρδους και της κατευθυντικότητας.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίζεται σε αριθμητική προσομοίωση πλήρους κύματος με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS HFSS, το οποίο αξιοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των εξισώσεων του Maxwell. Μέσω του λογισμικού πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός κρίσιμων παραμέτρων, όπως οι S-παράμετροι, τα διαγράμματα ακτινοβολίας και το συνολικό κέρδος των υπό μελέτη διατάξεων, επιτρέποντας την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της απόδοσής τους.

Η εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο και κατανοητό σύνολο θεωρητικής ανάλυσης και πρακτικής εφαρμογής, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ως βάση για περαιτέρω μελέτη και εξέλιξη στον τομέα των μικροταινιακών κεραιών και των στοιχειοκεραιών για δορυφορικές επικοινωνίες.

Στο πλαίσιο αυτό, η δομή της εργασίας οργανώνεται ως εξής: στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες των δορυφορικών επικοινωνιών και των μικροταινιακών κεραιών, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της σχετικής τεχνολογίας και των στοιχειοκεραιών, στο κύριο μέρος αναλύεται η διαδικασία σχεδίασης και προσομοίωσης, ενώ στα τελικά κεφάλαια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της μελέτης.

Λέξεις κλειδιά

Μικροταινιακή κεραία, Κεραία τύπου patch, Στοιχειοκεραία, Δορυφορικές επικοινωνίες, Υψηλές συχνότητες, Κέρδος κεραίας, Διάγραμμα ακτινοβολίας, Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), ANSYS HFSS, Ηλεκτρονική κατεύθυνση δέσμης

ABSTRACT

This diploma thesis was carried out at the Department of Electronics Engineering of the Hellenic Mediterranean University and focuses on the design and simulation of microstrip antennas and antenna arrays for satellite communication applications. The subject of the thesis lies within a particularly dynamic and technologically demanding field of telecommunications, which is experiencing rapid growth due to the increasing need for reliable, high-speed, and global data transmission.

The aim of this work is to study the fundamental operating principles of microstrip patch antennas, analyze their advantages and limitations, and investigate their behavior when used as building elements in antenna arrays. Special emphasis is placed on the design of an antenna with a center operating frequency of 22 GHz, a frequency band of significant interest for modern satellite systems, as well as on the development of a four-element antenna array intended to improve gain and directivity.

The adopted methodology is based on full-wave numerical simulation using the commercial software ANSYS HFSS, which employs the Finite Element Method for solving Maxwell's equations. Through this software, critical parameters such as S-parameters, radiation patterns, and overall gain of the studied configurations were calculated, enabling the evaluation and optimization of their performance.

This thesis aspires to constitute a comprehensive and comprehensible combination of theoretical analysis and practical implementation, which may serve as a basis for further study and development in the field of microstrip antennas and antenna arrays for satellite communications. Within this framework, the structure of the thesis is organized as follows: the first chapter presents the fundamental concepts of satellite communications and microstrip antennas, the second chapter provides a review of the relevant technology and antenna arrays, the main part analyzes the design and simulation procedure, and the final chapters present and discuss the results and conclusions of the study.

Keywords
Microstrip antenna, Patch antenna, Antenna array, Satellite communications, High-frequency antennas, Antenna gain, Radiation pattern, Finite Element Method (FEM), ANSYS HFSS, Beam steering,

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Δορυφορικές επικοινωνίες

Οι Δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν ένα βασικό τομέα των τηλεπικοινωνιών και αφορά τη χρήση τεχνικών δορυφόρων για τη μετάδοση σημάτων επικοινωνίας μεταξύ διάφορων σημείων της γης. Οι δορυφορικές επικοινωνίες έχουν καθοριστικό ρόλο στο παγκόσμιο τηλεπικοινωνιακό σύστημα εξασφαλίζοντας τη μεταφορά εικόνας, φωνής και δεδομένων σε τοπικό αλλά και διεθνές επίπεδο. Σήμερα περίπου 2000 τεχνητοί δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά και λειτουργούν ως σταθμοί αναμετάδοσης σημάτων. Η δορυφορική επικοινωνία περικλείεται από δύο βασικά μέρη. Το πρώτο είναι το επίγειο τμήμα το οποίο αποτελείται από σταθερό και κινητό εξοπλισμό μετάδοσης, λήψης και υποστήριξης και το δεύτερο είναι το διαστημικό τμήμα, που είναι ο ίδιος ο δορυφόρος ο οποίος λαμβάνει σήματα από τη γη, τα ενισχύει και τα αναμεταδίδει πίσω. Μία τυπική δορυφορική σύνδεση περιλαμβάνει την ανοδική ζεύξη (uplink) του σήματος από τη Γη προς τον δορυφόρο και την καθοδική ζεύξη (downlink) από τον δορυφόρο προς την Γη. Ουσιαστικά η εν λόγω λειτουργεία καθιστά τον δορυφόρο έναν αναμεταδότη δηλαδή μια συσκευή που συνδυάζει πομπό και δέκτη ραδιοσημάτων [1].



Σχήμα 1-1. Σπούτνικ 1[1]

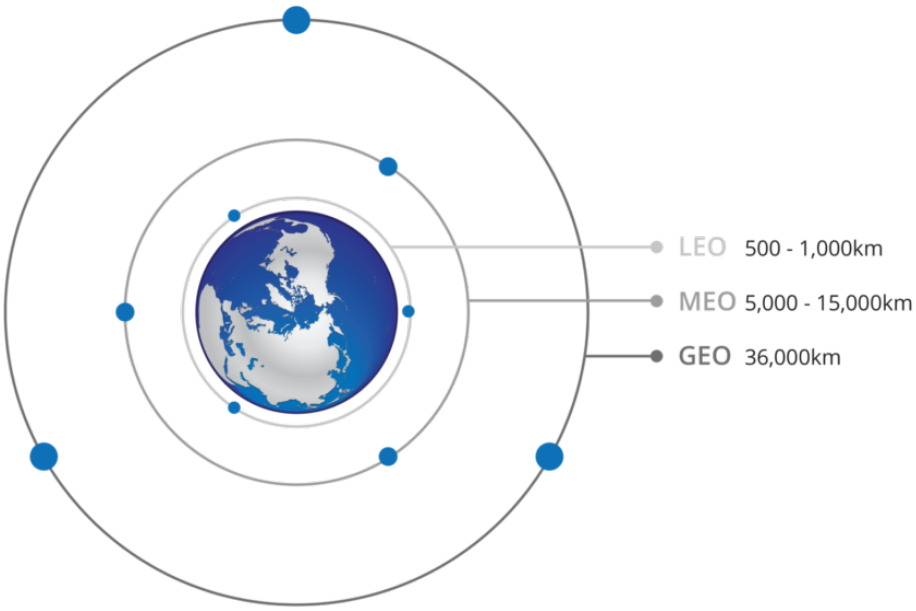
Ανατρέχοντας στο παρελθόν βλέπουμε πως ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος που εκτοξεύτηκε, από την Σοβιετική Ένωση με ονομασία Σπούτνικ 1 στις 4 Οκτωβρίου 1957 σηματοδοτήθηκε η αρχή της διαστημικής εποχής. Είχε διάμετρο μόλις 58 εκατοστά με τέσσερις κεραίες που εξέπεμπε ραδιοσήματα χαμηλής συχνότητας. Αν και λειτούργησε για μόνο 22 ημέρες πριν εξαντληθεί η μπαταρία του παρέμεινε σε τροχιά για τρεις μήνες. Η εκτόξευσή του πυροδότησε την αφετηρία της διαστημικής κούρσας μεταξύ Η.Π.Α και Σοβιετικής Ένωσης [1].
Στις μέρες μας οι σύγχρονοι δορυφόροι αποτελούνται από ένα σύστημα επικοινωνιών με κεραίες και αναμεταδότες, ένα σύστημα τροφοδοσίας κυρίως με ηλιακούς συλλέκτες για παραγωγή

ενέργειας και ένα σύστημα προώθησης με μικρούς πυραύλους για τη ρύθμιση της θέσης του δορυφόρου στην τροχιά του [1].
Η λειτουργεία του δορυφόρου μπορεί να τεθεί σε μία από τις τρεις δορυφορικές τροχιές ανάλογα το τι εφαρμογές θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Παρακάτω θα δούμε τον πίνακα και θα εξηγήσουμε τις τροχιές αυτές.

Πίνακας 1-1. Τροχιές και χιλιομετρική απόσταση

Τροχιά	**Χιλιόμετρα**
GEO	36.000
MEO	5.000-15.000
LEO	500-1000

Η πρώτη είναι η γεωστατική τροχιά (GEO) όπου βρίσκεται στα 35.786 χιλιόμετρα. Οι δορυφόροι GEO φαίνονται ακίνητοι από τη Γη καθώς περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα με αυτή της Γης. Η αμέσως επόμενη τροχιά είναι η μέση Γήινοί τροχιά (MEO) που εκτείνεται μεταξύ 5.000 και 15.000 χιλιομέτρων και βρίσκεται πάνω από την χαμηλή τροχιά της Γης και κάτω από την γεωστατική τροχιά. Οι δορυφόροι MEO έχουν περιόδους περιστροφής από 2 έως 24 ώρες και συχνά τοποθετούνται για την κάλυψη του Βόρειου και του Νότιου πόλου.



Σχήμα 1-2. Τροχιές Δορυφόρων

Τέλος έχουμε την χαμηλή τροχιά της Γης (LEO) που κυμαίνεται από 500 έως 1.000 χιλιόμετρα. Οι συγκεκριμένοι δορυφόροι βρίσκονται κοντά στη Γη με αποτέλεσμα ταχύτητα περίοδο περιστροφής και αλλάζουν συνεχώς θέση τους σε σχέση με τη θέση του έδαφος. Για το λόγο αυτό συνήθως λειτουργούν σε ομάδες, γνωστή ως αστερισμούς για συνεχή κάλυψη [2]. Οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν αναγκαίο στοιχείο για τις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές

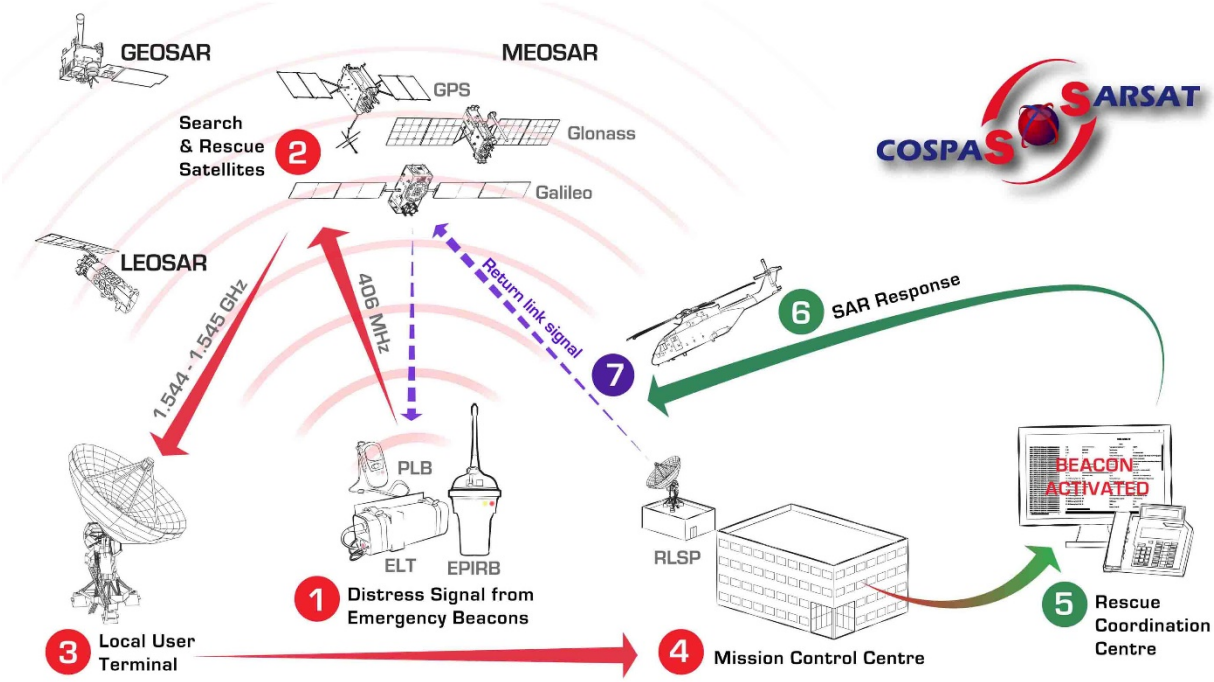
υποδομές προσφέροντας τη ευκαιρία μετάδοσης δεδομένων σε απομακρυσμένες περιοχές και σε μεγάλες αποστάσεις. Οι δορυφόροι εξαιτίας της μεγάλης ευελιξία τους, χρησιμοποιούνται σε διάφορους κλάδους της ανθρώπινης δραστηριότητας. Παρακάτω θα αναλύσουμε κάποιες από τις εφαρμογές που έχουν οι δορυφορικές επικοινωνίες.

Μία ευρέως γνωστή και πολύτιμη εφαρμογή είναι οι μετεωρολογική δορυφόροι. Αρχικά, οι μετεωρολόγοι θεωρούσαν ότι οι δορυφόροι θα χρησιμοποιούνταν κυρίως για την παρατήρηση των νεφών και για την έγκυρη προειδοποιήσει για επικίνδυνες καταιγίδες. Ωστόσο αυτό άλλαξε με την πρόοδο της τεχνολογίας και οι δορυφόροι ξεκίνησαν να συλλέγουν πολύπλοκα ατμοσφαιρικά δεδομένα όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου τα οποία είναι χρήσιμα στοιχεία για την πρόγνωση του καιρού. Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι τοποθετούνται σε ένα από τα δύο διαφορετικά είδη τροχιάς. Οι δορυφόροι που τοποθετούνται σε γεωστατική τροχιά (GEO) προσφέρουν συνεχή παρακολούθηση εικόνες των νεφών σε μεγάλες περιοχές. Βάση αυτών των στοιχείων από τις αλλαγές των μοτίβων οι μετεωρολόγοι μπορούν να εντοπίσουν τις ταχύτητες των ανέμων αλλά και τις προσεχείς καταιγίδες. Αντίθετα οι δορυφόροι που τοποθετούνται σε χαμηλότερη τροχιά (LEO) είναι ευθυγραμμισμένοι σε πολικές τροχιές έχουν την δυνατότητα να λάβουν πιο λεπτομερείς δεδομένα σχετικά με τις μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Συνολικά οι μετεωρολογικοί δορυφόροι αναδεικνύουν τη σημασία των διαστημικών τεχνολογιών προειδοποιώντας και ενημερώνοντας τους ανθρώπους [3].

Εκτός από την πρόγνωση του καιρού καταλυτικό ρόλο έχουν οι δορυφόροι και στην προστασία του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα μια ιδιαίτερα χρήσιμη εφαρμογή είναι η ανίχνευση και η παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων στις θαλάσσιες περιοχές. Οι δορυφόροι τηλεπισκόπισης διακρίνονται από την τροχιά, το υψόμετρο και τους αισθητήρες του που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση μεγάλων περιοχών. Στο παρελθόν οι χρόνοι για να συλλέξει τα απαραίτητα δεδομένα ένας τέτοιος δορυφόρος έως στην παράδοση εικόνας ήταν περίπου δώδεκα ώρες ενώ με τους πιο εξελιγμένους σήμερα ο χρόνος είναι περίπου στις 4 ώρες. Στον τομέα τον πετρελαιοκηλίδων, τα δορυφορικά ραντάρ ιδιαίτερα τα SAR (Synthetic Aperture Radar) αποδεικνύονται πολύτιμα. Πιο ειδικά το ραντάρ αυτό είναι μια συσκευή ραδιοεντοπισμού όπου καταγράφει δεδομένα ανεξαρτήτως φωτός ή καιρικών συνθηκών, απεικονίζοντας τις μολυσμένες περιοχές ως σκούρα στίγματα. Η δορυφορική τηλεπισκόπιση συμβάλει καθοριστικά στον εντοπισμό και την καθοδήγηση ερευνών με συμβατικά μέσα για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας ρύπανσης. Τέτοια τεχνολογία χρησιμοποιείται στους δορυφόρους όπως οι ERS-1, ERS-2, Radarsat και JERS-1 [4], [5].

Μία ακόμη χαρακτηριστική περίπτωση εφαρμογής στον τομέα τον δορυφορικών επικοινωνιών είναι το σύστημα δορυφορικής παρακολούθησης έρευνας και διάσωσης (Corpas-Sarsat). Πιο ειδικά οι δορυφόροι έρευνα και διάσωσης (SAR) χρησιμοποιούνται στο παγκόσμιο σύστημα σε τροχιές LEO, MEO και GEO για την ανίχνευση σημάτων κινδύνου από φάρους που λειτουργούν στην συχνότητα των 406MHz. Ουσιαστικά οι φάροι είναι ραδιοπομποί που τροφοδοτούνται με μπαταρία και είναι σχεδιασμένοι αποκλειστικά και μόνο για να στείλουν σήμα κινδύνου εάν ενεργοποιηθεί. Υπάρχουν τρεις τύποι φάρων, οι πομποί εντοπιστή έκτακτης ανάγκης (ELT) που χρησιμοποιείται από την αεροπορική κοινότητα, ραδιοφάροι ενδείξεων θέσης έκτακτης ανάγκης (EPIRB) που χρησιμοποιούνται στο θαλάσσιο περιβάλλον και προσωπικοί φάροι εντοπιστή (PLB) που χρησιμοποιούνται από άτομα σε δραστηριότητες στην άγρια φύση. Αφού ενεργοποιηθεί το σήμα εκπέμπουν μοναδικά κωδικοποιημένα σήματα τα οποία περιλαμβάνουν πληροφορίες όπως

που είναι ο κάτοχος του φάρου, τον τύπο του αεροσκάφους ή του σκάφους. Τα σήματα λαμβάνονται από δορυφόρους και αναμεταδίδονται σε επίγειους σταθμούς, που υπολογίζουν την θέση και προωθούν τις πληροφορίες σε κέντρα ελέγχου και συντονισμού έρευνας και διάσωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κινητοποιήσει των μέσων διάσωσης στο σημείο που βρίσκεται ο κίνδυνος εφόσον η κατάσταση θεωρηθεί αυθεντική. Αυτό θα συμβεί όταν η καταχώριση των φάρων είναι σωστή [6].



Σχήμα 1-3. Διάγραμμα ακολουθιών γεγονότων από την στιγμή που ενεργοποιείται ο ραδιοπομπός, έως την εκτόξευση μέσων έρευνας και διάσωσης στο σημείο [6].

Μία ακόμη σημαντική εφαρμογή των δορυφορικών επικοινωνιών αφορά την παροχή ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο σε ιδιαίτερα απομακρυσμένες περιοχές όπου τα επίγεια δίκτυα είναι δύσκολο να αναπτυχθούν. Μέσω σύγχρονων δορυφορικών συστημάτων το Starlink είναι ένα δορυφορικό διαδίκτυο της SpaceX που προσφέρει ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο σε δύσβατες περιοχές και όχι μόνο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός αστερισμού δορυφόρων που λειτουργούν σε χαμηλή τροχιά (LEO) εξασφαλίζοντας χαμηλή καθυστέρηση και υψηλές ταχύτητες. Η σύνδεση γίνεται μέσω επίγειων σταθμών που συνδέονται με κόμβους υψηλού εύρους ζώνης αποφεύγοντας τα σημεία συμμόρφωσης. Οι σταθμοί χρησιμοποιούν τις ζώνες συχνοτήτων Ku (12-18GHz) και Ka (26-40GHz). Επίσης οι σταθμοί χρησιμοποιούν κεραίες φάσης και ηλεκτρονικά ελεγχόμενες γωνίες κεραίας καθώς αυτά τα χαρακτηριστικά αυξάνουν το κέρδος για μετάδοση και λήψη από τους επίγειους σταθμούς προς τον αστερισμό δορυφόρων με αποτέλεσμα την ισχυρή και αξιόπιστη συνδεσιμότητα όλο το εικοσιτετράωρο [7].
Οι κεραίες είναι απαραίτητες για τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών, καθώς επιτρέπουν την μετάδοση και την λήψη σημάτων μεταξύ δορυφόρων και επίγειων σταθμών, υποστηρίζοντας με αυτόν τον τρόπο υπηρεσίες όπως τις τηλεπικοινωνίες, την πρόβλεψη καιρού και την πλοήγηση . Σημαντικό ρόλο παίζει σε τι συχνότητα θέλουμε να εκπέμψουμε την κεραία μας γιατί κάθε ζώνη

συχνότητας είναι κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές. Πιο αναλυτικά θα συναντήσουμε εφτά ζώνες συχνότητας για δορυφορικές επικοινωνίες.

Πίνακας 1-2. Λειτουργεία συχνότητας ζωνών.

Όνομα Ζώνης	Λειτουργεία Συχνότητας
Ζώνη L	1-2GHz
Ζώνη S	2-4GHz
Ζώνη C	4-8GHz
Ζώνη X	8-12GHz
Ζώνη Ku	12-18GHz
Ζώνη Ka	26-40GHz
Ζώνη V	40-75GHz

Ζώνη L (1-2GHz)

Η ζώνη L είναι κρίσιμη για δορυφορικές επικοινωνίες καθώς είναι μιας χαμηλής συχνότητας ζώνη που της επιτρέπει να διαπερνά εμπόδια όπως σύννεφα και βροχή λόγω της περιοχής του φάσματος με μεγάλο μήκος κύματος. Αυτό την καθιστά ως αξιόπιστη για δορυφορικές επικοινωνίες όπως το δορυφορικό ραδιόφωνο και τα συστήματα GPS [8].

Ζώνη S (2-4GHZ)

Αυτού του είδους ζώνης είναι απαραίτητη για δορυφορικές επικοινωνίες αφού χρησιμοποιείται για τηλεοπτικές και ραδιοφωνικές εκπομπές, καθώς και σε συστήματα ραντάρ και δορυφορικής πλοήγησης. Επιπλέον εφαρμόζεται από μετεωρολογικούς δορυφόρους για τη μετάδοση δεδομένων και εικόνων σχετικών με τη πρόγνωση και τη παρακολούθηση του καιρού [9].

Ζώνη C (4-8GHz)

Η ζώνη C παραμένει σημαντική στις δορυφορικές επικοινωνίες εξαιτίας της αξιοπιστίας, την ευρεία κάλυψη και την συμβατότητά της με διάφορα συστήματα. Αξιοποιείται σε υπηρεσίες όπως είναι οι τηλεοπτικές εκπομπές και οι σταθερές επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας επιτρέποντας την κάλυψη αθλητικών γεγονότων, ειδήσεων και ψυχαγωγίας. Εκτός από τις προηγούμενες εφαρμογές της επίσης γίνεται χρήση της για την μετάδοση δεδομένων και παροχή διαδικτυακής σύνδεσης, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές με περιορισμένες επιλογές συνδεσιμότητας και με αντίξοες ατμοσφαιρικές συνθήκες όπου άλλες ζώνες είναι λιγότερο αποτελεσματικές [9].

Ζώνη X (8-12GHz)

Η συγκεκριμένη ζώνη χρησιμοποιείται κυρίως για στρατιωτικούς και κυβερνητικούς σκοπούς. Παρέχει πλεονεκτήματα όπως υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και ασφαλής επικοινωνία το οποίο την καθιστά ιδανική για κρίσιμες εφαρμογές παραδείγματος χάρη την απεικόνιση ραντάρ και την μετάδοση ευαίσθητων πληροφοριών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να λειτουργεί σε αμυντικές εφαρμογές όπου η ασφαλής και συνεπής επικοινωνία είναι απαραίτητη [10].

Ζώνη Ku (12-18GHz)

Η ζώνη Ku είναι σημαντική για τις σύγχρονες δορυφορικές επικοινωνίες χάρη στην υψηλή συχνότητα και το μεγάλο εύρος ζώνης που προσφέρει. Χρησιμοποιείται κυρίως για τηλεοπτικές εκπομπές υψηλής ποιότητας απευθείας στο σπίτι, καθώς μπορεί να λαμβάνεται από μικρές κεραίες. Επιπλέον έχει την ιδιότητα να υποστηρίζει δορυφορικό διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας, εξυπηρετώντας ακόμα απομακρυσμένες περιοχές χωρίς επίγεια υποδομή, προσφέροντας ταχύτητες όμοιες με τις αστικές περιοχές. Ακόμα παρέχει αξιόπιστη σύνδεση με μειωμένες παρεμβολές γεγονός που την χαρακτηρίζει κατάλληλη για κρίσιμες και ευαίσθητες εφαρμογές, όπως οι θαλάσσιες και αεροναυτικές επικοινωνίες [11].

Ζώνη Ka (26-40GHz)

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε μία ζώνη που προσφέρει υψηλό εύρος ζώνης οδηγώντας σε ταχύτερες ταχύτητες, λιγότερη συμφόρηση και αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης όπως απαιτεί ένα δορυφορικό διαδίκτυο επόμενης γενιάς, διαδικτυακά παιχνίδια και μεταφορά μεγάλων δεδομένων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία Ka band είναι ιδιαίτερα ευέλικτη και κατάλληλη τόσο για σταθερά όσο και για κινητά δορυφορικά συστήματα που την καθορίζει ως ιδανική για παγκόσμια συνδεσιμότητα. Παρ όλα αυτά η χρήση της παρουσιάζει προκλήσεις όπως το υψηλό κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης λόγω των απαιτήσεων σε κεραίες και εξαρτήματα υψηλής συχνότητας [12].

Ζώνη V (40-75GHz)

Τέλος έχουμε την ζώνη V, η οποία είναι ένας ανερχόμενος τομέας για δορυφορικές επικοινωνίες και τεχνολογίες όπως το 5G χάρη στο εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης που προσφέρει. Αυτό της επιτρέπει να υπολογίζει εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης και χωρητικότητας. Ολοκληρώνοντας αν και στις μέρες μας είναι λιγότερο χρησιμοποιούμενη σε σχέση με τις ζώνες Ku και Ka αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο σε δίκτυα υψηλής απόδοσης. Παρόλα αυτά η ζώνη V αντιμετωπίζει προβλήματα όπως εξασθένηση του σήματος και απαιτεί επενδύσεις και ανάπτυξη υποδομών για να αξιοποιηθεί πλήρως [13].

1.2 Μικροταινιακές Κεραίες

Ο έγκριτος οργανισμός ηλεκτρονικών μηχανικών και επαγγελματιών τεχνολογίας IEEE, τον όρο κεραία τον ορίζει ως ένα μέσο κατάλληλο για εκπομπή ή λήψη ραδιοκυμάτων. Πιο συγκεκριμένα η κεραία μετατρέπει σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα ένα ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνει (Εκπομπή) και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ηλεκτρικό σήμα (Λήψη) .Το παραπάνω για να επιτευχθεί έχουμε μια γραμμή κυματοδήγησης ή γραμμή μεταφοράς που μπορεί να έχει την μορφή ομοαξονικού καλωδίου ή κοίλου αγωγού και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση, αποκαλείται κεραία εκπομπής και στην δεύτερη αποκαλείται κεραία λήψης [14].

Οι μικροταινιακές κεραίες (microstrip antennas) αποτελούν έναν από τους πλέον διαδεδομένους τύπους κεραιών στις σύγχρονες ασύρματες και δορυφορικές επικοινωνίες, κυρίως λόγω του μικρού τους μεγέθους, του χαμηλού κόστους κατασκευής και της δυνατότητας εύκολης ενσωμάτωσής τους σε τυπωμένα κυκλώματα. Σύμφωνα με τον ορισμό του IEEE, κεραία είναι μία διάταξη κατάλληλη για την εκπομπή ή τη λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, μετατρέποντας ένα ηλεκτρικό σήμα σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και αντιστρόφως.

Μία τυπική μικροταινιακή κεραία αποτελείται από ένα μεταλλικό στοιχείο ακτινοβολίας (patch), το οποίο τοποθετείται πάνω σε ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα, ενώ στην κάτω πλευρά του

υποστρώματος υπάρχει επίπεδο γείωσης. Το ύψος του υποστρώματος είναι συνήθως πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος λειτουργίας, γεγονός που επιτρέπει τη συμπαγή κατασκευή αλλά ταυτόχρονα επηρεάζει το εύρος ζώνης και την αποδοτικότητα της κεραίας. Η τροφοδοσία του patch μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες τεχνικές, όπως γραμμή μικροταινίας, ομοαξονικό ακροδέκτη ή σύζευξη μέσω σχισμής.

Οι μικροταινιακές κεραίες παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων που τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές για δορυφορικές εφαρμογές. Το μικρό τους βάρος και ο χαμηλός όγκος επιτρέπουν την τοποθέτησή τους σε δορυφόρους, αεροσκάφη και κινητές πλατφόρμες, ενώ η επίπεδη μορφή τους διευκολύνει την ενσωμάτωσή τους σε δομές χωρίς σημαντική αεροδυναμική επιβάρυνση. Επιπλέον, η τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων καθιστά δυνατή τη μαζική παραγωγή με χαμηλό κόστος και υψηλή επαναληψιμότητα.

Ωστόσο, οι μικροταινιακές κεραίες εμφανίζουν και ορισμένους περιορισμούς. Το σχετικά μικρό εύρος ζώνης, το χαμηλό κέρδος και οι αυξημένες απώλειες, ιδιαίτερα σε υψηλές συχνότητες, αποτελούν βασικές προκλήσεις στον σχεδιασμό τους. Επιπλέον, η παρουσία επιφανειακών κυμάτων στο υπόστρωμα μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη ακτινοβολία και μείωση της αποδοτικότητας, ιδίως όταν οι κεραίες χρησιμοποιούνται σε συστοιχίες.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, οι μικροταινιακές κεραίες χρησιμοποιούνται εκτενώς σε δορυφορικά συστήματα, καθώς οι αδυναμίες τους μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω κατάλληλης επιλογής υλικών υποστρώματος, βελτιστοποίησης της γεωμετρίας και χρήσης στοιχειοκεραιών. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπως οι ζώνες Ku και Ka, οι μικροταινιακές κεραίες αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο για τη δημιουργία συστοιχιών υψηλής κατευθυντικότητας και ηλεκτρονικής σάρωσης [15].

1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα κεραιών τύπου patch

Όπως κάθε τεχνολογία έτσι και οι κεραίες μικροταινίας έχουν χαρακτηριστικά που προσφέρουν πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς, επηρεάζοντας την απόδοση τους. Παρακάτω θα συνοψίσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας.

Πλεονεκτήματα [15]

- Η κεραία αυτού του τύπου έχει μικρό μέγεθος και βάρος το οποίο επιτρέπει να ενσωματωθεί σε διάφορες επιφάνειες συσκευών.
- Έχοντας προ αναφερθεί και παραπάνω έτσι και εδώ επισημαίνουμε ότι έχει χαμηλό κόστος κατασκευής με αποτέλεσμα να μπορούν να κατασκευαστούν μαζικά.
- Μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα με τις γραμμές τροφοδοσίας τους όπως είναι η γραμμική και η κυκλική πόλωση.
- Μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε άλλα κυκλώματα.

Μειονεκτήματα [14]

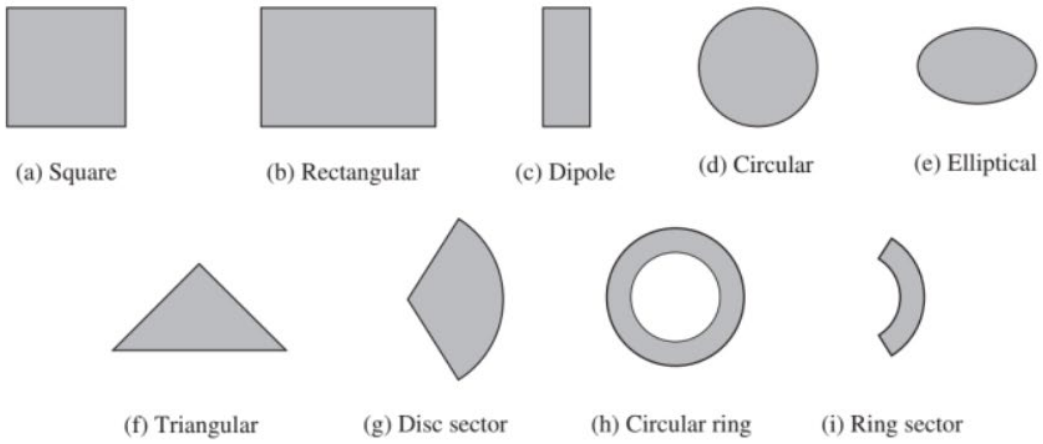
- Μειωμένη απόδοση.
- Χαμηλό κέρδος.
- Υψηλές ωμικές απώλειες, κυρίως όταν τοποθετούνται σε συστοιχίες.
- Μικρό εύρος ζώνης συχνοτήτων.
- Ψευδοακτινοβολία από την τροφοδοσία

- Μειωμένη ικανότητα σάρωσης

Παρ όλα αυτά σε κάθε περίπτωση, υπάρχουν μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της απόδοσης και του εύρος ζώνης παραδείγματος χάρης είναι, η αύξηση του ύψους του υποστρώματος.

1.3.1 Δομή και βασικά μικροταινιακής κεραίας

Μία κεραία μικροταινιακή αποτελείται από ένα μεταλλικό patch και μία μεταλλική λεπτή λωρίδα στην επιφάνεια ενός PCB τοποθετημένο πάνω από ένα επίπεδο γείωσης σε ύψος μικρότερο του μήκος κύματος. Το κάθε αυτό μικροταινιακό στοιχείο και η γείωση χωρίζονται με ένα στρώμα διηλεκτρικού, γνωστό και ως υπόστρωμα. Στα μικροκυματικά συστήματα προτιμώνται περισσότερο υποστρώματα μικρού πάχους και υψηλής διηλεκτρικής σταθερά για αυστηρό έλεγχο πεδίων μειώνοντας την ανεπιθύμητη ακτινοβολία και σύζευξη, ενώ παράλληλα μειώνει το μέγεθος των στοιχείων. Ωστόσο αυτό συνεπάγεται με υψηλότερες απώλειες, μικρότερη απόδοση και περιορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Δεδομένου όμως ότι οι μικροταινιακές κεραίες ενσωματώνονται σε μικροκυματικά κυκλώματα, απαιτούν συμβιβασμό μεταξύ της αποδοτικότητας τους και της συνολικής απόδοσης του κυκλώματος. Ακόμα είναι εφικτό να έχει διάφορα σχήματα ανάλογα με τις ανάγκες τις κατασκευή της δηλαδή τετραγωνικό, ορθογωνικό (από τα πιο δημοφιλείς), διπολικό, κυκλικό και άλλα πολλά ακόμα [14].
Παρακάτω βλέπουμε πως φαίνονται τα γεωμετρικά σχήματα κεραιών τύπου μικροταινίας.



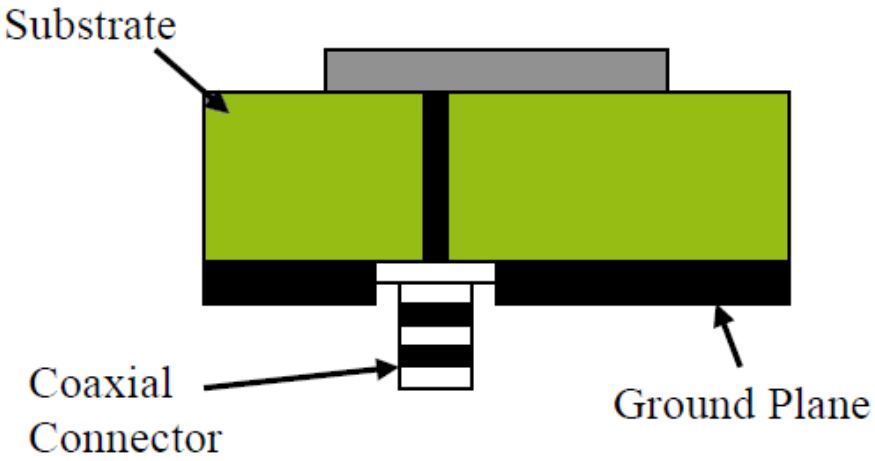
Σχήμα 1-4. Αντιπροσωπευτικά σχήματα μικροταινιακών στοιχείων [14]

Οι πιο συνηθισμένες μορφές μικροταινιών είναι η τετράγωνη, ορθογώνια κυκλική και διπολική λόγω της ευκολίας κατασκευής, ανάλυσης και μειωμένης ακτινοβολίας κάθετης πόλωσης. Οι διπολικές μικροταινίες είναι ιδανικές για στοιχιοκεραιές, καθώς προσφέρουν μεγάλο εύρος ζώνης και καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο. Η γραμμική και η κυκλική πόλωση μπορούν να επιτευχθούν είτε με μεμονωμένα στοιχεία είτε με συστοιχίες, ενώ οι στοιχιοκεραιές μικροταινιών μονής ή πολλαπλής τροφοδοσίας παρέχουν δυνατότητα σάρωσης δέσμης και υψηλής κατευθυντικότητας [14].

1.3.2 Μέθοδοι τροφοδοσίας

1.3.2.1 Ομοαξονική τροφοδοσία

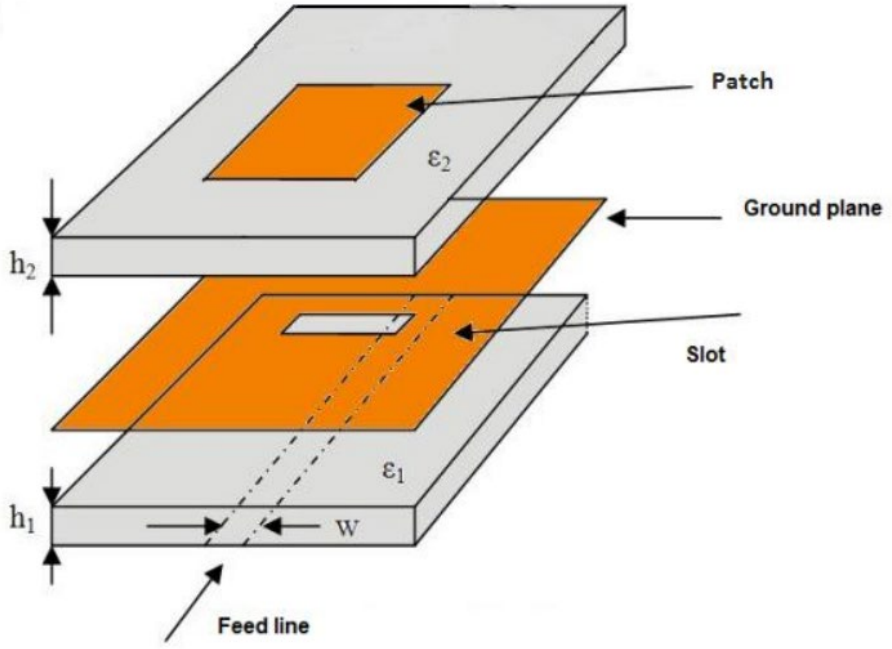
Υπάρχουν πολλές διατάξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία κεραιών μικροταινίας. Μία από αυτές τις διατάξεις που θα αναλύσουμε είναι ο ομοαξονικός σηματολήπτης. Οι ομοαξονικές τροφοδοσίες είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες λόγω ευκολίας κατασκευής και μειωμένης ψευδοακτινοβολίας. Η τροφοδοσία επιτυγχάνεται όταν ο εσωτερικός αγωγός του ομοαξονικού συνδέεται στο στοιχείο ακτινοβολίας ενώ ο εξωτερικός αγωγός συνδέεται στην γείωση. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το περιορισμένο εύρος ζώνης και η δυσκολία μοντελοποιήσης ειδικά σε υποστρώματα μεγάλου πάχους. (h>0.02λ0) [14].



Σχήμα 1-5. Ομοαξονική τροφοδοσία [16]

1.3.2.2 Τροφοδοσία με σύζευξη μέσω σχισμής

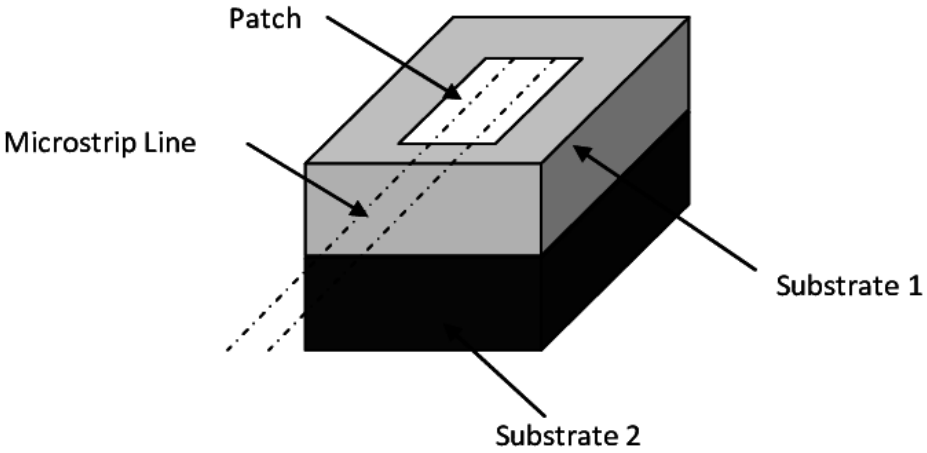
Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πιο δύσκολη στην κατασκευή και έχει μικρό εύρος ζώνης, αλλά μοντελοποιείται εύκολα και παράγει μέτρια ψευδοακτινοβολία. Η σύζευξη αποτελείται από δύο υποστρώματα τα οποία διαχωρίζονται από ένα επίπεδο γείωσης. Αναλύοντας την κάτω πλευρά του υποστρώματος θα δούμε ότι υπάρχει μια μικροταινακή γραμμή τροφοδοσίας της οποίας είναι ηλεκτρομαγνητικά συζευγμένη με το στοιχείο ακτινοβολίας μέσω μιας σχισμής στο κοινό επίπεδο γείωσης . Η διάταξη αυτή επιτρέπει την ανεξάρτητη βελτιστοποίηση της γραμμής τροφοδοσίας και του patch. Το επίπεδο γείωσης μεταξύ των υποστρωμάτων απομονώνει την τροφοδοσία από το στοιχείο ακτινοβολίας, μειώνει τις παρεμβολές και εξασφαλίζει καθαρότητα διαγράμματος και πόλωσης. Η βελτιστοποίηση κατορθώνεται μέσω ρύθμισης των ηλεκτρικών παραμέτρων του υποστρώματος, του πλάτους της γραμμής τροφοδοσίας και των διαστάσεων και θέσης σχισμής [14].



Σχήμα 1-6. Τροφοδοσία με σύζευξη μέσω σχισμής [17]

1.3.2.3 Τροφοδοσία με άμεση σύζευξη

Η εν λόγω μέθοδος έχει σχετικά δύσκολη κατασκευή ωστόσο, παρέχει το μεγαλύτερο εύρος ζώνης (έως και 13%), μοντελοποιείται σχετικά εύκολα και έχει μειωμένη ψευδοακτινοβολία. Ρυθμίζοντας το μήκος του στελέχους τροφοδοσίας και το πλάτος της μικροταινίας μπορεί να γίνει η προσαρμογή της [14].



Σχήμα 1-7. Τροφοδοσία με άμεση σύζευξη [18]

1.3.3 Μέθοδοι Ανάλυσης

Η ανάλυση κεραιών μπορεί να γίνει μέσω μοντέλων γραμμής μεταφοράς, κοιλότητας ή πλήρους κύματος. Το μοντέλο γραμμής μεταφοράς είναι το ευκολότερο και ταχύτερο, καθώς χρησιμοποιεί

απλοποιημένες παραδοχές. Σαν μειονέκτημα, είναι λιγότερο ακριβές και δυσχεραίνει τη μοντελοποίηση της σύζευξης. Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης είναι χρήσιμη ώστε να καθορίσει γενικά τους δείκτες επίδοσης μιας κεραίας τύπου patch και κάτω από δεδομένες συνθήκες. Μία από αυτές τις συνθήκες είναι κατάλληλο όταν η διηλεκτρική σταθερά είναι χαμηλή. Στα πλεονεκτήματα προσφέρει γρήγορα και διαφωτιστικά συμπεράσματα για την συμπεριφορά της κεραίας. Ουσιαστικά αντιμετωπίζει την μικροταινιακή κεραία ως σύστημα δύο σχισμών, χωρισμένων από γραμμή μεταφοράς χαμηλής εμπέδησης Z_c, και μήκους L [14].
Γενικά η ανάλυση των μικροταινιακών κεραιών patch είναι δύσκολη. Ακόμη μια μέθοδος ανάλυσης είναι τα μοντέλα πλήρους κύματος τα οποία κάνουν χρήση ολοκληρωτικών εξισώσεων του Maxwell. Από τα πλεονεκτήματα από αυτή την μέθοδο είναι ότι προσφέρουν εξαιρετική ακρίβεια για τα αποτελέσματα για την απόδοση και την συμπεριφορά της κεραίας και ευελιξία εφόσον χρησιμοποιηθούν σωστά. Είναι κατάλληλα για την ανάλυση μεμονωμένων στοιχείων ακτινοβολίας οποιουδήποτε σχήματος, διατάξεων πολλαπλών στοιχείων, στοιχειοκεραιών και σύζευξης σε διάφορες περιπτώσεις. Αντιθέτως είναι δύσκολα στον χειρισμό τους και όχι πολύ κατατοπιστικά ως προς την συμπεριφορά του συστήματος [14].
Το μοντέλο κοιλότητας είναι ακριβέστερο από τα προηγούμενα δύο, αλλά πιο πολύπλοκο απαιτώντας προσαρμογές για την ικανοποίηση των τελικών σχεδιαστικών προδιαγραφών. Είναι διαφωτιστικό ως προς τη φυσική συμπεριφορά του συστήματος, όμως η μοντελοποιήση της σύζευξης παραμένει δύσκολη, παρότι έχει εφαρμοστεί επιτυχώς [14].

1.3.4 Υπολογισμός Παραμέτρων

1.3.4.1 Υπόστρωμα

Για τη σχεδίαση της μικροταινιακής κεραίας patch επιλέχθηκε το υλικό Rogers RT/ duroid 5880 ως διηλεκτρικό υπόστρωμα με χαρακτηριστικά:

- Διηλεκτρική σταθερά: er=4,4
- Ύψος: h = 1,6mm (πάχος υποστρώματος)
- Πλάτος γραμμής : W

Η ενεργός διηλεκτρική σταθερά είναι συνάρτηση της συχνότητας. Καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργείας, αρκετές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου συγκεντρώνονται στο υπόστρωμα. Συνεπώς η μικροταινιακή γραμμή συμπεριφέρεται περισσότερο ως ομοιογενής γραμμή δηλαδή από ένα διηλεκτρικό αποτελούμενη (το υπόστρωμα) και η ενεργός διηλεκτρική σταθερά προσεγγίζει την τιμή της διηλεκτρικής σταθερά του υποστρώματος [14]. Η διηλεκτρική σταθερά δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left[1 + 12\frac{h}{w}\right]^{-0.5}$$

1.3.4.2 Διαστάσεις Patch

Οι διαστάσεις πλάτος (W) του patch υπολογίζονται βάσει των παραμέτρων όπου:

- f_0= 22 GHz
- ϵ_r= 4,4
- c= $3\cdot10^8$m/s (Ταχύτητα του φωτός)

Τύπος:

$$W = \frac{c}{2f} * \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Αρχικά υπολογίστηκε πρώτα το ενεργό μήκος γραμμής και ύστερα μπορέσαμε να υπολογίσουμε το μήκος γραμμής (L) από τον τύπο :

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{\left(\varepsilon_{reff} + 0.3\right)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{\left(\varepsilon_{reff} - 0.258\right)\left(\frac{W}{h} + 0.813\right)}$$

Όπου:

- Πλάτος γραμμής: W
- Ereff: Διηλεκτρική σταθερά
- h= Ύψος υποστρώματος

Αφού βρήκαμε το ενεργό μήκος γραμμής (ΔL) τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε το φυσικό μήκος γραμμής του patch από την σχέση:

$$L = \frac{1}{2_{fr}\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0 e_0}} - 2\Delta L$$

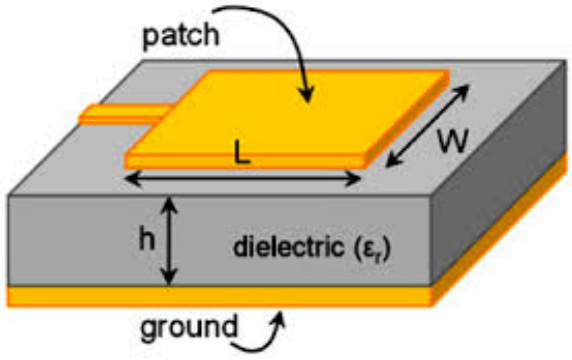
Τέλος υπολογίστηκε το ενεργό μήκος του μεταλλικού τμήματος (της μικροταινίας) από τον παρακάτω τύπο :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L$$

Έχοντας πραγματοποιήσει όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς σωστά, το patch θα φτάσει στην τελική του μορφή μαζί με την γραμμή τροφοδοσίας του.

1.4 Ορθογωνική μικροταινιακή κεραία

Η κεραία μικροταινίας με ορθογώνιο patch είναι με διαφορά η ευρύτερα πιο χρησιμοποιούμενη διάταξη μικροταινιακής κεραίας. Η ανάλυση της είναι αρκετά εύκολη μέσω των μοντέλων γραμμής μεταφοράς και κοιλότητας, τα οποία δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα για υποστρώματα μικρού πάχους [14].



Σχήμα 1-8. Μικροταινιακή κεραία με ορθογώνιο patch [19]

1.4.1 Τροφοδοσία

Η μικροταινία της γραμμής τροφοδοσίας αποτελείται από αγώγιμη ταινία η οποία συνδέεται στο patch και συνήθως έχει πλάτος μικρότερο από το πλάτος της κεραίας. Η κατασκευή της είναι εύκολη, η προσαρμογή της γίνεται εξίσου εύκολα με την κατάλληλη επιλογή του σημείου τοποθέτησης και με απλή μοντελοποιήση. Η αρνητική πλευρά του είναι όταν αυξάνουμε το πάχος του υποστρώματος, παρατηρούμε αύξηση των επιφανειακών κυμάτων και ψευδοακτινοβολία στην τροφοδοσία, με αποτέλεσμα να μειώνουν το εύρος ζώνης κατά 2 έως 5% [14].

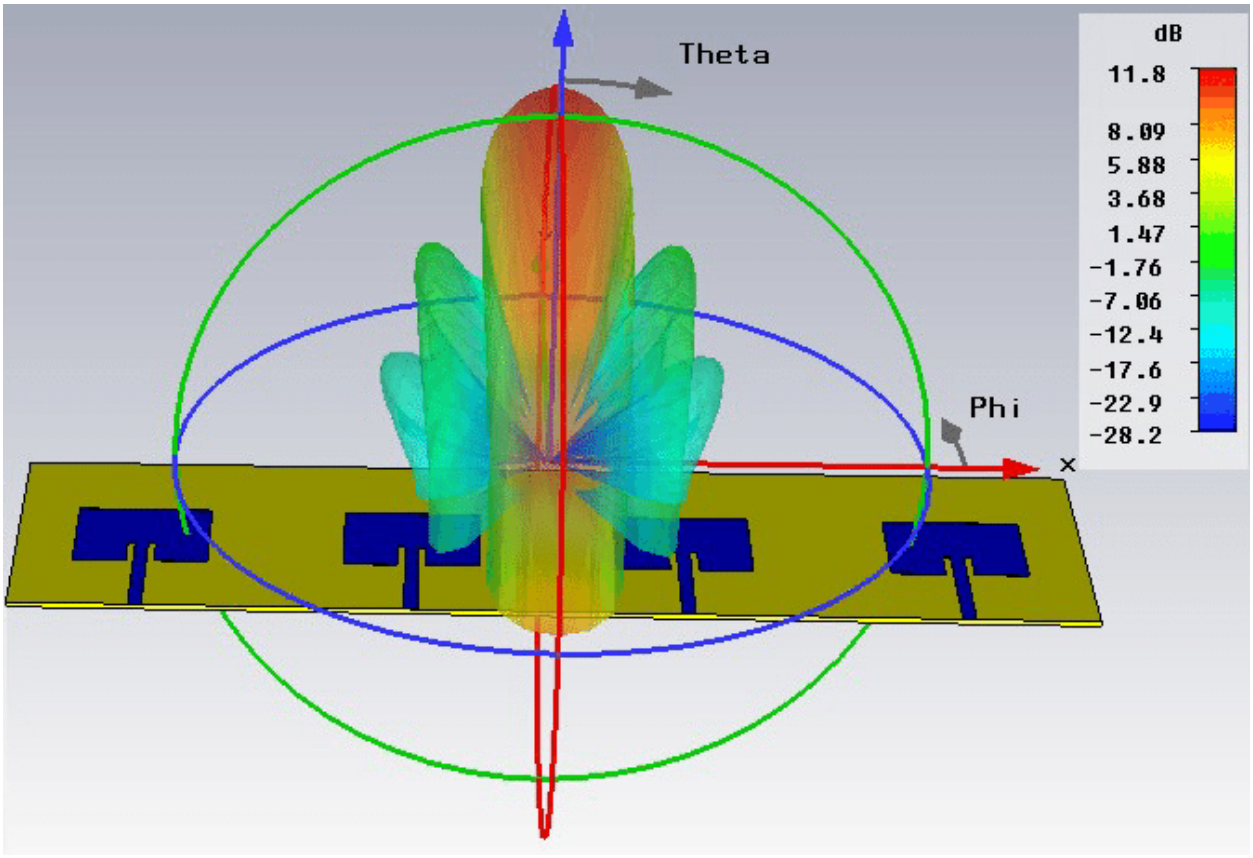
2. ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ

Στην παρούσα εργασία θα σχεδιάσουμε μια μικροταινιακή κεραία ορθογωνίου στα 22GHz που θα είναι κατάλληλη για δορυφορικές επικοινωνίες. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε μια συστοιχία κεραιών 2x2 ορθογώνια τοπολογίας. Αρχικά θα κάνουμε μια ανασκόπηση των κεραιών μικροταινίας όπου θα αναφερθούμε στην ιστορία, στην λειτουργία και στην ανάπτυξή της. Τέλος στο δεύτερο μέρος θα κάνουμε λόγο για την έννοια συστοιχία κεραιών στον τρόπο λειτουργείας της και στις ιδιότητες της.
Από την εισαγωγή της το 1985, η μικροταινιακή κεραία έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη σε πολλές εφαρμογές χάρη στην ευελιξία της σχεδίασή της, γεγονός που οδήγησε εκτεταμένη ανάπτυξη. Αν και η τεχνολογία των μικροαταινιακών ξεκίνησε να αναπτύσσεται ραγδαία από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 έως τις αρχές του 1980 είχε ήδη εδραιωθεί σημαντικά. Η ερεύνα έπειτα εστιάστηκε στην βελτίωση της απόδοσής της, παραδείγματος χάρη στο εύρος ζώνης (Bandwidth) και στην πρακτική εφαρμογή της σε ολοκληρωμένα συστήματα όπως κεραίες με δυνατότητα ηλεκτρονικής κατεύθυνσης (στοιχειοκεραία). Η αρχική προσέγγιση κατασκευής τέτοιων συστημάτων σε ένα μόνο στρώμα (GaAs) παρουσίασε προβλήματα, όπως έλλειψη χώρου για τα στοιχεία κεραίας και κακή επιλογή για το εύρος ζώνης της κεραίας. Παρ ’όλα αυτά το καλοκαίρι του 1984 προτάθηκε ένας συνδυασμός γεωμετριών με πολυστρωμικά υποστρώματα και χρήση σχισμών για την σύνδεση των γραμμών μικροταινίας με τις κεραίες, έχοντας σαν αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση [20].

2.1 Στοιχειοκεραίες

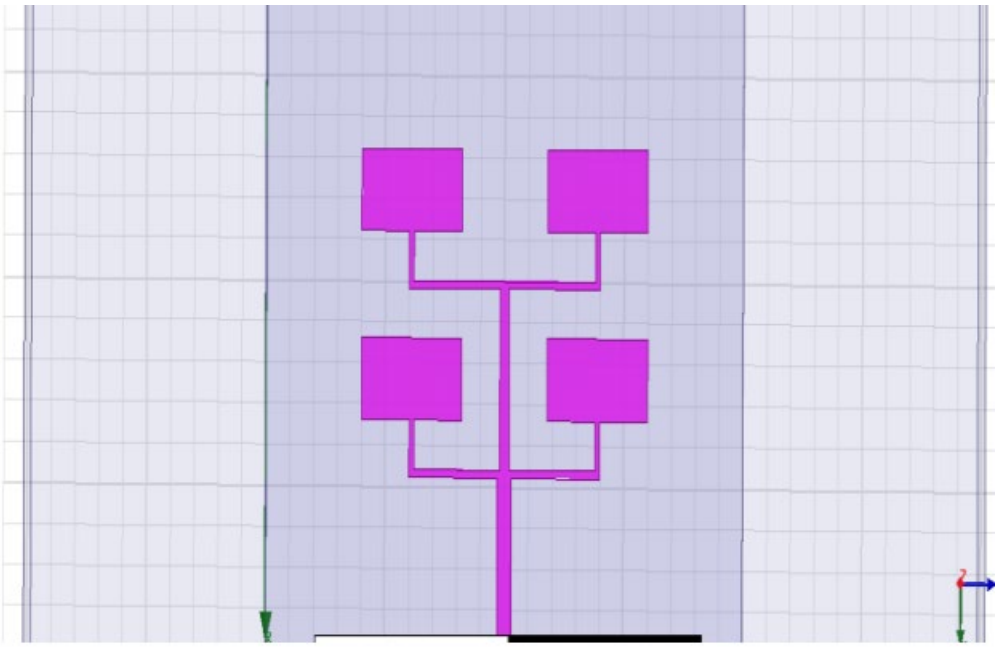
Από την δεκαετία του 1950, Οι αυξημένες απαιτήσεις των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, και ιδιαίτερα των δορυφορικών επικοινωνιών, οδήγησαν στην εκτεταμένη χρήση στοιχειοκεραιών (antenna arrays) ως μέσο επίτευξης υψηλού κέρδους, αυξημένης κατευθυντικότητας και ευελιξίας στη διαμόρφωση της δέσμης ακτινοβολίας. Μία στοιχειοκεραία αποτελείται από σύνολο επιμέρους στοιχειωδών κεραιών, τα οποία διατάσσονται με συγκεκριμένη γεωμετρική διάταξη και τροφοδοτούνται με ελεγχόμενα πλάτη και φάσεις. Οι αναδιπλούμενες ανακλαστικές κεραίες παρουσίασαν περιορισμούς λόγω βαρύτητας και χαμηλής ταχύτητας σάρωσης. Από την άλλη πλευρά οι ενεργές φασικές συστοιχίες (phased array) προσφέρουν ταχεία σάρωση, υψηλό κέρδος και ευελιξία στην κατεύθυνση της δέσμης, αποτελώντας έτσι την πιο κατάλληλη λύση για τις ανάγκες διαστημικών επικοινωνιών [21].
Η αύξηση των φυσικών διαστάσεων μιας κεραίας ενισχύει την κατευθυντικότητα της, αλλά παρόμοιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί και μέσω κατασκευής στοιχειοκεραιών, δηλαδή δομών αποτελούμενων από φυσικές διατάξεις πολλών μικρών στοιχειωδών κεραιών, με συγκεκριμένη ηλεκτρική και γεωμετρική διάταξη. Οι μικροταινίες χρησιμοποιούνται κυρίως ως τέτοια στοιχεία σε στοιχειοκεραίας, οι οποίες προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και δυνατότητες όπως σύνθεση πολύπλοκων διαγραμμάτων ακτινοβολίας, σάρωση της δέσμης και αυξημένη κατευθυντικότητα κάτι που είναι απαραίτητο για τη μετάδοση σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες κάτι που δεν μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητικά με μία μόνο κεραία [14].
Ως προς τον τρόπο λειτουργείας μια συστοιχία πολλαπλών στοιχείων χρησιμοποιεί για παράδειγμα διπολικές κεραίες μισού μήκους κύματος τα οποία διατάσσονται κατάλληλα και

διεγείρονται με συγχρονισμένη φάση όπου έχουν πανκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας, ώστε τα κύματα να εκπέμπονται πάνω από μια ευρεία γωνία [22].
Όταν τα ρεύματα στα στοιχεία είναι συγχρονισμένα σε φάση όπως αναφέραμε προηγουμένως τα σήματα συνδυάζονται μέσω παρεμβολής και δημιουργούν ένα ενισχυμένο ραδιοκύμα προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η συστοιχία κεραιών δημιουργεί ένα διάγραμμα ακτινοβολίας με κύριο λοβό σε συγκεκριμένη θέση. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων ο κύριος λοβός γίνεται πιο στενός και το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας αυξάνεται [22].



Σχήμα 2-1. Διάγραμμα ακτινοβολίας μιας συστοιχίας κεραιών patch σε 3D [23]

Τα στοιχεία μιας στοιχειοκεραίας μπορούν να τροφοδοτούνται είτε με μία μόνο γραμμή, είτε με διάταξη πολλαπλών γραμμών. Στην πρώτη περίπτωση (σχήμα 2.1) έχουμε δίκτυο σε σειρά τροφοδοσίας, ενώ στην δεύτερη (σχήμα 2.2) ένα δίκτυο κατανεμημένης τροφοδοσίας. Οι στοιχειοκεραιές με κατανεμημένη τροφοδοσία όπου δηλαδή παίρνουν ίδιο πλάτος αλλά και ίδια φάση προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και ευρύτερη εφαρμοσιμότητα, καθώς επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο της τροφοδοσίας κάθε στοιχείου. Αυτό τις καθιστά ιδανική για σάρωση σε στοιχειοκεραιές με έλεγχο φάσης(phased arrays) και σε στοιχειοκεραιές πολλαπλής δέσμης [14].



Σχήμα 2-2. Στοιχειοκεραία 2x2 με κατανεμημένη τροφοδοσία [24]

Πιο ειδικά οι δορυφορικές επικοινωνίες απαιτούν κεραίες υψηλής απολαβής οι οποίες επιτυγχάνονται μέσω συστοιχιών με στενή δέσμη. Η κατεύθυνση της δέσμης μπορεί να γίνει είτε μηχανικά είτε ηλεκτρονικά, με την δεύτερη μέθοδο να υπερτερεί καθώς εξασφαλίζει γρήγορη σάρωση. Η ηλεκτρονική διεύθυνση δέσμης υλοποιείται με αλλαγή φάσης των στοιχείων όπου ο ποιο διαδεδομένος τρόπος ονομάζεται butler matrix. Πρόκειται για ένα παθητικό δίκτυο τροφοδοσίας διεύθυνσης δέσμης που χρησιμοποιείται για την διαφορετική τροφοδοσία των κάθε στοιχείων της συστοιχίας κεραιών το οποίο δημιουργεί προοδευτική διαφορά φάσης στα στοιχεία της, ώστε να παραχθούν ορθογώνιες δέσμες που μπορούν να κατευθυνθούν σε διάφορες κατευθύνσεις [25].

2.1.1 Πλεονεκτήματα Στοιχειοκεραιών [22]

Ο σχεδιασμός της συστοιχίας κεραιών υποστηρίζει την καλύτερη απόδοση της κεραίας σε σχέση με την απλή κεραία. Τα πλεονεκτήματα της συστοιχίας κεραιών περιλαμβάνουν τα εξής:

- Η ισχύς του σήματος αυξάνεται πολύ πιο έντονα.
- Μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη κατευθυντικότητα.
- Μπορούν να επιτευχθούν μεγάλα κέρδη.
- Μειώνεται η σπατάλη ισχύος.
- Επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων.
- Καλύτερη απόδοση της κεραίας.

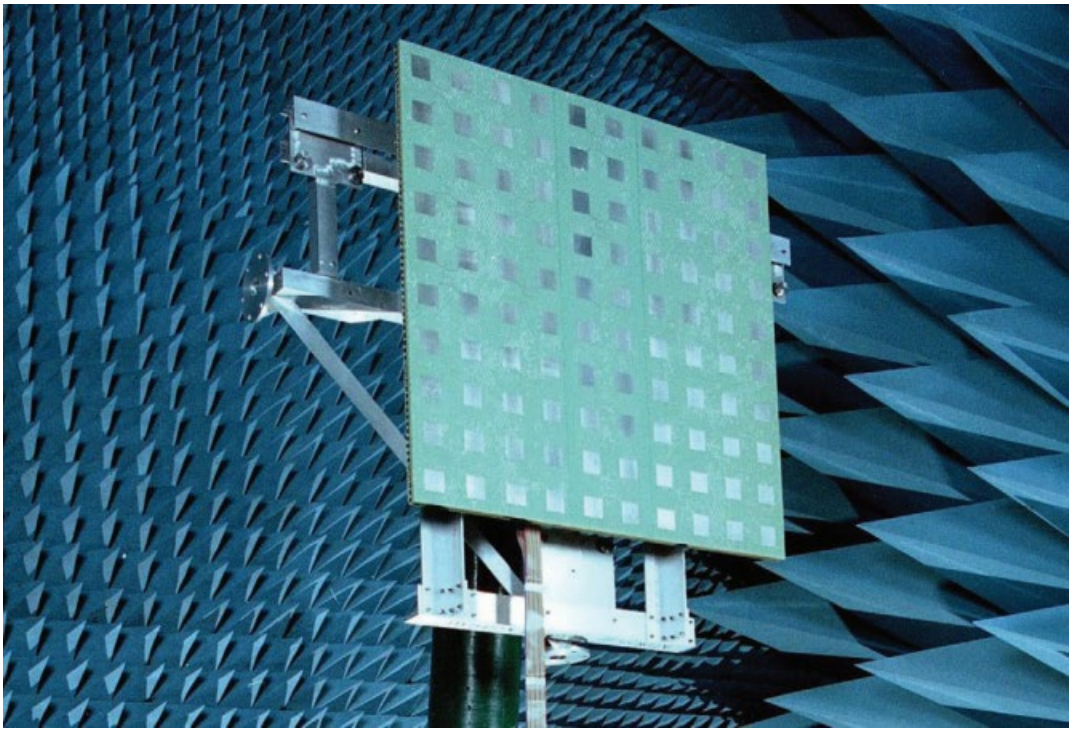
2.1.2 Μειονεκτήματα Στοιχειοκεραιών [22]

- Το κόστος των συστοιχιών κεραιών είναι ακριβό.
- Οι απώλειες αντίστασης θα αυξηθούν.
- Απαιτεί υψηλή συντήρηση.
- Η τοποθέτηση είναι δύσκολη.

- Καταλαμβάνει τεράστιο εξωτερικό χώρο.

2.1.3 Εφαρμογές

Μια συστοιχία κεραιών κρίνεται χρήσιμη για διάφορες τεχνολογίες χάρις την εξουδετέρωση των παρεμβολών, την παροχή λήψης ποικιλομορφίας, τη μέτρηση της κατεύθυνσης άφιξης των εισερχομένων σημάτων και άλλων πλεονεκτημάτων που αναφέραμε. Αυτές οι κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ασύρματες επικοινωνίες , στα στρατιωτικά ραντάρ και στις δορυφορικές επικοινωνίες όπου απαιτείται υψηλή ισχύς σήματος για την μετάδοση και την λήψη δεδομένων σε μεγάλη απόσταση καθώς και στην αστρονομία στο πλαίσιο παρατήρησης. Συμπερασματικά, πιο συγκεκριμένα μια συστοιχία κεραιών απαρτίζεται από πολλές κεραίες λειτουργώντας ως μία, για τη λήψη και την μετάδοση σημάτων σε διαφορετικές κατευθύνσεις με καλύτερη εμβέλεια του σήματος και ποιότητα [22].



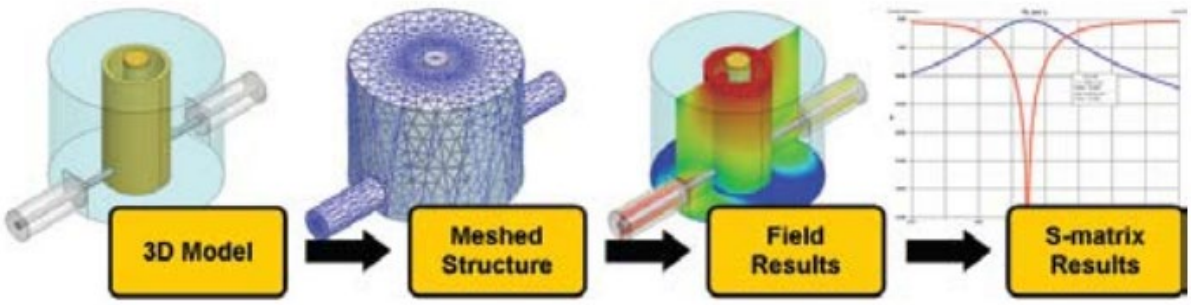
Σχήμα 2-3. Στοιχειοκεραία από ορθογωνικά μικροταινιακά στοιχεία 10 x 10, με εύρος συχνοτήτων λειτουργείας 2-2.3 GHz. Χρησιμοποιείται σε συστήματα διαστημικών επικοινωνιών [14].

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει αναλυτικά τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη σχεδίαση και την προσομοίωση των μικροταινιακών κεραιών και των στοιχειοκεραιών που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση αριθμητικών μεθόδων πλήρους κύματος και στη σωστή παραμετροποίηση της γεωμετρίας, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν με ακρίβεια τη φυσική συμπεριφορά των κεραιών.

3.1 Λογισμικό προσομοίωσης ANSYS HFSS

Για τη σχεδίαση και ανάλυση των κεραιών χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό ANSYS HFSS (High Frequency Structure Simulator), το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον αξιόπιστα εργαλεία προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων υψηλών συχνοτήτων. Το HFSS βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM) και επιτρέπει την ακριβή επίλυση των εξισώσεων του Maxwell σε τρισδιάστατες γεωμετρίες. Το περιβάλλον του λογισμικού παρέχει τη δυνατότητα πλήρους παραμετρικού σχεδιασμού, δημιουργίας προσαρμοστικών πλεγμάτων (adaptive meshing) και εξαγωγής κρίσιμων μεγεθών, όπως οι S-παράμετροι, τα διαγράμματα ακτινοβολίας, η κατανομή των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων και το συνολικό κέρδος της κεραίας. Η χρήση προσαρμοστικού πλέγματος εξασφαλίζει ότι η ακρίβεια της λύσης αυξάνεται προοδευτικά έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση των αποτελεσμάτων [25]. Επιτρέπει ακριβείς και γρήγορες λύσεις, υπολογίζοντας παραμέτρους όπως οι S-παράμετροι, η συχνότητα συντονισμού και τα πεδία. Το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μοντελοποιήση συσκευασιών και για πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB), κινητές επικοινωνίες, κεραίες κινητών τηλεφώνων καθώς και για στοιχιοκεραιές και για ραντάρ [26].
Ας δούμε την παραπάνω μέθοδο με την βοήθεια εικόνας.



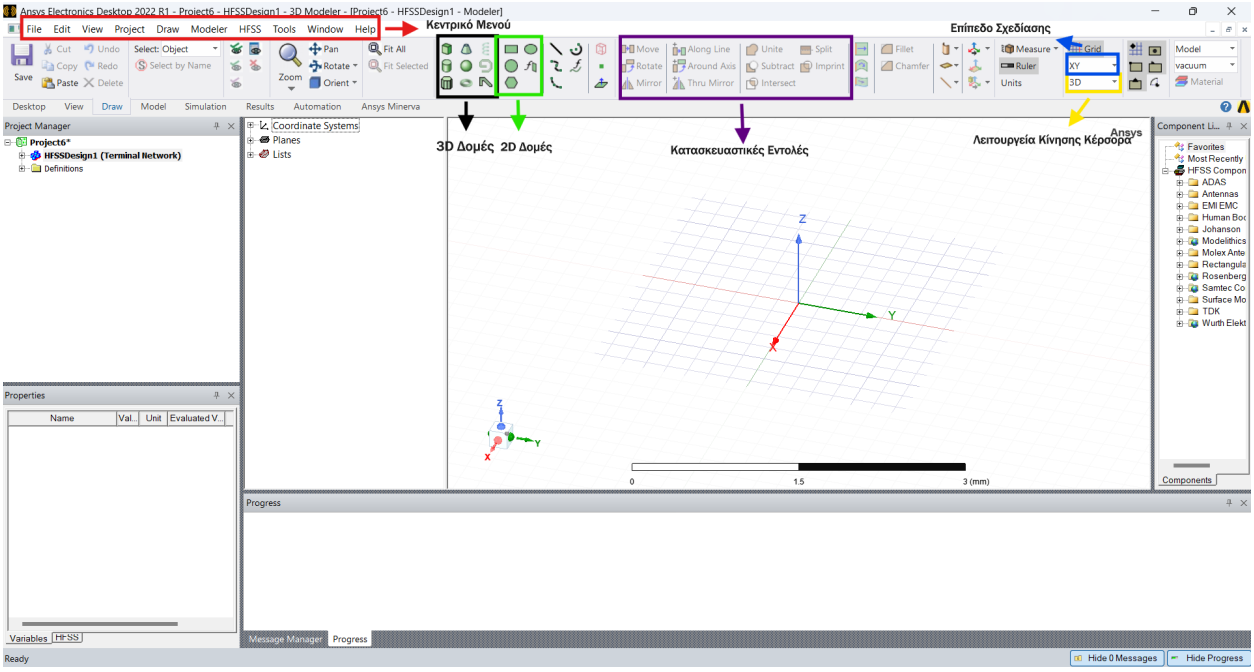
Σχήμα 3-1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) με εικόνα [27]

Το HFSS χρησιμοποιεί την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), μια αριθμητική τεχνική που επιλύει τα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα με διαίρεση μιας δομής σε μικρότερα υποτμήματα τα οποία ονομάζονται τετραδικά στοιχεία, όπου τα εξής συγκροτούν το λεγόμενο πλέγμα. Η λύση των εξισώσεων Maxwell πραγματοποιείται σε κάθε υπότμημα (τετράεδρο) όπου συνδέονται με κόμβους κάθε στοιχείο εξασφαλίζοντας έτσι την ορθή αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε ολόκληρη την δομή. Τέλος μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης, υπολογίζονται το S-Matrix, που περιγράφει πλήρως την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά της διάταξης [27].

Στο πρώτο σχήμα βλέπουμε την δομή που θέλουμε ενδεχομένως να επιλύσουμε κάποιο μηχανικό πρόβλημα. Στην συνέχεια όπως αναλύσαμε και παραπάνω διαιρούμε την δομή μας σε μικρά υποτμήματα πεπερασμένων διαστάσεων (δομή πλέγματος) και αφού πραγματοποιηθεί σε κάθε υπότμημα ξεχωριστά η λύση των εξισώσεων Maxwell επιταχύνοντάς με αυτόν τον τρόπο την διαδικασία έχουμε τα αποτελέσματα πεδίου συνδυάζοντας όλες τις λύσεις μαζί. Ολοκληρώνοντας όλη την διαδικασία στο τελευταίο μέρος βλέπουμε τα αποτελέσματα στο διάγραμμα S.

3.2 Σχεδίαση μικροταινιακής κεραίας τύπου patch

Η αρχική φάση της μελέτης περιλαμβάνει τη σχεδίαση μιας μικροταινιακής κεραίας τύπου patch με κεντρική συχνότητα λειτουργίας τα 22 GHz. Η επιλογή της συχνότητας αυτής συνδέεται άμεσα με εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών στις ζώνες υψηλών συχνοτήτων.
Η διαδικασία σχεδίασης ξεκινά με τον υπολογισμό των βασικών γεωμετρικών διαστάσεων του patch και του υποστρώματος, βάσει θεωρητικών σχέσεων και αρχικών προσεγγίσεων. Στη συνέχεια, οι διαστάσεις αυτές εισάγονται στο περιβάλλον του HFSS και ορίζονται ως παραμετρικές μεταβλητές, ώστε να είναι δυνατή η εύκολη βελτιστοποίησή τους.
Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην επιλογή του διηλεκτρικού υποστρώματος, καθώς η διηλεκτρική σταθερά και το πάχος του επηρεάζουν άμεσα τη συχνότητα συντονισμού, το εύρος ζώνης και τις απώλειες της κεραίας. Παράλληλα, καθορίζεται η μέθοδος τροφοδοσίας, με στόχο τη βέλτιστη προσαρμογή της κεραίας στη γραμμή τροφοδοσίας.
Παρακάτω θα δούμε και θα εξηγήσουμε το γραφικό περιβάλλον όπου υλοποιήσαμε την στοιχειοκεραία μας.



Σχήμα 3-2. Γραφικό περιβάλλον ANSYS HFSS

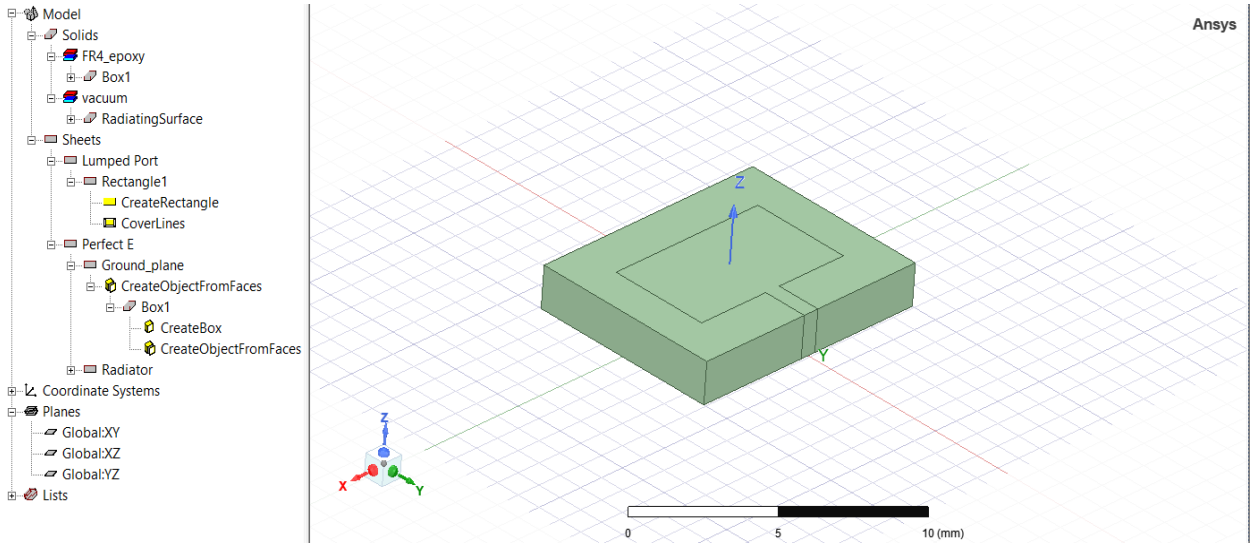
Αρχικά θα δούμε και θα αναλύσουμε την σχεδίαση της πρώτη δομής της κεραίας και στην συνέχεια θα δούμε την δεύτερη δομή η οποία αποτελεί και την τελική μας σχεδίαση. Έπειτα αφού

ολοκληρώσουμε την τελική μας δομή θα σχεδιάσουμε την στοιχειοκεραία που θα αποτελεί και το τελευταίο στάδιο της σχεδίασης.
Όπως είναι γνωστό για να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε την κεραία τύπου patch θα χρειαστούμε να γνωρίζουμε τις διαστάσεις της, δηλαδή το μήκος και το πλάτος της. Για κάθε κεραία που πρέπει να συντονιστεί για οποιαδήποτε συχνότητα οι διαστάσεις αυτές είναι διαφορετικές.
Αφού ορίσαμε μεταβλητές οι αρχικές διαστάσεις του πρώτου σχεδίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3-1. Τιμές παραμέτρων 1ης Δομής

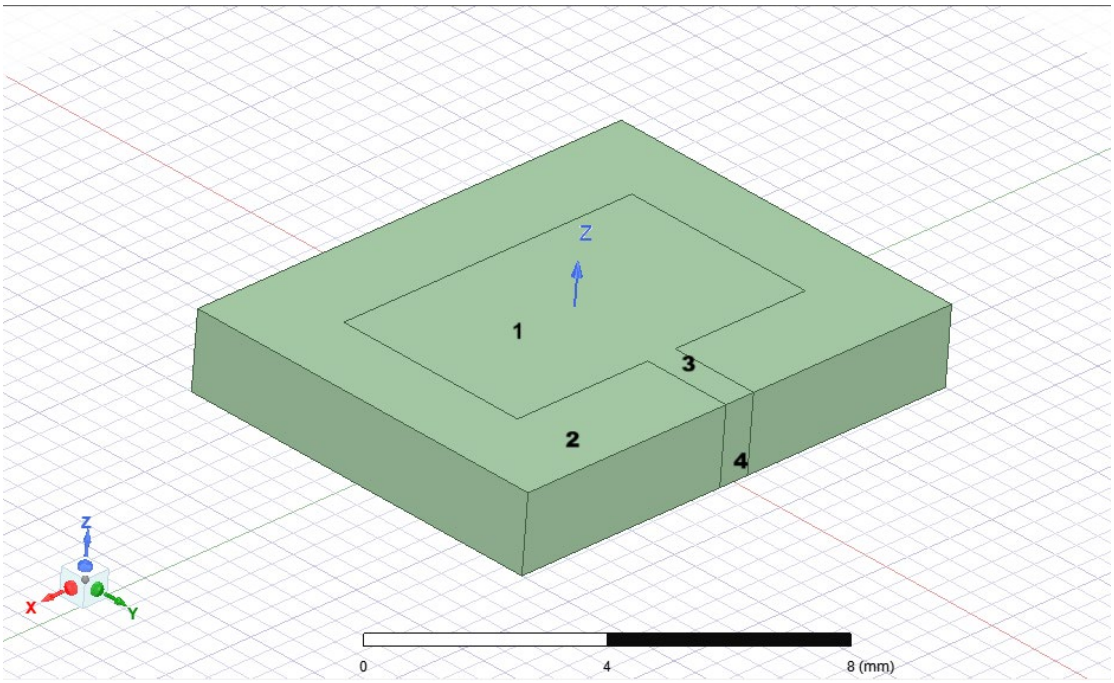
Ονόματα μεταβλητών	Τιμές παραμέτρων
Substrate Length	10mm
Substrate Width	7.8mm
Substrate Height	*1.6mm*
Patch length	6.8mm
Patch Width	4.1mm
Xo	0.81mm
Feed Width	0.65mm
Feed length	2.66mm

Οι παραπάνω τιμές ήταν απόρροια των παραπάνω τύπων που έχουμε αναφέρει (Εισαγωγή) αλλά και με την χρήση online calculator patch microstrip antenna .
Παρακάτω βλέπουμε το 1^{ο} σχέδιο μιας patch κεραίας με τις παραπάνω διαστάσεις.



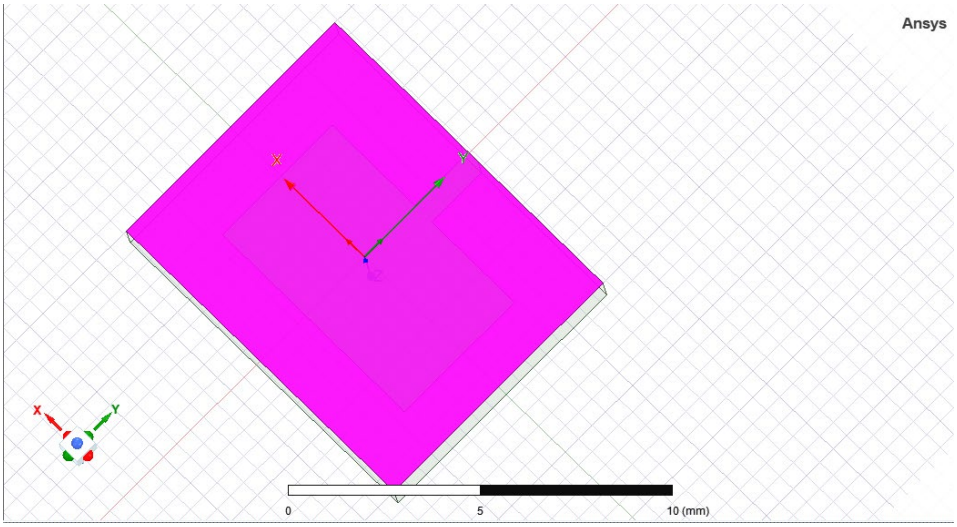
Σχήμα 3-3. Τελική Απεικόνιση 1ου σχεδίου δομής

Κατόπιν θα επεξηγήσουμε κάθε γεωμετρικό σχέδιο της δομή μας.



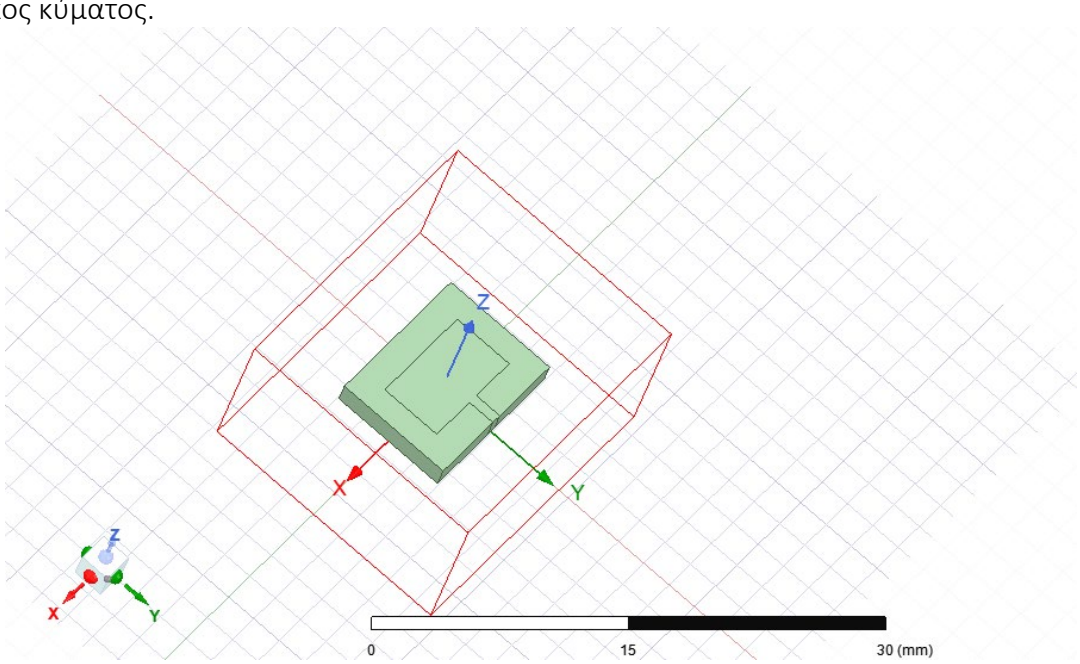
Σχήμα 3-4. Επεξήγηση Δομής

Όπως βλέπουμε παραπάνω στο νούμερο 1 παρατηρούμε το ορθογώνιο patch (ακτινοβολητής) όπου βρίσκεται πάνω σε μια επιφάνεια με αριθμό νούμερο 2 όπου ονομάζεται διηλεκτρικό (Er). Το διηλεκτρικό είναι ένα υλικό υποστρώματος πάνω στο οποίο κατασκευάζεται η κεραία και βρίσκεται ανάμεσα στον ακτινοβολητή και στο επίπεδο γείωσης. Στην συγκεκριμένη σχεδίαση το υλικό που χρησιμοποιήσαμε ονομάζεται FR4_epoxy. Στο νούμερο 3 βλέπουμε την γραμμή τροφοδοσίας που συνδέεται με την κεραία αλλά και με την πηγή σήματος που στην σχεδίασή μας είναι το νούμερο 4 και εφαρμόζεται ανάμεσα στην γραμμή τροφοδοσίας και την γείωση.



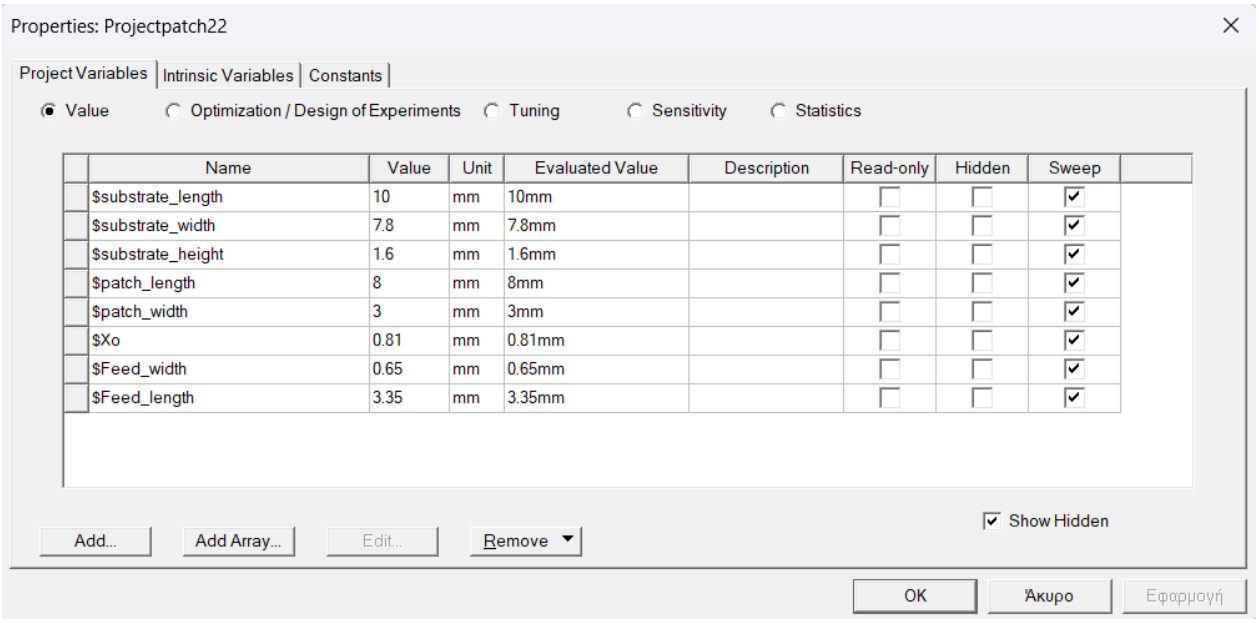
Σχήμα 3-5. Επίπεδο Γείωσης

Τέλος έχουμε την περιοχή ακτινοβολίας (Radiation box). Η περιοχή ακτινοβολίας έχει καταλυτικό ρόλο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της σχεδίασης αλλά είναι εικονική και δεν υπάρχει στην πραγματική κεραία στον εξωτερικό κόσμο. Παρ όλα αυτά η χρήση της είναι να προσομοιώνει σωστά την ακτινοβολία των ηλεκτρικών κυμάτων που φεύγουν από την κεραία. Για να λειτουργεί σωστά οι διαστάσεις που πρέπει να έχει είναι λ/4 από την κεραία (σε κάθε άξονα) όπου λ είναι το μήκος κύματος.



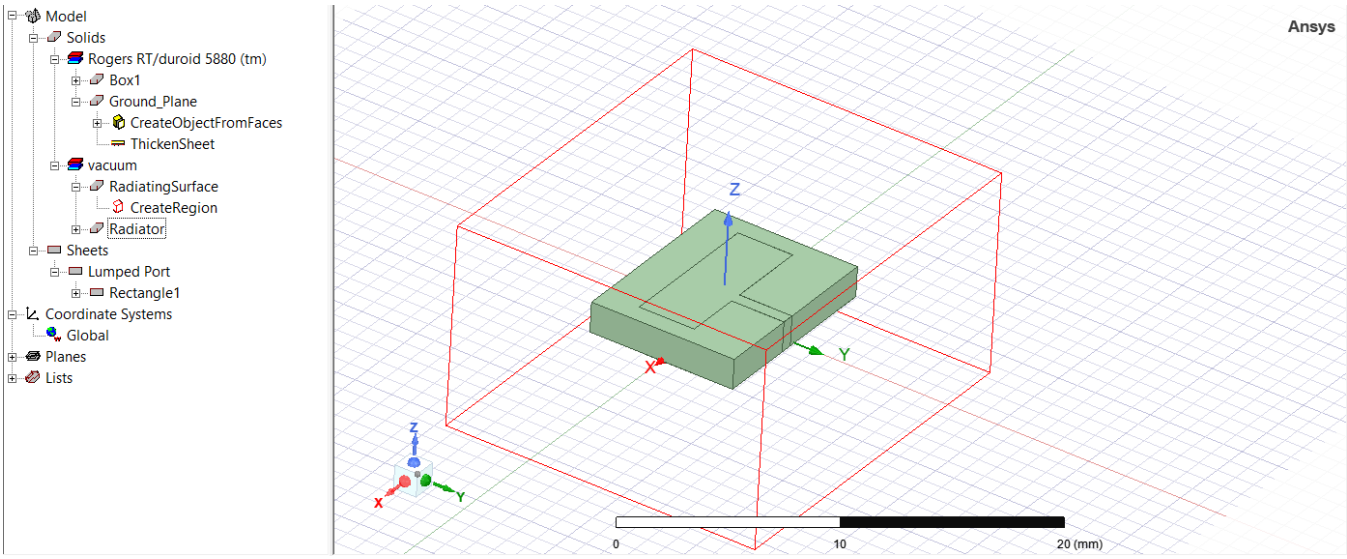
Σχήμα 3-6. Περιοχή ακτινοβολίας

Παρακάτω θα δούμε την τελική μορφή της σχεδίασης και τις νέες τιμές των παραμέτρων καθώς λόγω αποτελεσμάτων επικράτησε, δίνοντας πιο υψηλό κέρδος και καλύτερο συντονισμό στη συχνότητα που θέλουμε. Οι αλλαγές που έχουν γίνει αφορούν στο μέγεθος του ακτινοβολητή και πιο συγκεκριμένα το πλάτος και το μήκος του αλλά και στο μήκος της γραμμής μεταφοράς. Επίσης ακόμη μια αλλαγή που πραγματοποιήθηκε είναι η αλλαγή διηλεκτρικού από FR4_epoxy σε Rogers RT/ duroid 5880. Αυτή η αλλαγή επιτεύχθηκε διότι το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε έχει πιο υψηλές απώλειες λόγω υψηλού Er(4,4) αντίθετα με το δεύτερο υλικό που έχει χαμηλότερες απώλειες επειδή έχει εξίσου χαμηλό Er(2,2). Μία τελευταία παραμετροποίηση που έγινε στην δομή είναι ότι τοποθετήθηκε έξτρα πάχος στο patch (ακτινοβολητής) αλλά και στο επίπεδο γείωσης με την εντολή thicken sheet. Το πάχος που προστέθηκε είναι 0.035mm αντίστοιχα γιατί χρειαζόμαστε το patch να είναι πάνω από το substrate (υπόστρωμα) και το ground layer (επίπεδο γείωσης) να είναι ακριβώς από κάτω.



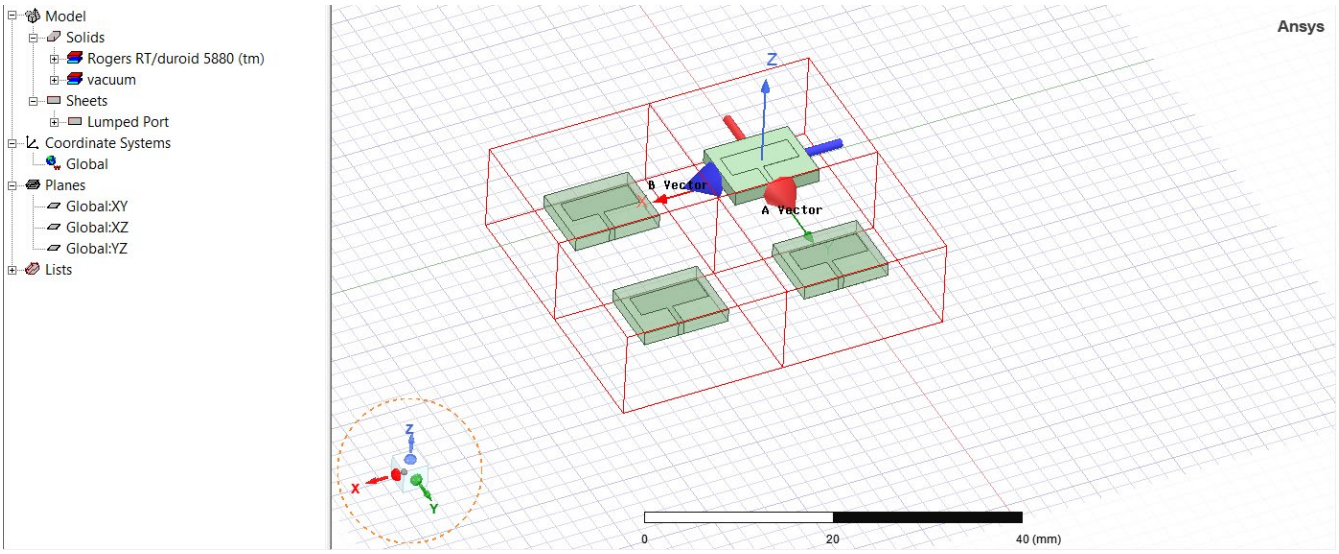
Σχήμα 3-7. Νέες τιμές παραμέτρων

Παρακάτω φαίνεται η τελική σχεδίαση δομής της κεραίας.



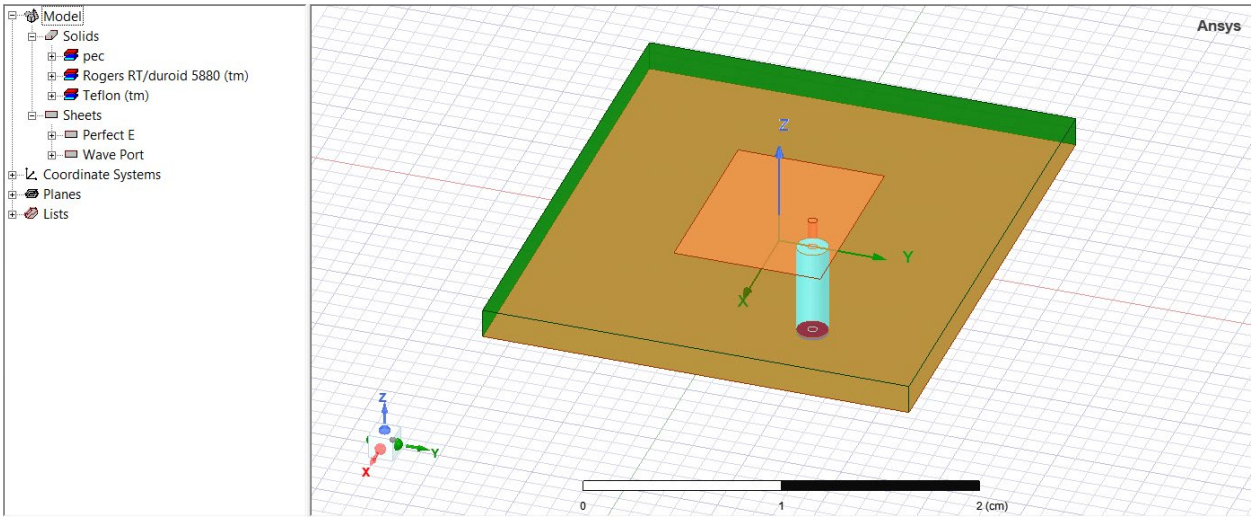
Σχήμα 3-8. Τελική δομή

Στην συνέχεια παρουσιάζεται και αναλύεται το δεύτερο γεωμετρικό μοντέλο της μικροταινιακής κεραίας patch σε συστοιχία 2x2.



Σχήμα 3-9. Τελική δομή array 2x2

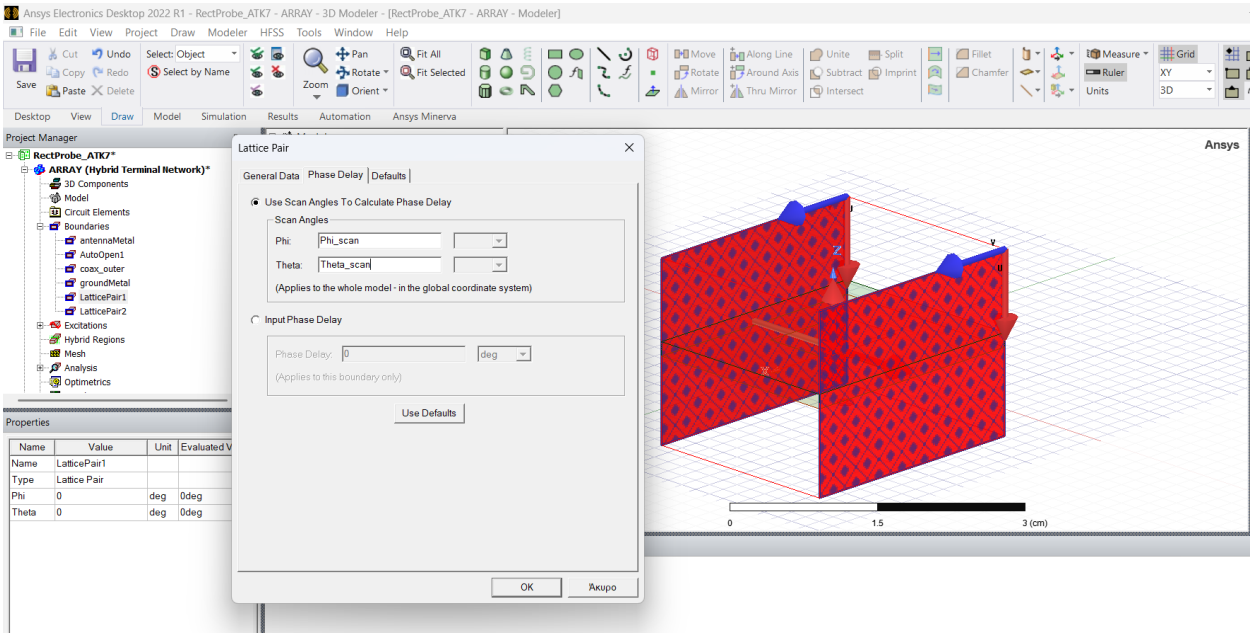
Η συγκεκριμένη σχεδίαση υλοποιήθηκε με στόχο τη βελτίωση του κέρδους και της κατευθυντικότητας της μικροταινιακής κεραίας. Η δομή της κεραίας είναι ακριβώς ίδια με την αρχική ως προς το υπόστρωμα, το επίπεδο γείωσης, τον ακτινοβολητή και την τροφοδοσία. Όπως φαίνεται παραπάνω, τα τέσσερα στοιχεία διατάσσονται σε τετραγωνικό πλέγμα 2x2 με συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των γειτονικών patches εξασφαλίζοντας ικανοποιητικό κέρδος. Όλη η δομή περικλείεται από ένα κουτί ακτινοβολίας (radiating surface) ώστε να προσομοιωθεί σωστά η ακτινοβολία των ηλεκτρικών κυμάτων. Τέλος η ανάλυση και η εξαγωγή αποτελεσμάτων που πραγματοποιήθηκε είναι finite array εννοώντας με αυτήν την λειτουργεία ότι, λαμβάνουμε υπόψη όλα τα πραγματικά στοιχεία της συστοιχίας ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο γίνεται καλύτερα στην πραγματική λειτουργεία της συστοιχίας 2x2.
Παρακάτω θα μελετήσουμε και θα αναλύσουμε την τελευταία σχεδίαση που ονομάζεται ορθογώνια μικροταινιακή κεραία τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία (probe feed).



Σχήμα 3-10. Μικροταινιακή κεραία τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία.

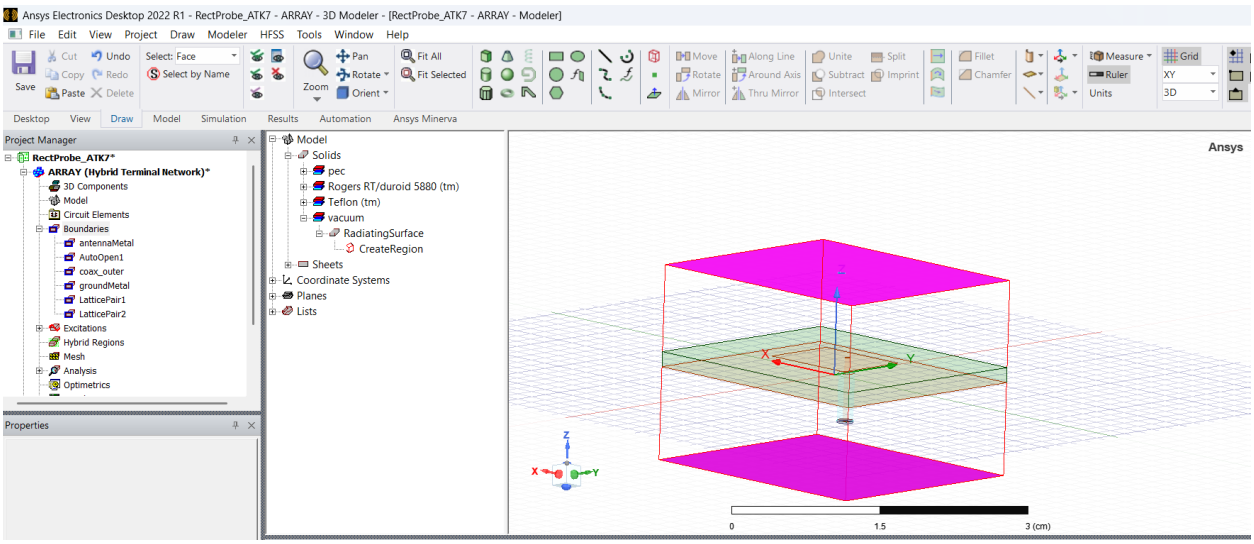
Στην συγκεκριμένη κεραία παρατηρούμε το κατώτερο στρώμα γείωσης από τέλειο αγωγό (pec) το οποίο εκτείνεται σε διαστάσεις μεγαλύτερου του patch ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή ρευμάτων γείωσης. Ύστερα βλέπουμε το διηλεκτρικό υπόστρωμα από υλικό Rogers RT/duroid 5880 όπου επάνω του είναι η μεταλλική επιφάνεια του patch. Οι διαστάσεις του προσαρμόστηκαν έτσι ώστε ο συντονισμός να επιτυγχάνεται στη συχνότητα των 22GHz. Η τροφοδοσία της κεραίας πραγματοποιείται μέσω ομοαξονικής γραμμής η οποία εισάγεται από την κάτω πλευρά του υποστρώματος. Ο εσωτερικός αγωγός του διαπερνά το διηλεκτρικό και συνδέεται απευθείας με την επιφάνεια του patch, ενώ αντίθετα ο εξωτερικός αγωγός συνδέεται με το επίπεδο γείωσης. Στη βάση της ομοαξονικής γραμμής ορίζεται ένα wave port 50 Ω μέσω του οποίου τροφοδοτείται η κεραία και παίρνουμε τα αποτελέσματα το διάγραμμα επιστροφής απώλειας (S11) και κέρδους.

Στην συνέχεια της σχεδίασης μας προχωρήσαμε σε μια συστοιχία 2x2 ίδιων στοιχείων patch. Για την υλοποιήσει της συστοιχίας απαιτείται μια βασική διαδικασία που πρέπει να ακολουθήσουμε όπου είναι να οριστούν στο εξωτερικό της δομής δύο ζεύγη επιπέδων τύπου Lattice pair κατά μήκος των αξόνων X και Y με την εντολή Auto identify Lattice pair. Τα ζεύγη αυτά αντιστοιχούν στις δύο διευθύνσεις της συστοιχίας και επιτρέπουν την φασική μετατόπιση μεταξύ διαδοχικών στοιχείων. Η φασική μετατόπιση δεν ορίστηκε απευθείας αλλά μέσω των γωνιών σάρωσης (scan angles) ϕ και Θ στο παράθυρο phase delay. Επιλέχθηκε η ρύθμιση " Use Scan Angles To Calculate Phase Delay " έτσι ώστε το πρόγραμμα να υπολογίσει αυτόματα την προοδευτική διαφορά φάσης των στοιχείων της συστοιχίας.



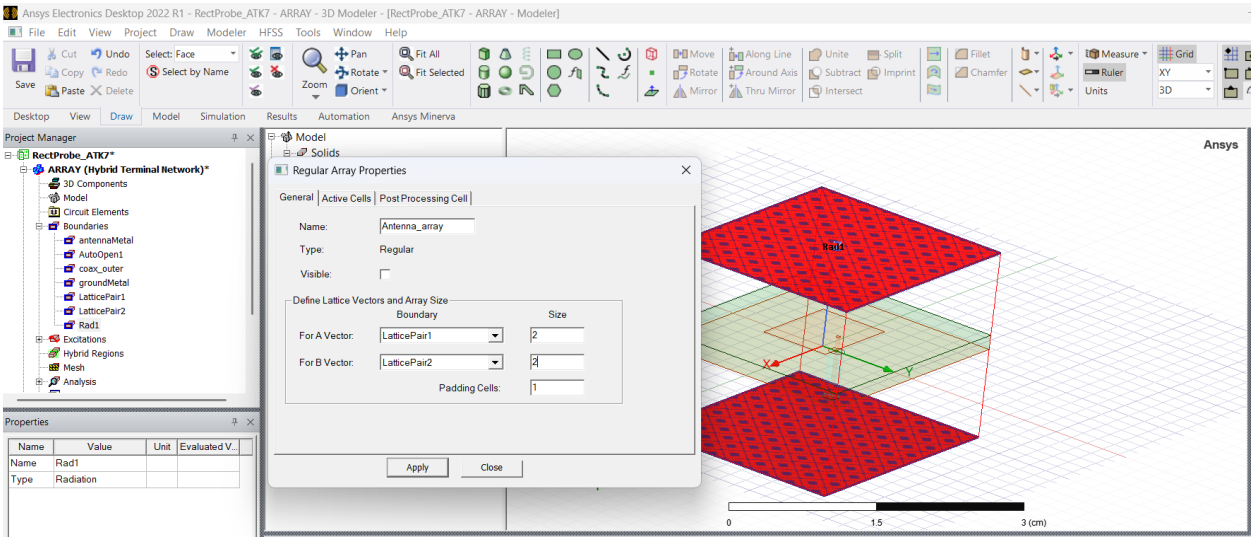
Σχήμα 3-11. Διαδικασία ορισμός δύο ζευγών επιπέδων τύπου Lattice pair.

Έπειτα δημιουργήσαμε μια ανοιχτή περιοχή (open region) για να αντιστοιχίσουμε ένα όριο ακτινοβολίας αφού επιλέξαμε το πάνω και το κάτω μέρος αυτής της περιοχής με σκοπό την ορθή εξαγωγή αποτελεσμάτων.



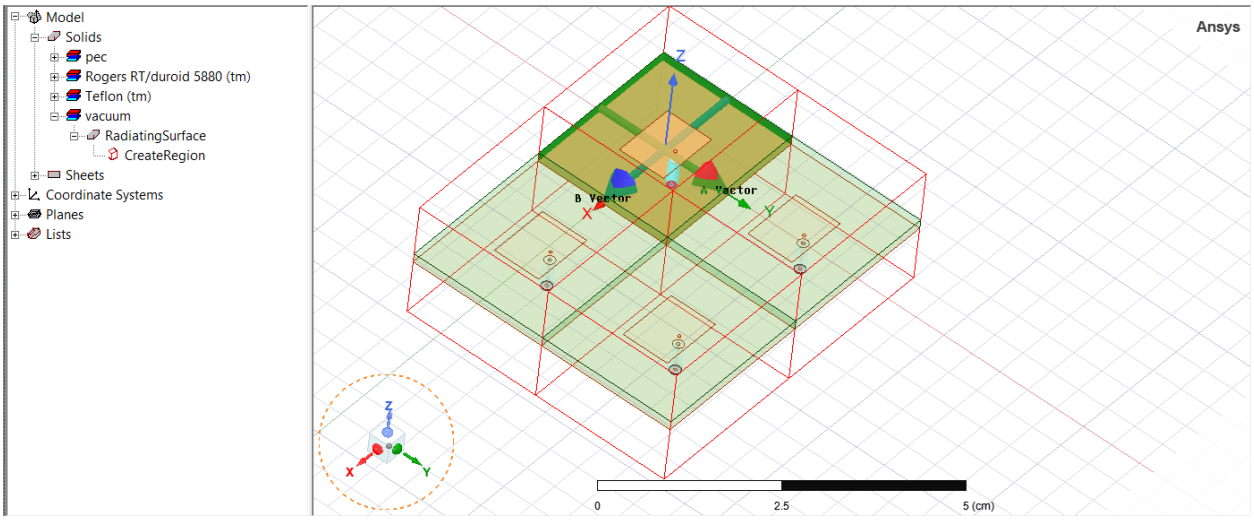
Σχήμα 3-12. Δημιουργία open region.

Τελικό βήμα για την δημιουργία της συστοιχίας 2x2 ήταν στο παράθυρο ιδιοτήτων της συστοιχίας. Όπου εκεί ορίστηκε, η δομή κατά μήκος των δύο διανυσμάτων πλέγματος A και B τα οποία αντιστοιχούν στο Lattice Pair1 και Lattice Pair 2 αντίστοιχα. Για κάθε διεύθυνση επιλέχθηκε μέγεθος ίσο με δύο δημιουργώντας έτσι συνολικά μια κανονική συστοιχία 2x2 όμοιων στοιχείων patch.



Σχήμα 3-13. Δημιουργία Συστοιχίας 2x2 με ομοαξονική τροφοδοσία.

Ολοκληρώνοντας κάθε στοιχείο είναι γεωμετρικά όμοιο με το αρχικό patch που είναι τοποθετημένο πάνω στο διηλεκτρικό υπόστρωμα που αναφέραμε προηγουμένως με κοινό επίπεδο γείωσης. Γύρο από την συστοιχία ορίζεται ως περιοχή ακτινοβολίας. Επίσης στο κεντρικό patch φαίνονται οι δύο διανυσματικοί άξονες A vector και B vector που ουσιαστικά ορίζουν τις κατευθύνσεις του array και χρησιμοποιούνται από το HFSS για φασική σάρωση.



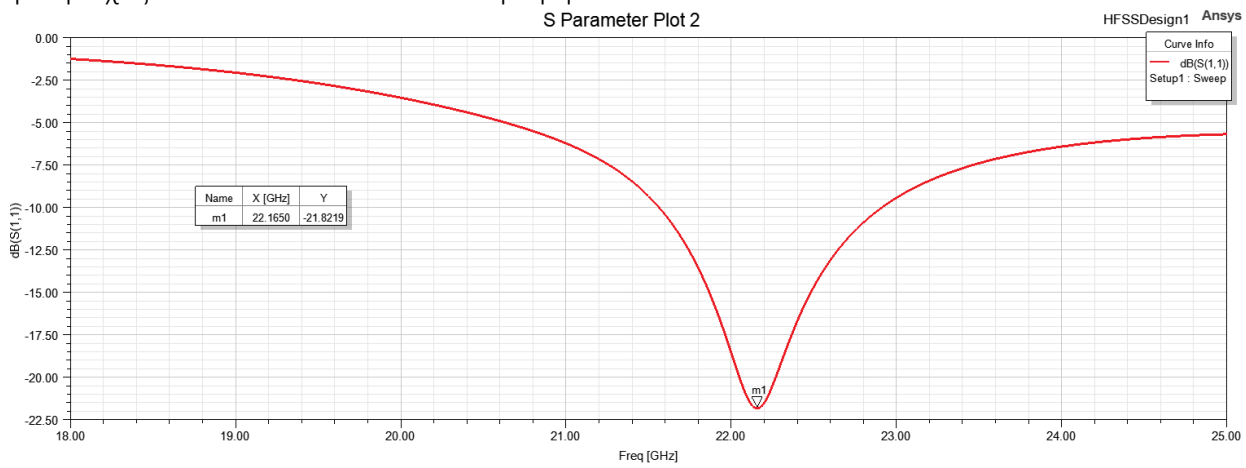
Σχήμα 3-14. Τελική απεικόνιση συστοιχίας 2x2 τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα εξηγήσουμε τα αποτελέσματα για κάθε ένα σχέδιο για την δομή της μικροταινιακής κεραίας αλλά και της στοιχειοκεραίας. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα S11, τα διαγράμματα ακτινοβολίας (3D) και το διάγραμμα ακτινοβολίας (2D) σε πολική μορφή.

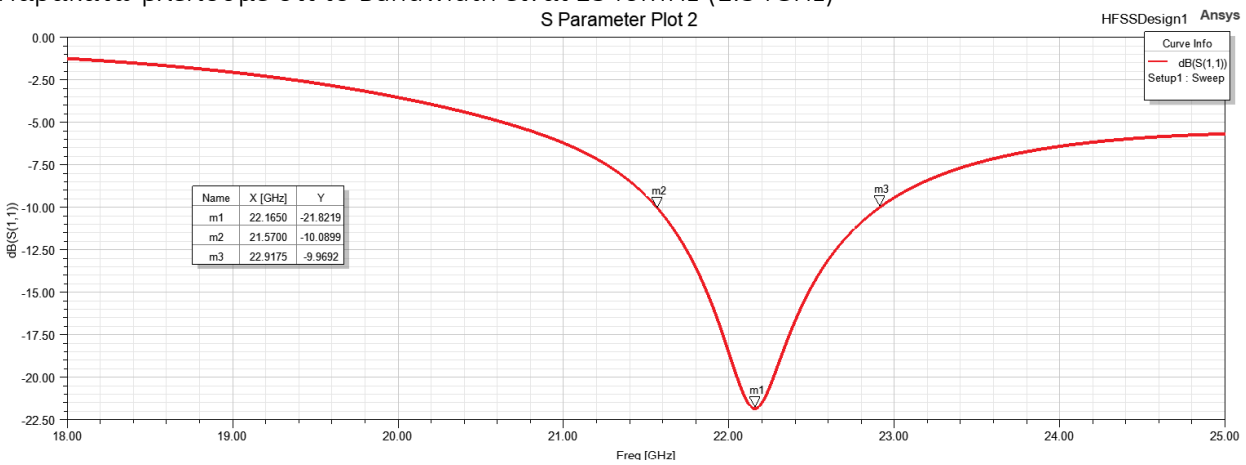
4.1 Αποτελέσματα που αφορούν την μικροταινιακή κεραία

Στο παρακάτω σχήμα θα δούμε το διάγραμμα S11 το οποίο μας δείχνει σε ποια συχνότητα είναι συντονισμένη η κεραία. Πιο ειδικά στον άξονα X βλέπουμε την συχνότητα σε GHz και παρατηρούμε ότι συντονίζεται στα **22,16**GHz ενώ στον άξονα Y βλέπουμε το εύρος ζώνης της κεραίας (bandwidth) το οποίο είναι **1340**MHz. Αυτό σημαίνει ότι έχει σχεδόν μηδενικές απώλειες άρα η ισχύς που ανακλάται είναι πολύ μικρή.



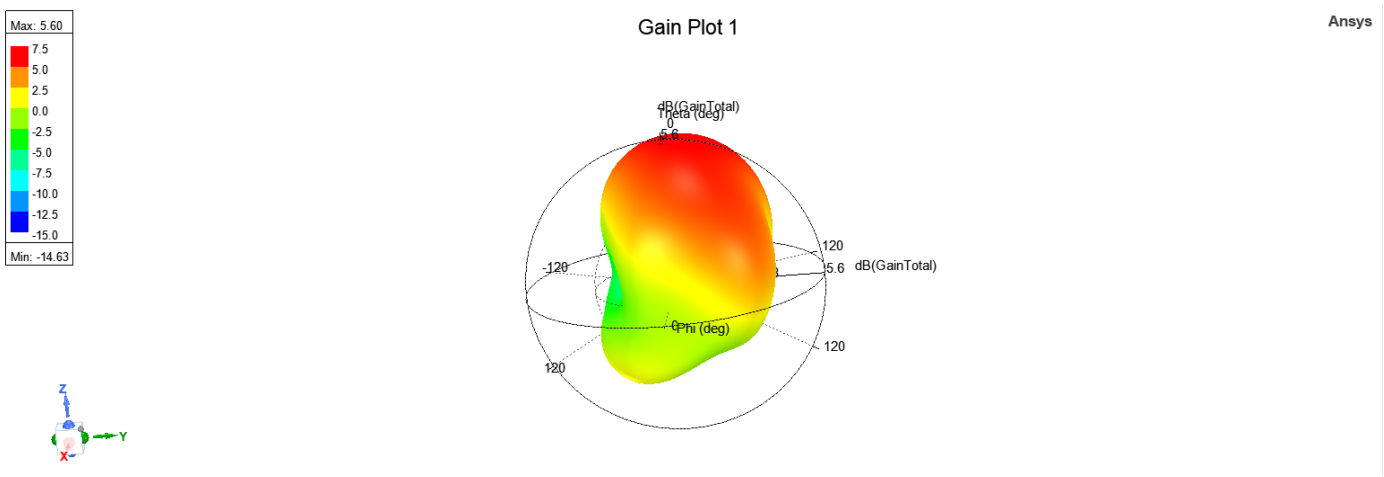
Σχήμα 4-1. Διάγραμμα S11 μικροταινιακής

Παρακάτω βλέπουμε ότι το Bandwidth είναι 1340MHz (1.34GHz)



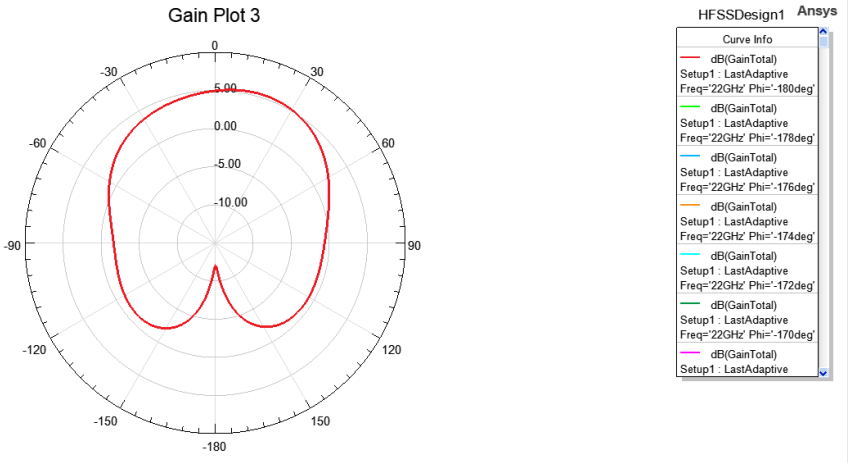
Σχήμα 4-2. Εύρος Ζώνης δομής.

Στο επόμενο σχήμα θα δούμε και θα μελετήσουμε το 3D διάγραμμα ακτινοβολίας με συνολικό μέγιστο πλάτος κατευθυντικότητας 5.6 db.



Σχήμα 4-3. Συνολική απολαβή δομής. (5,6 db)

Εμβαθύνοντας στην ανάλυση του σχήματος η τρισδιάστατη απεικόνιση μας δείχνει την κατευθυντικότητα της κεραίας δηλαδή προς τα που εκπέμπει. Οι κόκκινες περιοχές μας δείχνουν τις κατευθύνσεις της μέγιστης ακτινοβολίας (gain) που στην προκειμένη περίπτωση είναι 5,6 dbi το οποίο υποδηλώνει ότι η κεραία κατευθύνει περισσότερη ενέργεια προς την επιθυμητή διεύθυνση. Οι πράσινες περιοχές και οι μπλε μας δείχνουν τις κατευθύνσεις με χαμηλή ακτινοβολία ή μηδενική ακτινοβολία.
Παρακάτω θα δούμε και θα εξηγήσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας (2D) σε πολική μορφή για θ=-180 μοίρες έως 180 μοίρες και ϕ=180 μοίρες.



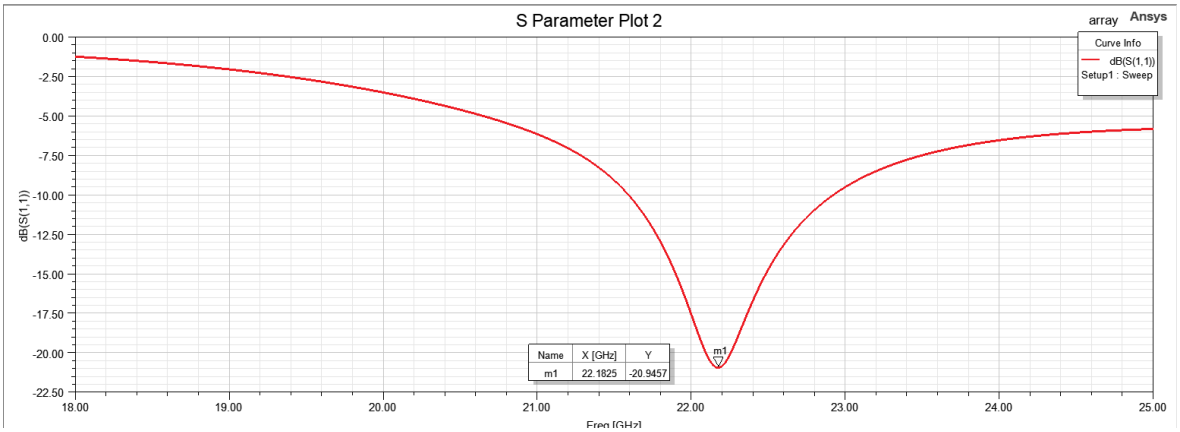
Σχήμα 4-4. Διάγραμμα ακτινοβολίας μικροταινιακής για θ=-180 μοίρες έως 180 μοίρες και φ=180 μοίρες

Το παραπάνω διάγραμμα μας δείχνει την κατανομή του συνολικού κέρδους (gain total) της κεραίας ως προς την γωνία Θ που είναι 5,41 dbi . Δηλαδή η κεραία έχει καλό κατευθυντικό μοτίβο με έμφαση την έντονη εκπομπή προς τα εμπρός.

4.2 Αποτελέσματα που αφορούν την στοιχειοκεραία

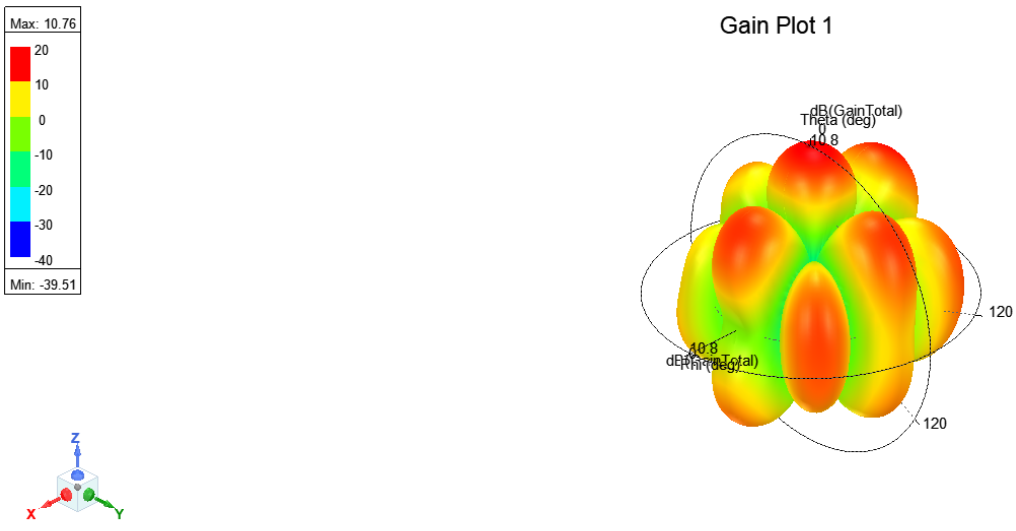
Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το διάγραμμα S_{11} στην περιοχή συχνοτήτων από 18 έως 25 GHz με συχνότητα συντονισμού στα 22,18GHz με bandwidth (εύρος ζώνης λειτουργείας) κοντά στα 22

GHz. Η τιμή αυτή μας δείχνει μια πολύ καλή προσαρμογή κοντά στο 1,2 γεγονός που σημαίνει ότι μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό της ισχύος ανακλάται πίσω στην πηγή ενώ το υπόλοιπο τροφοδοτεί αποτελεσματικά την συστοιχία.



Σχήμα 4-5. Διάγραμμα S11 Συστοιχίας

Το επόμενο διάγραμμα που θα δούμε ονομάζεται διάγραμμα ακτινοβολίας και κέρδους. Σε αυτό το σχήμα αναλύουμε το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας στη συχνότητα των 22GHz. Η μέγιστη τιμή κέρδους (gain) που λάβαμε είναι στα 10,76db. Η μέγιστη ακτινοβολία εμφανίζεται κοντά στον άξονα Z (broadside) όπως αναμένεται για συμμετρική συστοιχία 2x2. Επίσης βλέπουμε γύρω από την κύρια δέσμη δευτερεύοντες λοβοί (side lobes) με χαμηλότερο επίπεδο σε σχέση με τον κύριο λοβό. Ακόμα παρατηρούμε ότι σε σχέση με την μονή κεραία υπάρχει μια λογική αύξηση του κέρδους και αυτό γίνεται διότι αντί να έχουμε μία κεραία έχουμε τέσσερις. Μια τελευταία διαφορά που παρατηρούμε είναι πως η συστοιχία είναι πιο κατευθυντική όπως ήταν αναμενόμενο.

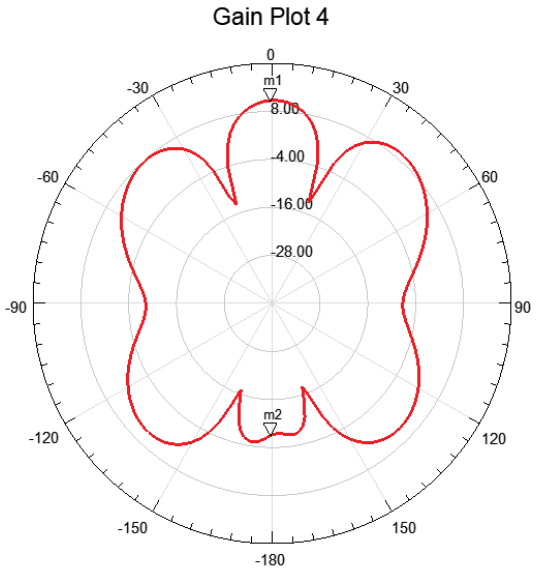


Σχήμα 4-6. Συνολική απολαβή συστοιχίας (10,76 db)

Το τελευταίο διάγραμμα που θα δούμε και θα αναλύσουμε είναι το διάγραμμα ακτινοβολίας (2D) σε πολική μορφή. Το συγκεκριμένο διάγραμμα μας δείχνει μια πιο λεπτομερή ανάλυση της

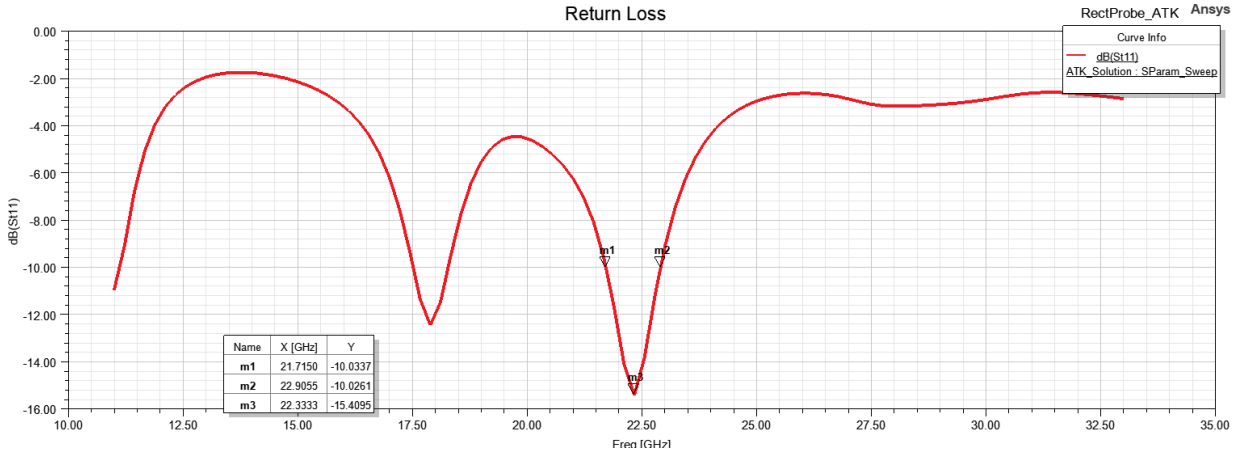
κατευθυντικότητας στο επίπεδο γύρο από το broadside. Ως προς τον άξονα Θ=0 μοίρες παρατηρούμε ότι η κύρια δέσμη εμφανίζεται με τιμή κέρδους 10,73 db ενώ για Θ=180 μοίρες βλέπουμε το κέρδος στο -7,18 db (οπίσθιος λοβός). Συμπερασματικά, η μορφή αυτού του διαγράμματος μας δείχνει έναν σαφή στενό κύριο λοβό και ελεγχόμενους δευτερεύοντες λοβούς όπου επιβεβαιώνει ότι η συστοιχία λειτουργεί ως κατευθυντική κεραία broadside.

Name	Theta [deg]	Ang	Mag
m1	0.00	4.9738E-13	10.7385
m2	180.00	180.0000	-7.1823



Σχήμα 4-7. Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας συστοιχίας.

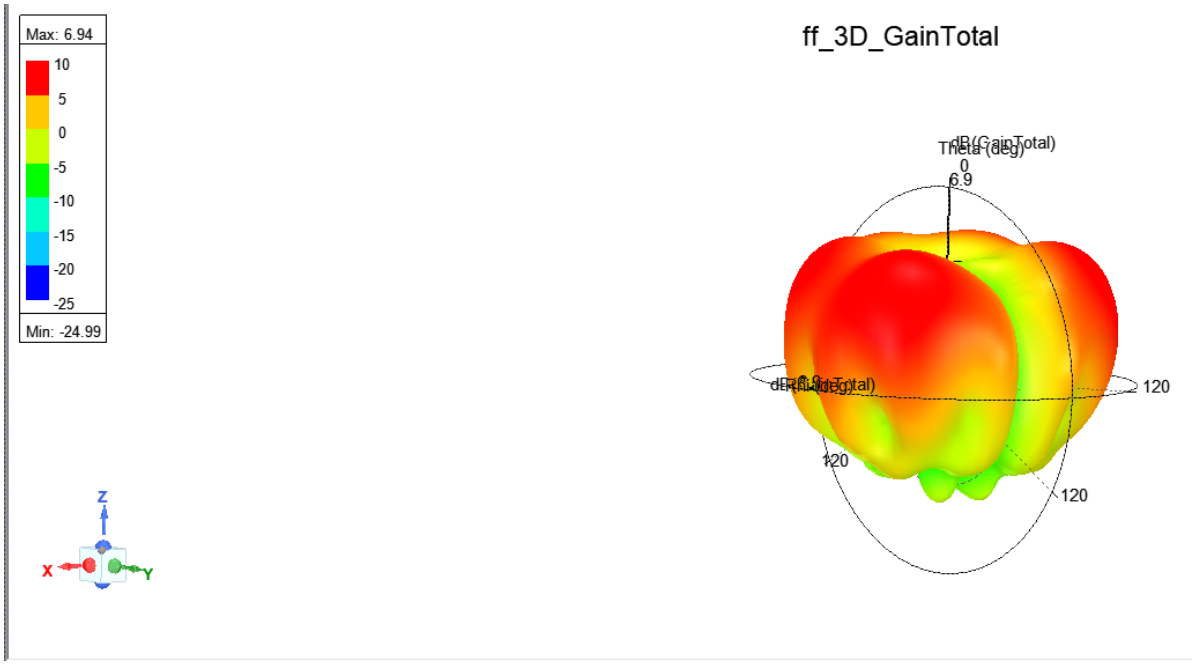
4.3 Αποτελέσματα που αφορούν για το μονό στοιχείο τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία.



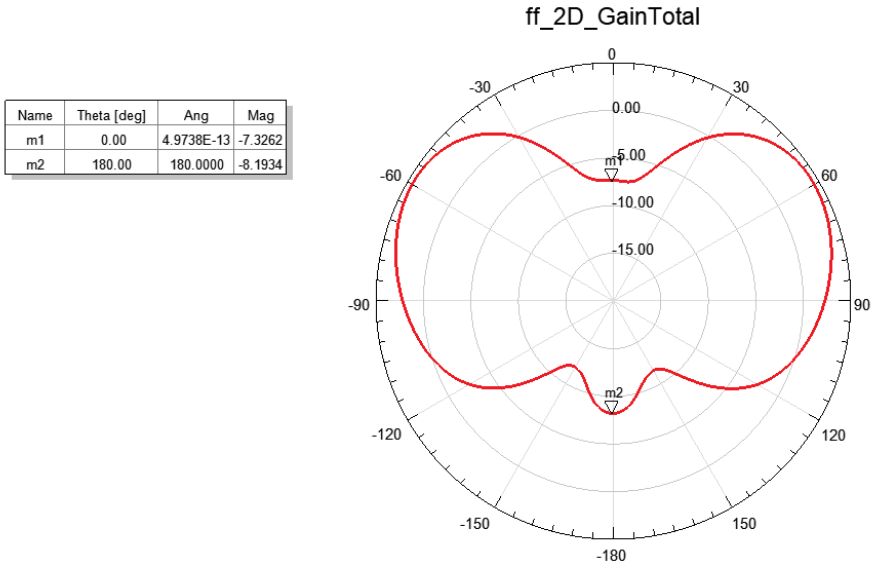
Σχήμα 4-8. Διάγραμμα S11 με ομοαξονική τροφοδοσία.

Στο παραπάνω διάγραμμα S_{11} παρουσιάζεται η καμπύλη επιστροφής απώλειας για εύρος 10-35 GHz. Η κεραία εμφανίζει έναν συντονισμό στα 18GHz και τον βασικό συντονισμό στη ζώνη ενδιαφέροντος στα 23,33GHz. Στο σημείο αυτό η τιμή του S_{11} είναι -15,4db συνεπώς το εύρος

ζώνης είναι (bandwidth) = f2-f1 = 1.19GHZ άρα η προσαρμογή της κεραίας είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική με ποσοστό μεταφερόμενης ισχύς πάνω από 95%.
Παρακάτω βλέπουμε το 3D διάγραμμα κέρδους. Η μέγιστη τιμή του ολικού κέρδους είναι 6,94 db και εμφανίζεται κατά μήκος του άξονα Z δηλαδή στην κατεύθυνση broadside άρα το patch σύμφωνα με το σχήμα έχει καλή κατευθυντικότητα προς τα εμπρός. Στην συνέχεια παρατηρούμε ότι το διάγραμμα είναι σχεδόν συμμετρικό ως προς τους άξονες X και Y χαρακτηριστικό που οφείλεται στη συμμετρική γεωμετρία του ορθογωνίου patch.



Σχήμα 4-9. Συνολική απολαβή δομής με ομοαξονική τροφοδοσία. (6,94 db)



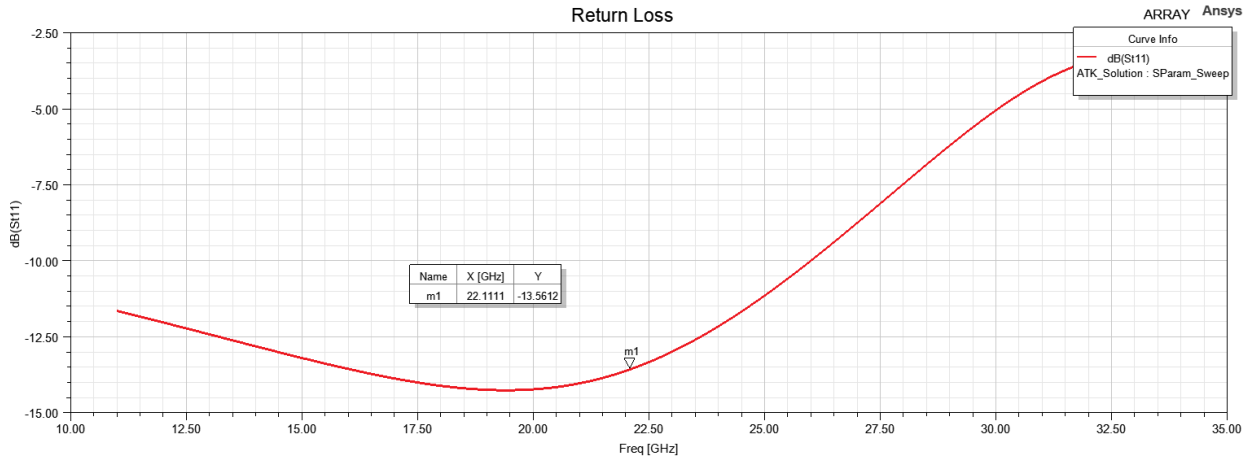
Name	Theta [deg]	Ang	Mag
m1	0.00	4.9738E-13	-7.3262
m2	180.00	180.0000	-8.1934

Σχήμα 4-10. Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας με ομοαξονική τροφοδοσία.

Ολοκληρώνοντας τα αποτελέσματα από το μονό στοιχείο θα δούμε το 2D διάγραμμα κέρδους στην κεντρική συχνότητα λειτουργείας για δύο κύρια επίπεδα, στο επίπεδο φ στις 0 μοίρες και στο επίπεδο φ στις 90 μοίρες. Η κεραία εμφανίζει κύρια δέσμη στην κατεύθυνση broadside Θ = 0 μοίρες με μέγιστο κέρδος -7,32 db και στην αντίθετη κατεύθυνση στις 180 μοίρες -8,19 db αντίστοιχα. Άρα το αντίστοιχο front-back ratio είναι της τάξης 0,87 db γεγονός που μας δείχνει ότι η κεραία ακτινοβολεί σχεδόν συμμετρικά προς τα εμπρός και προς τα πίσω.

4.4 Αποτελέσματα που αφορούν την συστοιχία τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία.

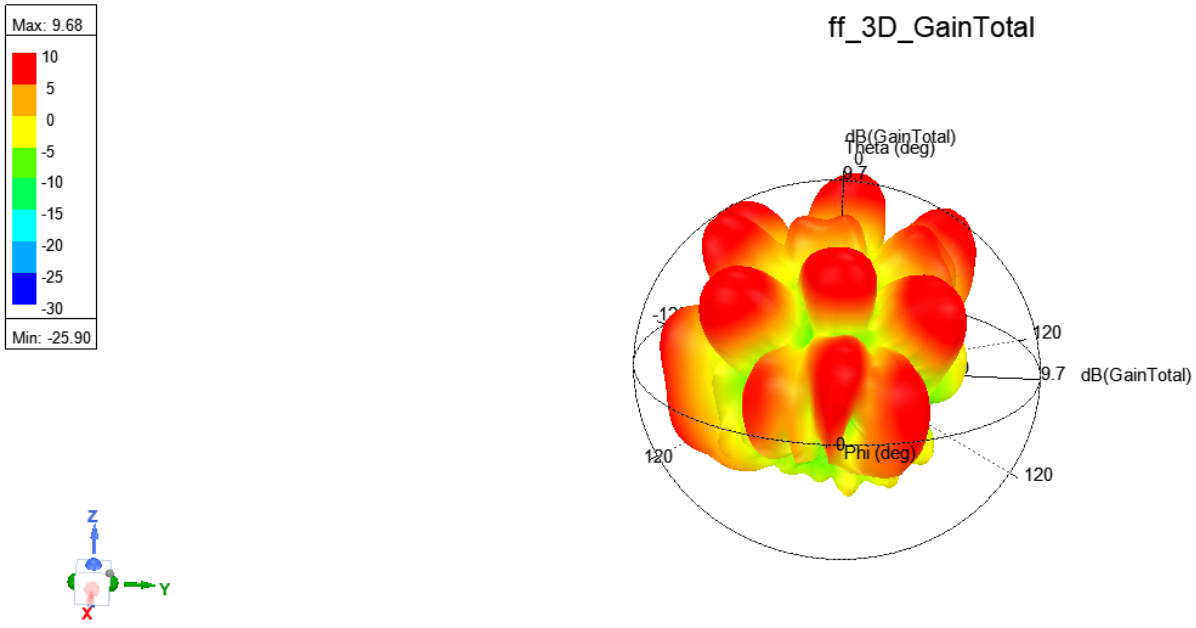
Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε το διάγραμμα Return loss της συστοιχίας. Για την συχνότητα που μας ενδιαφέρει στα 22GHz η τιμή είναι στα -13,56 db που υποδεικνύει μια πολύ καλή προσαρμογή μεταξύ της γραμμής τροφοδοσίας και κεραίας. Παρατηρούμε ότι σε σχέση με την μονή patch του διαγράμματος S11 δεν επιδεινώνει δραματικά την προσαρμογή αλλά διατηρείται γύρω από τα 22GHz.



Σχήμα 4-11 Διάγραμμα S11 συστοιχίας με ομοαξονική τροφοδοσία

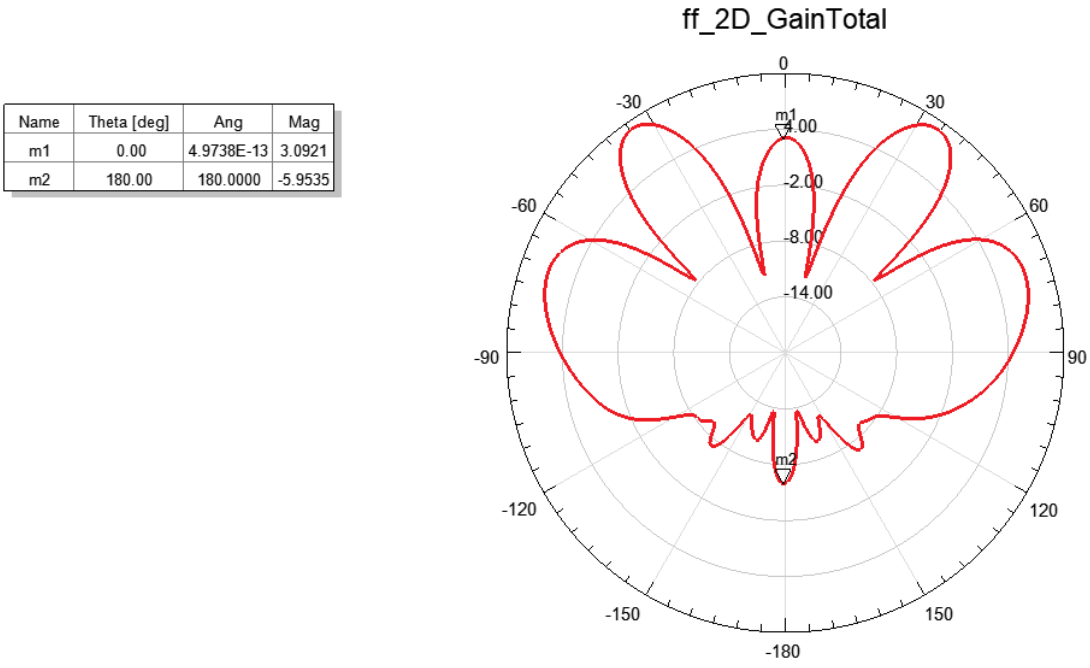
Στην συνέχεια των αποτελεσμάτων μας θα αναλύσουμε το τρισδιάστατο διάγραμμα κέρδους της συστοιχίας 2x2. Το μέγιστο ολικό κέρδος ανέρχεται στο 9,68 db και εμφανίζεται κοντά στον άξονα z δηλαδή κάθετα στο επίπεδο του υποστρώματος. Σε σχέση με τη μονή κεραία παρατηρείται αύξηση του κέρδους της τάξης των 2,74 db. Γύρο από τον κύριο λοβό εμφανίζονται πλευρικοί λοβοί, οι οποίοι είναι χαμηλότεροι από το μέγιστο. Αυτό οφείλεται και στην μεταξύ τους σύζευξη των κεραιών (mutual coupling) .

Τελευταίο αποτέλεσμα που θα παρουσιάσουμε είναι η δισδιάστατή κατανομή του ολικού κέρδους της συστοιχίας 2x2. Η κύρια δέσμη εμφανίζεται στη διεύθυνση Θ=0 μοίρες, με μέγιστο κέρδος 3,09 db ενώ, στην αντίθετη διεύθυνση θ=180μοίρες το κέρδος είναι -5,95 db. Επομένως το αντίστοιχο front-back ratio είναι της τάξης 9,04 db γεγονός που μας δείχνει την προτίμηση ακτινοβολίας προς τα εμπρός. Σε σύγκριση με τη μεμονωμένη κεραία patch, στην συστοιχία 2x2 παρουσιάζεται με στενότερο κύριο λοβό το οποίο υποδηλώνει αυξημένη κατευθυντικότητα.



Σχήμα 4-12. Συνολική απολαβή συστοιχίας με ομοαξονική τροφοδοσία. (9,68 db)

Ωστόσο εμφανίζονται περισσότεροι και υψηλότεροι πλευρικοί λοβοί όπως είναι αναμενόμενο σε συστοιχίες κεραιών λόγω της αμοιβαίας σύζευξης (mutual coupling) και της μεταξύ τους απόστασης.



Name	Theta [deg]	Ang	Mag
m1	0.00	4.9738E-13	3.0921
m2	180.00	180.0000	-5.9535

Σχήμα 4-13. Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας συστοιχίας με ομοαξονική τροφοδοσία.

Στο πλαίσιο μελλοντικής επέκτασης της παρούσας μελέτης, μπορούν να εξεταστούν διάφορες κατευθύνσεις. Ενδεικτικά, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σχεδίαση και προσομοίωση

στοιχειοκεραιών μεγαλύτερης διάστασης, όπως διατάξεις 4×4 ή 8×8, με στόχο περαιτέρω αύξηση του κέρδους και στενότερη δέσμη ακτινοβολίας. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η υλοποίηση ηλεκτρονικής σάρωσης της δέσμης μέσω ελεγχόμενων φασικών μετατοπιστών ή δικτύων τροφοδοσίας τύπου Butler matrix.

Μία ακόμη προοπτική αφορά τη μελέτη διαφορετικών υλικών υποστρώματος και πολυστρωματικών δομών, με σκοπό τη βελτίωση του εύρους ζώνης και τη μείωση των απωλειών, ιδιαίτερα σε πολύ υψηλές συχνότητες. Τέλος, σημαντικό επόμενο βήμα θα μπορούσε να αποτελέσει η πειραματική κατασκευή και μέτρηση των προτεινόμενων διατάξεων, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και να αξιολογηθεί η πρακτική τους απόδοση σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε ο πλήρης σχεδιασμός, η προσομοίωση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μια μικροταινιακής κεραίας (microstrip patch antenna) που συντονίζει στα 22GHz, μιας επέκτασής του σε 2x2 array (συστοιχίας) και τέλος ακόμη μιας κεραίας μικροταινιακής τύπου patch με ομοαξονική τροφοδοσία. Το αρχικό στοιχείο σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις για την λειτουργία της κεραίας για δορυφορικές επικοινωνίες στη συχνότητα που αναφέραμε προηγουμένως. Οι προσομοιώσεις έδειξαν συντονισμό στην επιθυμητή περιοχή με S_{11} στα 22,16GHz και bandwidth στα 1.34GHz. Με την μετατροπή σε array 2x2 συνειδητοποιήσαμε τα οφέλη της συγκεκριμένης λειτουργείας βάση των αποτελεσμάτων, όπως για παράδειγμα οδηγηθήκαμε σε μια λογική αύξηση κέρδους της τάξης των 5,16dbi επιτρέποντας μεγαλύτερη εμβέλεια και καλύτερη ποιότητα του σήματος. Στην συνέχεια σχεδιάσαμε μια μικροταινιακή κεραία με ομοαξονική τροφοδοσία όπως και την συστοιχία της (2x2) και συγκρίναμε τα αποτελέσματα.

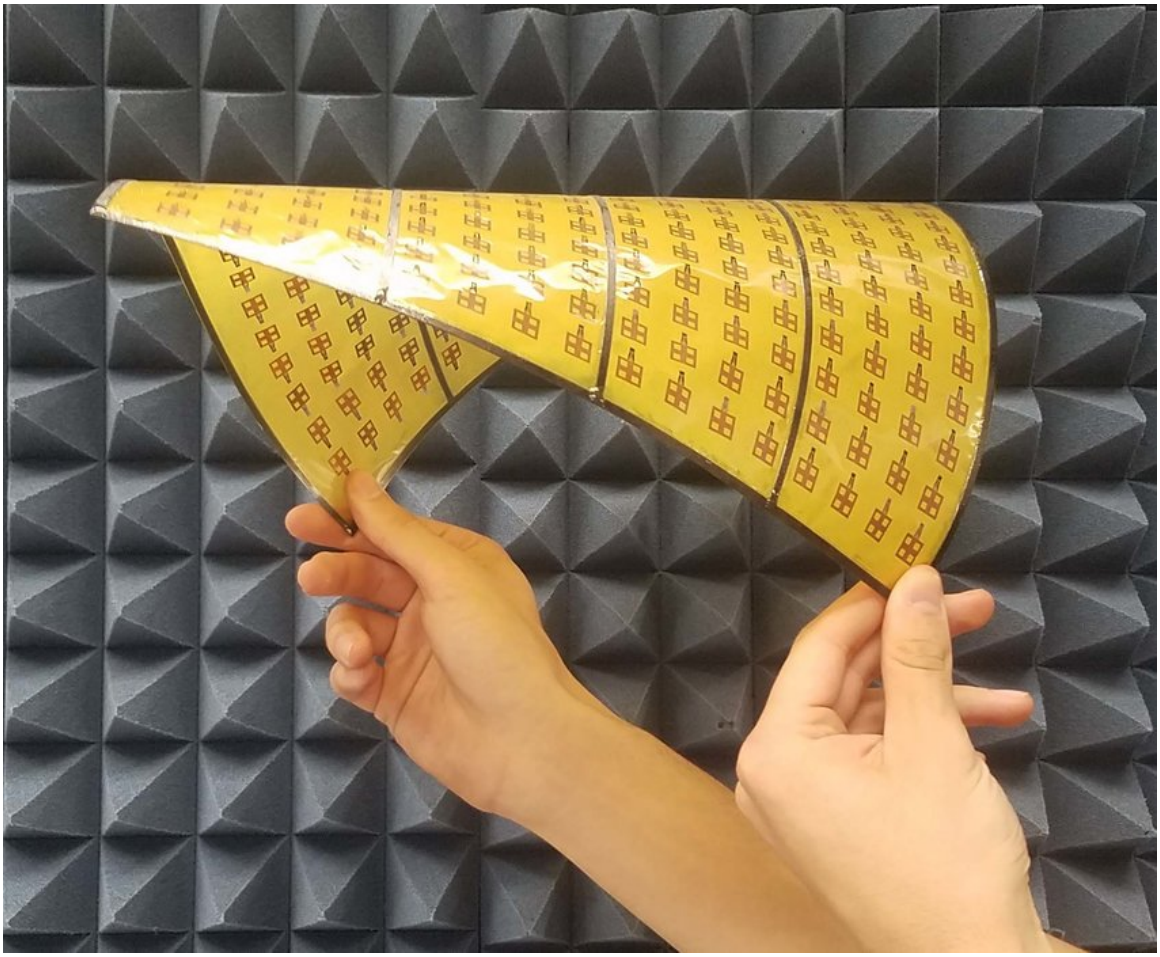
Η ουσιαστική συμβολή της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός εύκολου και απλού στην κατασκευή μιας μικροταινιακής κεραίας στοιχείου για 22GHz με απόδειξη ότι το σύστημα μπορεί να επεκταθεί σε μια συστοιχία 2x2. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν χρησιμοποιώντας την βοήθεια του εργαλείου ANSYS HFSS όπου περιείχε τα δύο γεωμετρικά σχήματα με συγκεκριμένα υλικά και ακρίβεια στις διαστάσεις. Να σημειωθεί ότι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) που χρησιμοποιήθηκε απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους για μεγάλες συστοιχίες όπως για παράδειγμα για 8x8 (array) και γι’ αυτό τον λόγο περιοριστήκαμε στο 2x2.

Μελλοντική Εργασία

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για ελαφριές και εύκαμπτες λύσεις επικοινωνίας σε εφαρμογές όπως είναι η ιατρική παρακολούθηση, ο αθλητισμός και τα ασύρματα δίκτυα έχουν οδηγήσει την έρευνα σε νέα υλικά και τεχνολογίες. Σε αυτό το πλαίσιο, οι υφασμάτινες μικροταινιακές κεραίες αποτελούν μια ιδιαίτερη λύση. Τον τελευταίο καιρό το ύφασμα έχει κερδίσει την προτίμηση των ερευνητών για τον σχεδιασμό εύκαμπτων φορέσιμων κεραιών. Οι υφασμάτινες μικροταινιακές κεραίες προσφέρουν υψηλή ευελιξία, μικρές διαστάσεις, χαμηλό κόστος και χαμηλό SAR καθιστώντας τες ιδανικές για εφαρμογές όπως ιατρική τηλεμετρία, παρακολούθηση φυσικής κατάστασης και για στρατιωτικές χρήσεις. Το ύφασμα χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό υλικό στην κατασκευή εύκαμπτων εκτυπώσιμων κεραιών και επιτυγχάνει ένα συμπαγές και χαμηλού κόστος δίκτυο τροφοδοσίας με ενσωμάτωση του RF fronted και των ακτινοβολούντων στοιχείων στο ίδιο υπόστρωμα [32], [33], [34]. Η απόδοση επηρεάζεται από ιδιότητες του υλικού όπως για παράδειγμα το πάχος, την διηλεκτρική σταθερά και τα υφάσματα. Για ιατρικές εφαρμογές απαιτούνται ακόμα πιο συμπαγείς και ασφαλείς εύκαμπτοι μικρότεροι σχεδιασμοί με μέγεθος κατά 15-20% από το μήκος της κεραίας για ελεύθερο χρόνο ώστε να μπορούν να τοποθετούνται και να παραμένουν κοντά στο ανθρώπινο σώμα για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάτι που οι συμβατικές και άκαμπτες κεραίες αποτυγχάνουν. Συνολικά, εάν σχεδιάσουμε κεραία χρησιμοποιώντας το ύφασμα ως υπόστρωμα, με το κατάλληλο σχήμα και δομή, η ευελιξία της φορέσιμων κεραίας αυξάνεται και η κεραία λειτουργεί σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων και για διάφορες εφαρμογές [29], [31].

Καθώς η τεχνολογία των φορέσιμων και εύκαμπτων κεραιών εξελίσσεται, οι απαιτήσεις για πιο προηγμένα συστήματα αυξάνεται. Για αυτόν τον λόγο η ανάγκη για υψηλές επιδόσεις σε

περιβάλλον όπου η κεραία υφίσταται συνεχή παραμόρφωση κατευθύνει την έρευνα πέρα από τις μεμονωμένες κεραίες και προς την χρήση εύκαμπτων συστοιχιών. Οι εύκαμπτες συστοιχίες κεραιών προσφέρουν δυνατότητες που δεν μπορούν να επιτευχθούν με άκαμπτα συστήματα, επιτρέποντας την χρήση τους σε φορέσιμες συσκευές και εύκαμπτες δομές. Ωστόσο η ευελιξία τους δημιουργεί αβεβαιότητα ως προς τη θέση και τον προσανατολισμό των στοιχείων, γεγονός που δυσκολεύει την ορθή λειτουργία τους. Επειδή το σχήμα τους μπορεί να αλλάζει κατά την ανάπτυξη ή την λειτουργία, οι συστοιχίες αυτές πρέπει να μπορούν να προσδιορίσουν το τρέχον σχήμα τους και να προσαρμόζουν συνεχώς τις φάσεις ώστε να διατηρούν συνοχή και σωστή κατεύθυνση της δέσμης. Αν επιτευχθεί γρήγορη και ακριβής ανακατασκευή του σχήματος, οι εύκαμπτες συστοιχίες θα μπορούν να λειτουργούν αξιόπιστα ακόμη και σε συνθήκες κάμψης και παραμόρφωσης [30].



Σχήμα 5-1. Εύκαμπτο φύλλο κεραίας φάσης [30].

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1]. Encyclopaedia Britannica, «Development of satellite communication,» Encyclopaedia Britannica, Inc., May 31,2025.
[2]. GSOA (Global Satellite Operators Association), «The fundamentals of satellite,» GSOA.
[3]. Encyclopaedia Britannica, Inc, «Space Applications,» Encyclopaedia Britannica, Inc, 2025.
[4]. esa (European Space Agency), «Eduspace global,» esa .
[5]. Flanders Marine Institute, «Oil spill monitoring,» Coastal Wiki.
[6]. National Oceanic and Atmoshperic Admnistration (NOAA), «Cospas-Sarsat system overview,» NOAA Sarsat.
[7]. Christian scott, CBT Nuggets, «SpaceX Starlink: How Does It Work,» CBT Nuggets Blog, 2021.
[8]. Inmarsat, «What is satellite spectrum used for?,» Inmarsat, 2023.
[9]. Number Analytics, «Ultimate Guide to C-Band in satellite Communications,» Number Analytics.
[10]. Spire Global, «X-Band,» Spire.
[11]. Number Analytics, «Ultimate Guide to Ku-Band in Satellite Communication,» Number Analytics.
[12]. Cadence Design Systems, «The Pros and Cons of Ka-Band Applications,» Cadence PCB Resources.
[13]. Hypex Engineering Systems Ltd, «Classic Satellite Frequency Bands: Ka, Ku and V Bands - Communications Payloads for LEO Satellite Broadband Delivery,» Hypex Blogs.
[14]. C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4 επιμ., τόμ. 4, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
[15]. Κ. Ιωάννης, «Ιδρυματικό αποθετήριο - Διεθνες Πανεπιστήμιο της Ελλαδος,» Αύγουστος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://repository.ihu.gr/search?spc.page=1&query=kwntzoglou.
[16]. S. F. Abdulkareem, «Design and Fabrication of Printed Fractal Slot Antennas for Dual-band Communication Applications,» October 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/271530182_Design_and_Fabrication_of_Printed_Fractal_Slot_Antennas_for_Dual-band_Communication_Applications.
[17]. R. K. R. V. W. B. Thomas Brauner, «5-6 GHz Low-Noise Active Antenna Array for Multi-Dimensional Channel-Sounding,» October 2003. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/4042059_5-6_GHz_Low-Noise_Active_Antenna_Array_for_Multi-Dimensional_Channel-Sounding.
[18]. S. B. R. T. Youssef Rhazi, «Effect of Microstrip Antenna Feeding in the K-band,» December 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/290603753_Effect_of_Microstrip_Antenna_Feeding_in_the_K-band.
[19]. R. S. R. D. R. Tiwari, «Microstrip Patch Antenna Array Design Anaylsis for 5G Communication Applications,» May 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/345339399_Microstrip_Patch_Antenna_Array_Design_Anaylsis_for_5G_Communication_Applications.

[20]. D. M. Pozar, «A Review of Aperture Coupled Microstrip Antennas: History, Operation, Development, and Applications,» May 1996. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://people.umass.edu/dpozar/miscfiles/aperture.pdf.

[21]. Y. W. P. L. S. X. Q. X. Y. S. Congsi W, «Space Phased Array Antenna Developments: A Perspective on Structural Design,» IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine , 06 July 2020.

[22]. Elprocus, «Antenna Array : Design, Working, Types & Its Applications,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.elprocus.com/antenna-array/.

[23]. H. A. N. A. T. M. A. K. Z. A. T. M. Moubadir, «Design and Implementation of a Technology Planar 4x4 Butler Matrix for Networks Application,» January 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/303106848_Design_and_implementation_of_a_technology_planar_44_butler_matrix_for_networks_application.

[24]. P. T. L. B. M. P. M. Dr.M.LakshmuNaid, «Design of Compact Microstrip Antenna Array for Wireless Applications by Using HFSS,» International Journal of Innovative Research in Technology, June 2022.

[25]. D. S. D. S. Mekala Harinath, «Design and implementation of a beam-steering antenna array using butler matrix feed network for X-band applications,» 11 February 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841122000449#b0025.

[26]. Z. Cendes, «The development of HFSS,» σε 2016 USNC-URSI Radio Science Meeting, Fajardo, PR, USA, 2016.

[27]. D. O. E. Mrabet, «High Frequency Structure Simulator (HFSS),» 2005-2006. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.academia.edu/3356546/High_Frequency_Structure_Simulator_HFSS_Tutorial#outer_page_3.

[28]. «HFSS Introduction,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://arbabianwiki.stanford.edu/uploads/7/7f/HFSSintro.pdf.

[29]. gyanvihar, «Flexible Microstrip Antenna in wearable Applications,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.gyanvihar.org/journals/flexible-microstrip-antenna-in-wearable-applications/.

[30]. A. H. Oren Mizrahi, «A Framework for Array Shape Reconstruction Through Mutual Coupling,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/353504061_A_Framework_for_Array_Shape_Reconstruction_Through_Mutual_Coupling.

[31]. Dimousios, T. D., et al. "A new low-profile and cost SPA-PIFA for mobile 2.4 GHz ISM applications." *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 24.7 (2010): 881-891.

[32]. Kapetanakis, T. N., Nikolopoulos, C. D., Petridis, K., & Vardiambasis, I. O. (2021). Wearable textile antenna with a graphene sheet or conductive fabric patch for the 2.45 GHz band. *Electronics*, *10*(21), 2571.

[33]. Kapetanakis, T. N., Pavec, M., Ioannidou, M. P., Nikolopoulos, C. D., Baklezos, A. T., Soukup, R., & Vardiambasis, I. O. (2021). Embroidered Bow-Tie wearable antenna for the 868 and 915 MHz ISM Bands. *Electronics*, *10*(16), 1983.

[34]. M. Pavec *et al*., "Implementation of an all-textile bow-tie antenna for the 868 MHz ISM band," *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Rome, Italy, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245778