



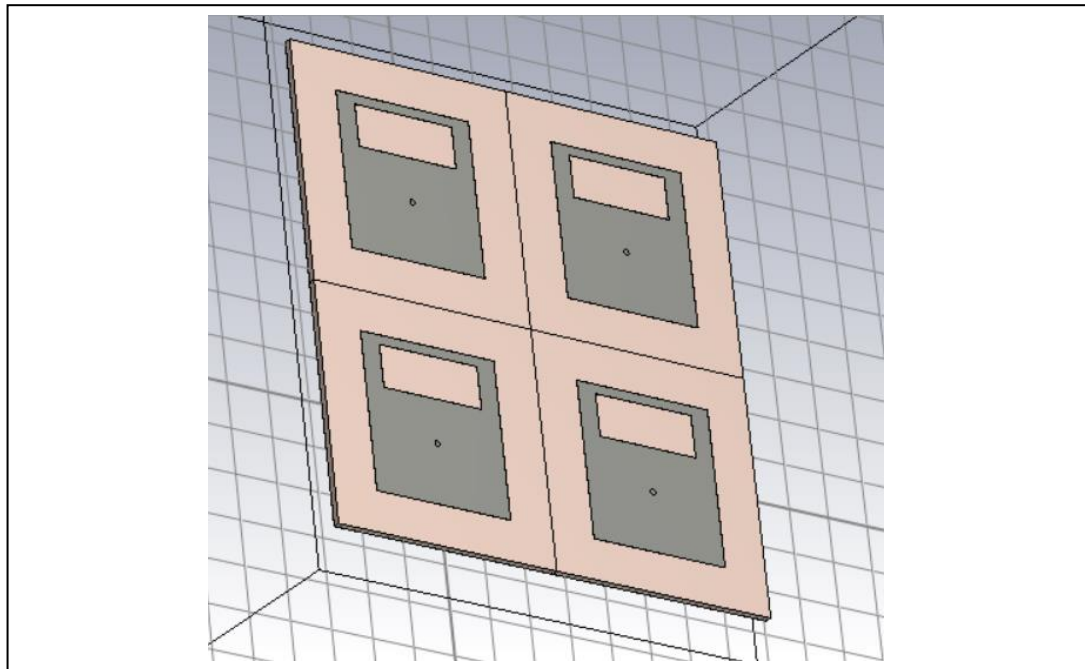
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΔΙΠΛΗΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΑΣ



Φοιτητής: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΤΕΜΠΕΛΗΣ

ΑΜ: 18387055

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωσταντίνος Ν. Βουδούρης

Καθηγητής

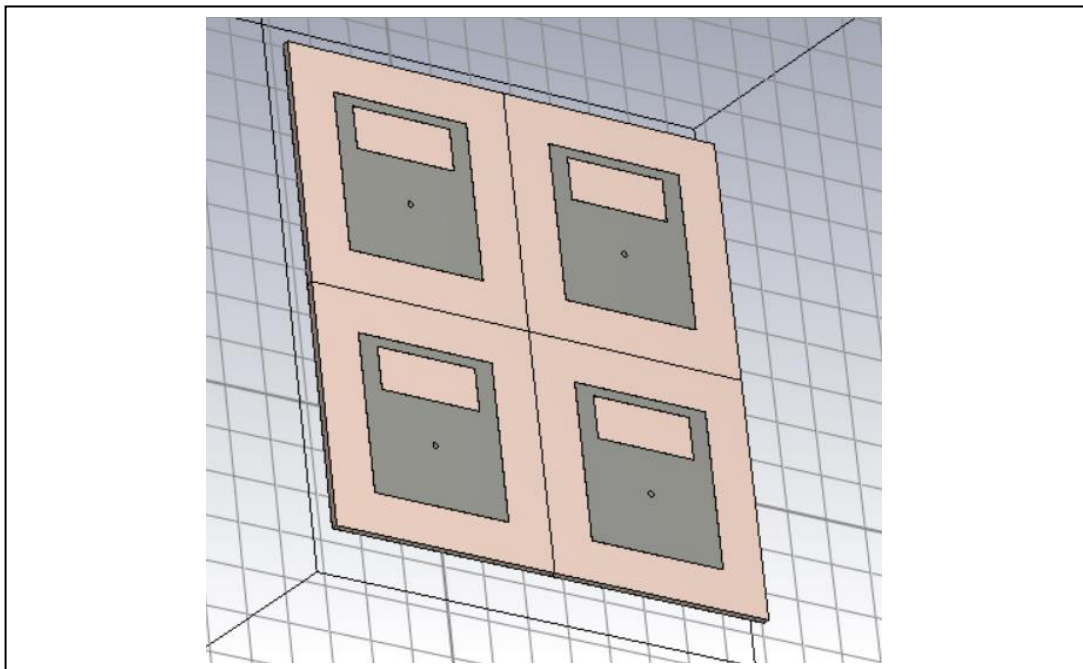
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

**DUAL BAND MICROSTRIP ANTENNA AND BEAM STEERING
NETWORK DESIGN FOR 5G SYSTEMS**



Student: VASILEIOS TEMPELIS
Registration Number: 18387055

Supervisor

Konstantinos N. Voudouris
Professor of Wireless Communications

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2023

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Στυλιανός Μυτιληναίος, Αναπληρωτής Καθηγητής	Στυλιανός Σαββαΐδης, Καθηγητής	Νικόλαος Σταθόπουλος, Καθηγητής

Copyright ©

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Βασίλειος Τεμπέλης, Σεπτέμβριος, 2023

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βασίλειος Τεμπέλης του Αθανασίου, με αριθμό μητρώου 18387055 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 24/10/2023 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΤΕΜΠΕΛΗΣ

Αφιερωμένη στους γονείς μου
Αθανάσιο και Ελένη,
καθώς και στους
Νικόλαο Μαντιδάκη και Γεσθημανή Κοζανίδη.

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της εργασίας, οφείλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές κύριο Κωσταντίνο Βουδούρη, κύριο Στυλιανό Μυτιληναίο και τον διδάσκοντα κύριο Γεώργιο Στρατάκο για την αμέριστη υποστήριξη τους, τις καίριες συμβουλές και την άμεση ανταπόκριση τους όποτε απαιτήθηκε.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω ολόψυχα τους γονείς μου για την αμείωτη υλική και ηθική συμπαράσταση τους, καθώς και την υπομονή τους στη διάρκεια της έως εδώ πορείας μου.

Τέλος, απευθύνομαι στη ΜΑΡΕΛ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Α.Ε και συγκεκριμένα στον κύριο Κυριάκο Αλεξόπουλο για την κατανόηση και υποστήριξη του, ταυτόχρονα με τα πρώτα μου επαγγελματικά βήματα.

Βασίλης Τεμπέλης

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε ο σχεδιασμός μίας μικροταινιακής κεραίας διπλής ζώνης. Ουσιαστικά, στην γεωμετρία της είναι μία εκτυπωμένη κεραία μικροταινίας, όπου στην επάνω επιφάνεια χαράχθηκε μια οπή, της οποίας οι διαστάσεις βρέθηκαν κατόπιν μαθηματικών υπολογισμών και αυθαίρετων προσαρμογών, ώστε τελικά να υπάρξει συντονισμός σε δύο διαφορετικές συχνότητες. Η πρώτη συχνότητα είναι τα 1.87 GHz και η δεύτερη τα 3.33 GHz. Βάσει της χαμηλής συχνότητας, σχηματίσθηκε στοιχειοκεραία 2x2, με σκοπό την αύξηση της κατευθυντικότητας και της ισχύς ακτινοβολίας σε σχέση με το μεμονωμένο στοιχείο. Συνοψίζοντας συμπεριλήφθηκε το γνωστικό υπόβαθρο που απαιτείται για την εκπόνησή της, η διαδικασία σχεδιασμού και οι μαθηματικοί υπολογισμοί που τον συνοδεύουν και τα συμπεράσματα που προέκυψαν έπειτα από τις προσομοιώσεις. Τέλος, γίνεται αναφορά σε προτάσεις για ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις επί του θέματος.

Λέξεις – κλειδιά

Κεραία μικροταινίας, Τροφοδοσία μέσω Ομοαξονικού Σηματολήπτη, Λειτουργίας Διπλής Ζώνης, Στοιχειοκεραία, Μορφοποίηση Δέσμης, Δορυφορικές Επικοινωνίες, Σχεδιασμός Κεραίας, Τηλεπικοινωνίες Ναυτιλιακών Συστημάτων

Abstract

The subject of the diploma thesis was the design of a dual microstrip band-antenna. Essentially, in its geometry, it is a printed microstrip antenna with an additional slot carved out on its top surface, the dimensions of which were arbitrarily determined at two different frequencies, in order to achieve resonance at two different frequencies. The first frequency is 1.87 GHz and the second is 3.33 GHz. Based on the lower frequency, a 2x2 array antenna was formed to increase the directivity and radiation power compared to the individual element. In summary, the required background knowledge for its completion, the design process, and the mathematical calculations that accompany it were included, along with the conclusions drawn from the simulations. Finally, suggestions are made for possible future extensions and improvements on the subject.

Keywords

Microstrip Patch Antenna, Coaxial Feed, Dual Band, Antenna Array, Beam Forming Network, Satellite Communications, Antenna Design, Maritime Telecommunication Systems

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	11
Κατάλογος Εικόνων	11
Αλφαβητικό Ευρετήριο	14
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
Σκοπός και στόχοι.....	17
Μεθοδολογία	17
Καινοτομία	17
Δομή 17	
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Βασικές πληροφορίες Κεραίων.....	18
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	18
1.2 Βασικά Χαρακτηριστικά Κεραίων	19
1.2.1 Πεδίο & Διάγραμμα ακτινοβολίας	19
1.2.2 Εύρος δέσμης και κατεθυντικότητα	21
1.2.3 Πόλωση.....	22
1.2.4 VSWR.....	23
1.2.5 Κέρδος	23
1.2.6 Κέρδος Ισχύος.....	23
1.2.7 Εύρος Ζώνης	24
1.2.8 Συντελεστής ανάκλασης.....	24
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Μικροταινιακές κεραίες	25
2.1 Δομή Μικροταινιακών Κεραίων.....	25
2.2 Ειδή Μικροταινιακών Κεραίων.....	26
2.2.1 Φαινόμενα κροσσών στη γραμμή μικροταινιας.....	27
2.2.2 Προσαρμογή τροφοδοσίας [31]	28
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραίων [31]	30
2.4 Σχισμοκεραίες.....	31
2.5 Ευζωνικές και Πολυσυχνотικές Κεραίες.....	31
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Στοιχειοκεραίες [31] [1] [2].....	32
3.1 Βασικές πληροφορίες Στοιχειοκεραίων.....	32
3.2 Στοιχειοκεραίες και δίκτυα τροφοδοσίας	32
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Σχεδίαση κεραίας και ανάλυση Η/Μ συμπεριφοράς.....	34
4.1 Διαστάσεις διάταξης.....	36
4.2 Επιλογή – Αιτιολόγηση τρόπου τροφοδοσίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας	37
4.2.1 Θεωρητικός υπολογισμός αντίστασης σηματολήπτη	37
4.2.2 Προσθήκη σχισμής στην επιφάνεια της μικροταινιακής κεραίας	38
4.3 Προσομοίωση μεμονωμένου στοιχείου Η/Μ ακτινοβολίας και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	38
4.3.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης	40
4.3.2 Βελτιστοποίηση γεωμετρίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας	43
4.4 Σχεδίαση Στοιχειοκεραίας.....	48
4.5 Η/Μ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	54
4.5.1 Μορφοποίηση Δέσμης [18]	54

4.5.2	Μελέτη και αριθμητικό παράδειγμα στρέψης λοβού ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας [31]	58
4.5.3	Στρέψη λοβού ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας.....	60
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66
4.5	Σύνοψη Μελέτης.....	66
4.6	Μελλοντικές Επεκτάσεις	66
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	67

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων Η/Μ προσομοίωσης για την χαμηλή συχνότητα του μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας

Πίνακας 2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ μαθηματικής και Η/Μ προσομοίωσης για την χαμηλή συχνότητα της στοιχειοκεραίας

Πίνακας 3: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ μαθηματικής και Η/Μ προσομοίωσης για την υψηλή συχνότητα της στοιχειοκεραίας

Πίνακας 4: Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας μεμονωμένου κεραίας και στοιχειοκεραίας όπως προέκυψαν από Η/Μ προσομοίωση με αναφορά την χαμηλή συχνότητα

Πίνακας 5: Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας μεμονωμένου κεραίας και στοιχειοκεραίας όπως προέκυψαν από Η/Μ προσομοίωση με αναφορά την υψηλή συχνότητα

Πίνακας 6: Υπολογισμοί β_x , β_y για ανυψωτική μετακίνηση του λοβού

Πίνακας 7: Υπολογισμοί β_x , β_y για μετατόπιση του λοβού αζιμουθιακά και ανυψωτικά

Πίνακας 8: Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας πριν και μετά την περιστροφή του λοβού για την χαμηλή συχνότητα

Πίνακας 9: Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας πριν και μετά την περιστροφή του λοβού για την υψηλή συχνότητα

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Μπάντες συχνοτήτων FR1,FR2 δικτύου 5G [33]

Εικόνα 1.1 : Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών στο πέρασμα του χρόνου [32]

Εικόνα 1.2: Αναπαράσταση λειτουργίας μίας κεραίας κατά τη διάρκεια εκπομπής & λήψης [28]

Εικόνα 1.3: Απεικόνιση εγγύς και ενδιάμεσου πεδίου [31]

Εικόνα 1.4: Διάγραμμα ακτινοβολίας [27]

Εικόνα 1.5: Λογαριθμικό διάγραμμα ισχύος ακτινοβολίας [27]

Εικόνα 1.6 : Λοβοί ακτινοβολίας και εύρος δέσμης σε πολική μορφή [31]

Εικόνα 1.7: Απεικόνιση γραμμικής, κυκλικής και ελλειπτικής τροχιάς [24]

Εικόνα 1.8: Διάγραμμα εύρους ζώνης (S11 άξονας y, Συχνότητα [GHz] άξονας x)

Εικόνα 2.1: Δομή κεραίας μικροταινίας [31]

Εικόνα 2.2: Αντιπροσωπευτικά σχήματα μικροταινιακών στοιχείων [31]

Εικόνα 2.3: Γραμμή μικροταινίας, Δυναμικές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου, Ενεργός διηλεκτρική σταθερά [31]

Εικόνα 2.4: Μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας [31]

Εικόνα 2.5: Τροφοδοσία με σηματολήπτη [31]

Εικόνα 2.6: Ομοαξονικός σηματολήπτης

Εικόνα 2.7: Ενδεικτικά σχήματα στοιχειοκεραίων με τροφοδοσία μέσω μικροταινιακής γραμμής

Εικόνα 3.1: Στοιχειοκεραία που κυκλοφορεί στο εμπόριο αποτελούμενη από σχισμοκεραίες

Εικόνα 3.2: Δίκτυο εν σειράς τροφοδοσίας [15]

Εικόνα 3.3: Δίκτυο κατανεμημένης τροφοδοσίας [16]

Εικόνα 3.4: Δίκτυο με συνδυασμό εν σειράς και κατανεμημένης τροφοδοσίας [14]

Εικόνα 4: Αλγόριθμος σχεδίασης

Εικόνα 4.1 Datasheet RO430B [6]

Εικόνα 4.2 Datasheet RO430B [6]

Εικόνα 4.3 & 4.4: Οι δύο όψεις του patch μετά τους θεωρητικούς υπολογισμούς

Εικόνα 4.5 & 4.6: Οι δύο όψεις του patch μετά το άνοιγμα της οπής

Εικόνα 4.7: Όψη του εσωτερικού του patch

Εικόνα 4.8: Εμπέδηση εισόδου όπως προέκυψε από την δοκιμαστική προσομοίωση

Εικόνα 4.9: S11 παράμετροι όπως προέκυψαν από την δοκιμαστική προσομοίωση

Εικόνα 4.10 : VSWR μεμονωμένου patch στις συχνότητες λειτουργίας 2.85 GHz και 4.86 GHz

Εικόνα 4.11: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στη χαμηλή συχνότητα (2.85 GHz)

Εικόνα 4.12: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στην υψηλή συχνότητα (4.86 GHz)

Εικόνα 4.13: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στη χαμηλή συχνότητα (2.85 GHz)

Εικόνα 4.14: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (4.86 GHz)

Εικόνα 4.15: Εμπρόσθια όψη μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας σε διακριτοποιημένα κελιά

Εικόνα 4.16: Οπίσθια όψη μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας σε διακριτοποιημένα κελιά

Εικόνα 4.17: Τελική όψη μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας (εμπρόσθια)

Εικόνα 4.18: Τελική όψη μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας (οπίσθια)

Εικόνα 4.19: Εμπέδηση εισόδου όπως προέκυψε από την τελική προσομοίωση

Εικόνα 4.20: VSWR μεμονωμένου patch στις συχνότητες 1.87 GHz και 3.33 GHz

Εικόνα 4.21: S11 παράμετροι όπως προέκυψαν από την τελική προσομοίωση

Εικόνα 4.22: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στη χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz)

Εικόνα 4.23: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στη χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz)

Εικόνα 4.24: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz)

Εικόνα 4.25: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz)

Εικόνα 4.26: Εμπρόσθια όψη στοιχειοκεραίας

Εικόνα 4.27: Οπίσθια όψη στοιχειοκεραίας 2x2

Εικόνα 4.28: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στη χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz) μετά την μαθηματική προσομοίωση

Εικόνα 4.29: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στη χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz) μετά την μαθηματική προσομοίωση

Εικόνα 4.30: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz) μετά την μαθηματική προσομοίωση

Εικόνα 4.31 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz) μετά την μαθηματική προσομοίωση

Εικόνα 4.32: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στη χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz) μετά την H/M προσομοίωση

Εικόνα 4.33: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz)

Εικόνα 4.34: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz) μετά την H/M προσομοίωση

Εικόνα 4.35: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz)

Εικόνα 4.36: Wilkinson Power Divider

Εικόνα 4.37: Διάγραμμα S παραμέτρων Wilkinson Power Divider

Εικόνα 4.38: Wilkinson Feeding Network 1:4

Εικόνα 4.39: Διάγραμμα S παραμέτρων Feeding Network 1:4

Εικόνα 4.40: Παράδειγμα αναπαράστασης beam forming module με 16 εξόδους για στοιχειοκεραία 4x4. [2]

Εικόνα 4.41: Γεωμετρία επίπεδης στοιχειοκεραίας [31]

Εικόνα 4.42: Απεικονίσεις διαγραμμάτων επιπεδικής στοιχειοκεραίας στοιχείων σε απόσταση $dx=dy=\lambda/2$ μεταξύ τους, με διέγερση ίσου πλάτους και προοδευτική ολίσθηση φάσης [31]

Εικόνα 4.43: Απεικόνιση διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας στη χαμηλή συχνότητα, ενώ όλα τα στοιχεία ακτινοβολίας έχουν την ίδια φάση

Εικόνα 4.44: Απεικόνιση διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας στη υψηλή συχνότητα, ενώ όλα τα στοιχεία ακτινοβολίας έχουν την ίδια φάση

Εικόνα 4.45: Απεικόνιση διαγραμμάτων ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας στη χαμηλή συχνότητα, ενώ τα στοιχεία ακτινοβολίας παρουσιάζουν διαφορά φάσης 45 μοιρών

Εικόνα 4.46: Απεικόνιση διαγραμμάτων ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας στη υψηλή συχνότητα, ενώ τα στοιχεία ακτινοβολίας παρουσιάζουν διαφορά φάσης -45 μοιρών

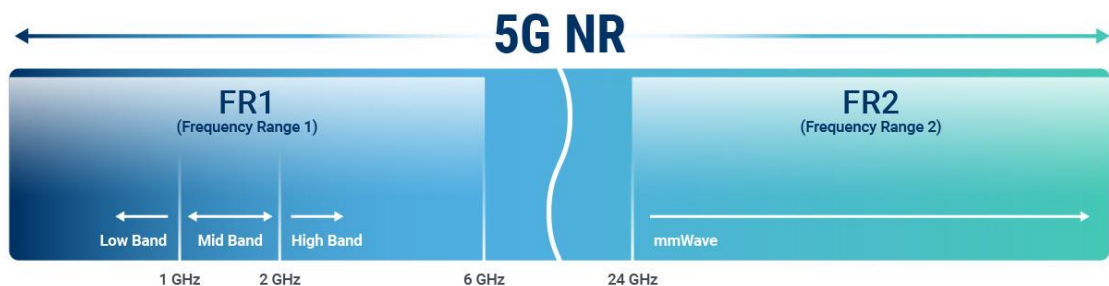
Αλφαβητικό Ευρετήριο

ESA	European Space Agency
5G	Five Generation
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
VSAT	Very Small Aperture Terminal
HPBW	Half Power Beam Width
FNBW	First Null Beam Width
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
IEEE	The Institute for Electrical and Electronics Engineers
PTFE	PolyTetraFluoroEthylene
H/M	Ηλεκτρομαγνητική

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πέρασμα των χρόνων, η ταχεία αύξηση των συστημάτων που συνδέονται στο διαδίκτυο είναι άξια παρατήρησης, εφόσον πλέον αποτελεί αδιαμφισβήτητα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας των ανθρώπων. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η όλο και πιο απαιτητική ανάγκη για μεταφορά μεγάλου όγκου πληροφορίας στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Με την έλευση του δικτύου 5G επιτεύχθηκε η μετάδοση δεδομένων με ρυθμό 20 Gbits/s με απόκριση 1 ms για ακόμα μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, προσφέροντας ταυτόχρονα μεγαλύτερη ισχύ και σταθερότητα σήματος. Η λειτουργία του έγκειται σε χιλιοστομετρικά κύματα από τα οποία απορρέουν οι συχνότητες ενός 5G δικτύου. Χρησιμοποιούνται δύο συχνότητες, μία χαμηλή και μία υψηλή. Η FR1 καλύπτει συχνότητες έως 6 GHz (χαμηλή) και προσφέρει μεγαλύτερη απόσταση κάλυψης και ποσοστό επιτυχημένης αλληλεπίδρασης με μεγαλύτερο πληθυσμό επιφανειών. Όσο για την FR2, το εύρος της είναι από 6 GHz έως 300 GHz και υπερέρχει στη διαχείριση περισσότερων πληροφοριών μετάδοσης. [33]



Nextivity focuses on delivering high speed general coverage (FR1) and not ultra-fast spot coverage.

www.nextivityinc.com

Εικόνα 1: Μπάντες συχνοτήτων FR1,FR2 δικτύου 5G. [33]

Στη παρούσα διπλωματική, έγινε σχεδιασμός διζωνικής κεραίας μικροταινίας. Μπορεί να γίνει ταυτόχρονη χρήση των δύο συχνοτήτων λειτουργίας ή εναλλαγή με βάση αυτή που προσφέρει ισχυρότερο σήμα. Ωστόσο για την αύξηση της κατευθυντικότητας και της ισχύος του σήματος, συστάθηκε στοιχειοκεραία 2x2, με οδηγό την αρχική κεραία σχεδίασης, ενώ ενσωματώθηκε, επίσης, τεχνολογία μορφοποίησης δέσμης.

Η εφαρμογή της προτείνεται για δορυφορικές επικοινωνίες. Ειδικότερα στο χώρο της ναυτιλίας, βάσει των συχνοτήτων συντονισμού και της αντιστοίχισης τους με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA), η κεραία δύναται να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές κινητών δορυφορικών επικοινωνιών (πχ Iridium), δορυφορικό ραδιόφωνο WorldSpace, μετεωρολογικά ραντάρ, ναυτιλιακά ραντάρ επιφάνειας και τέλος δορυφορικό ίντερνετ. Συγκεκριμένα η χρήση της κεραίας όσον αφορά το ίντερνετ, συνίσταται για αλιευτικά σκάφη, καθώς φέρουν περιορισμένο αριθμό επιβαινόντων και απαιτήσεων, γεγονός που «ταιριάζει» στο μικρό εύρος ζώνης που προσφέρεται από την κεραία. Το μικρό της μέγεθος, το κόστος παραγωγής/αγοράς συγκριτικά με τα VSAT και την νέα τεχνολογική επανάσταση Starlink, την καθιστούν ιδανική.[34]

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η απόκτηση πλήρους αντίληψης των θεμελιωδών αρχών λειτουργίας των κεραιών και ειδικότερα των μικροταινιακών κεραιών, που βρίσκουν εφαρμογή στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα νέας γενιάς και τηλεμετρίας. Εκτενέστερα, στόχος αποτελεί η σχεδίαση ενός στοιχείου ακτινοβολίας που να λειτουργεί σε δύο ζώνες/συχνότητες, το οποίο εν συνεχεία θα αποτελέσει το πρότυπο για μία διάταξη 2x2. Το ολικό διάγραμμα ακτινοβολίας θα πρέπει να αποδίδει αυξημένη κατευθυντικότητα και αντιστοίχως κέρδος, έτσι ώστε να μπορεί εφαρμοστεί σε δορυφορικά συστήματα.

Μεθοδολογία

Πρώτο μέρος για την εκπόνηση της εργασίας ήταν η ενασχόληση με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τη σχεδίαση της διζωνικής κεραίας. Δεύτερο μέρος, αποτέλεσε η εκτενή μελέτη της θεωρίας κεραιών, συγκεκριμένα των κεραιών μικροταινίας, και η εμβάθυνση των γνώσεων που αποκτήθηκαν από το πρόγραμμα σπουδών. Η ταυτόχρονη μελέτη της θεωρίας και η εφαρμογή της κατά τη διάρκεια σχεδίασης της κεραίας, αν και απαιτητική, είναι ιδιαίτερα παραγωγική μέθοδος. Κατόπιν, έγινε αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω των προσομοιώσεων με την μέθοδο trial & error, ώστε και να ολοκληρωθεί η συγγραφή της εργασίας.

Καινοτομία

Τα στοιχεία της διπλωματικής εργασίας που θεωρούνται πρωτότυπα είναι αφενός η σχεδίαση μίας διζωνικής κεραίας μικροταινίας, η οποία, αφετέρου χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία στοιχειοκεραίας. Επιπλέον, στο τελικό σχεδιασμό της κεραίας περιλαμβάνεται και τεχνολογία μηχανισμού διαμόρφωσης της δέσμης που ακτινοβολείται, ώστε να περιστρέφεται χωρίς να απαιτείται η στρέψη ολόκληρης της γεωμετρίας της κεραίας, στοιχείο που την καθιστά έξυπνη ή αλλιώς προσαρμοστική. Έτσι η πληροφορία μεταδίδεται με μέσω της γρηγορότερης δυνατής διαδρομής και όσον αφορά τα πλοία η κεραία επικοινωνεί με το κοντινότερο satellite beam για την βέλτιστη μετάδοση σήματος.

Δομή

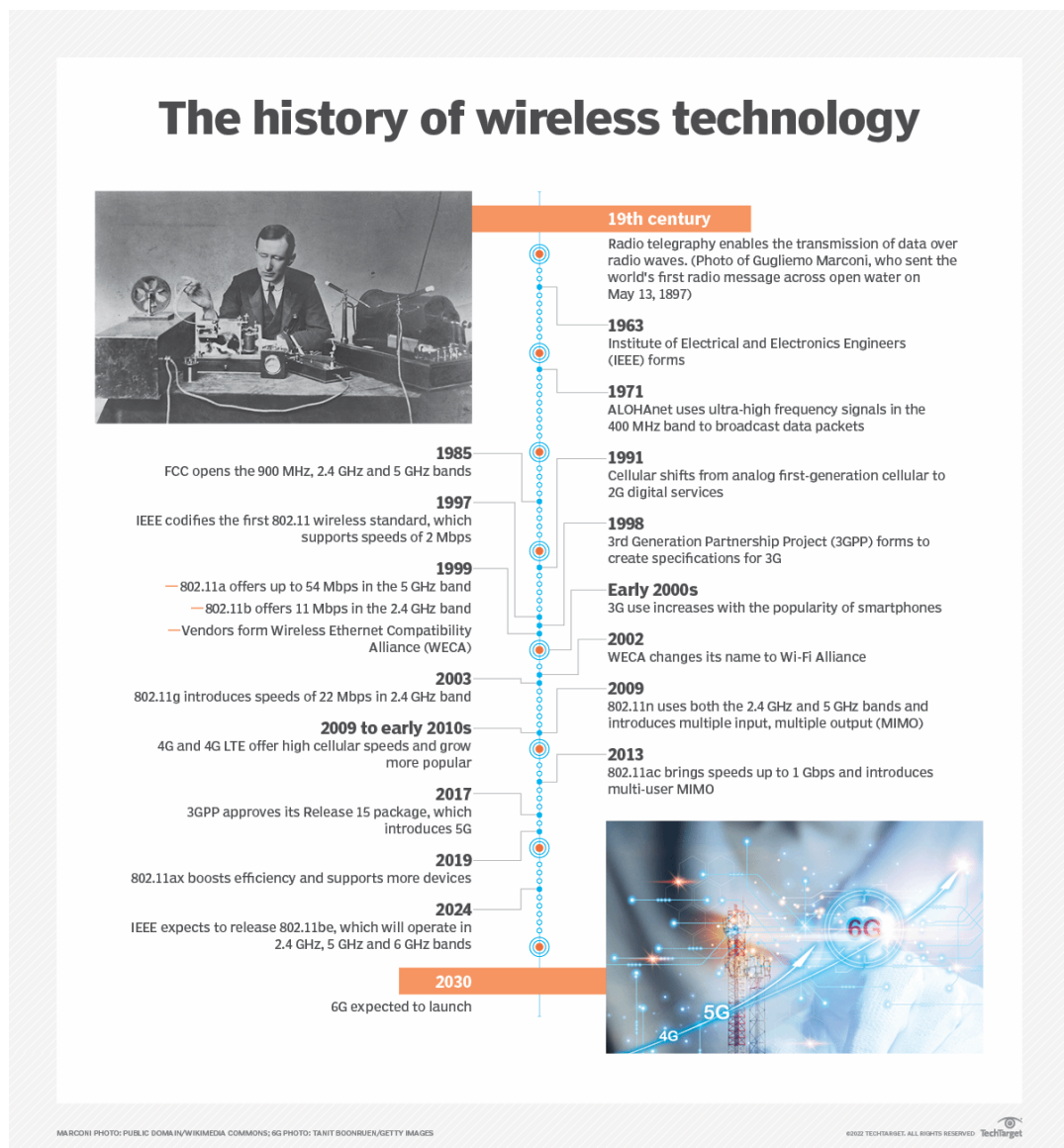
Η εργασία παρουσιάζεται σε μια αλληλουχία παραγράφων, οι οποίες συμπληρώνουν διαδοχικά το θεωρητικό υπόβαθρο, από τις βασικές αρχές έως τις εξειδικευμένες γνώσεις που απαιτούνται για την επίτευξη της σχεδίασης – στόχου που έχει τεθεί. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα για την υλοποίηση της κεραίας διπλής ζώνης. Όλες οι πληροφορίες συνοδεύονται από τους απαραίτητους μαθηματικούς τύπους και από όσο το δυνατόν περισσότερο οπτικό υλικό για την επεξήγησή τους.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Βασικές πληροφορίες Κεραίων

Στόχος του πρώτου κεφαλαίου είναι μία σύντομη ανασκόπηση γύρω από την ιστορική εξέλιξη των κεραιών και η παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών που τις πλαισιώνουν.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η εφεύρεση των κεραιών αποτελεί κομβικό σημείο για την εξέλιξη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Οι πρώτες μελέτες έβρισκαν εφαρμογές στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και έλαβαν χώρα τον 19^ο αιώνα. Ο καινοτόμος για την εποχή του, Guglielmo Marconi, εφηύρε το πρώτο σύστημα ασύρματης τηλεγραφίας, του οποίου η λειτουργία βασιζόταν κατά κύριο λόγο σε κεραίες, υπεύθυνες για την μετάδοση και τη λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι πρώτοι του σχεδιασμοί αφορούσαν μονόπολα ή δίπολα που ήταν κατασκευασμένα από σύρμα. Οι παραπάνω εργασίες άνοιξαν το δρόμο για τις επικοινωνίες μεγάλου βεληνεκούς και αποτέλεσαν την θεμελιώδη βάση των ασύρματων επικοινωνιών. [31]

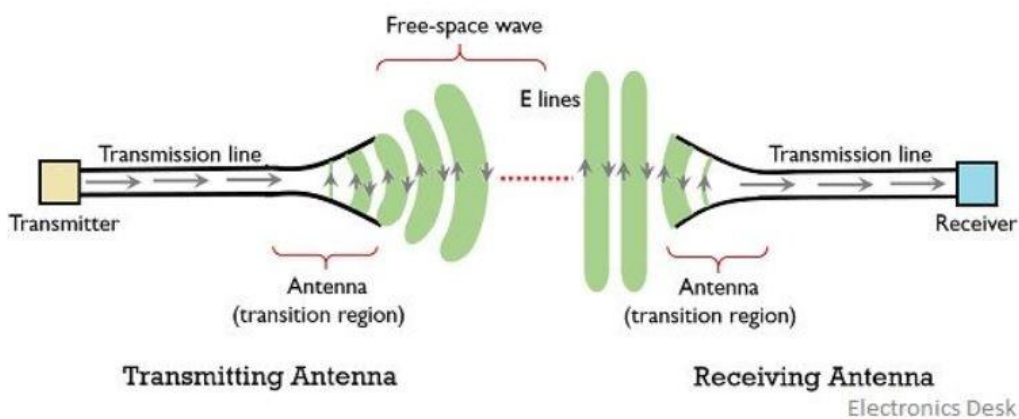


Εικόνα 1.1 : Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών στο πέρασμα του χρόνου. [32]

1.2 Βασικά Χαρακτηριστικά Κεραίων

Μία κεραία αντιπροσωπεύει ένα Η/Μ σύστημα που αποσκοπεί στην επίτευξη ασύρματων επικοινωνιών, δεδομένου ότι αποτελεί διάυλο μεταξύ των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με το φυσικό περιβάλλον. Μάλιστα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως πομπός είτε ως δέκτης. Κατά τη διαδικασία εκπομπής, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια (ηλεκτρικά σήματα), που λαμβάνει μέσω γραμμής μεταφοράς ή κυματοδηγού, σε Η/Μ κύματα, τα οποία ακτινοβολεί στον ελεύθερο χώρο.

Όταν, όμως χρησιμοποιείται σαν δέκτης, ο ρόλος της είναι παθητικός. Τότε, πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία από αυτή που προαναφέρθηκε, δηλαδή η κεραία μετατρέπει την Η/Μ ακτινοβολία-ενέργεια που λαμβάνει (πχ από ένα δορυφορικό σύστημα) σε ηλεκτρικά σήματα, ώστε να αποκωδικοποιηθεί και τελικά να γίνει ανάγνωση της λαμβάνουσας πληροφορίας. [29][31]



Εικόνα 1.2: Αναπαράσταση λειτουργίας μίας κεραίας κατά τη διάρκεια εκπομπής & λήψης. [28]

1.2.1 Πεδίο & Διάγραμμα ακτινοβολίας

Οι περιοχές/πεδία στις οποίες μια κεραία μπορεί να ακτινοβολήσει στον ελεύθερο χώρο είναι το εγγύς, το ενδιάμεσο και το μακρινό πεδίο.

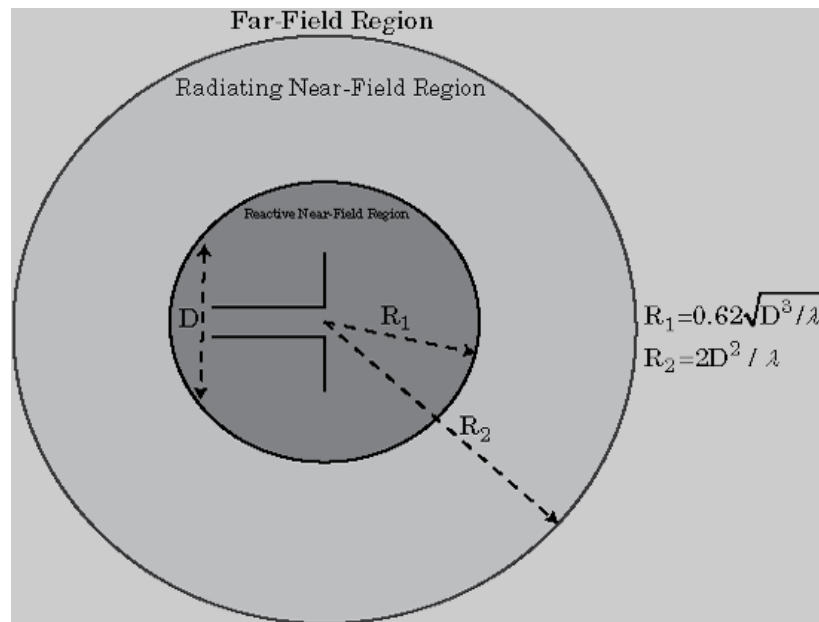
Δεδομένου ότι η διακριτοποίηση μεταξύ των πεδίων δεν αποτελεί εύκολη και ακριβή διαδικασία, χρησιμοποιούμε τους παρακάτω τύπους για την εύρεση της ακτίνας του εγγύς και του ενδιάμεσου πεδίου, ενώ οποιαδήποτε ακτίνα προκύψει με τιμή μεγαλύτερη των προηγούμενων ανήκει στο μακρινό πεδίο. [31]

D: φυσική διάσταση της κεραίας

$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$$

$$R_2 = 2D^2/\lambda$$

Εξισώσεις υπολογισμού εγγύς και ενδιάμεσου πεδίου (1.1, 1.2)

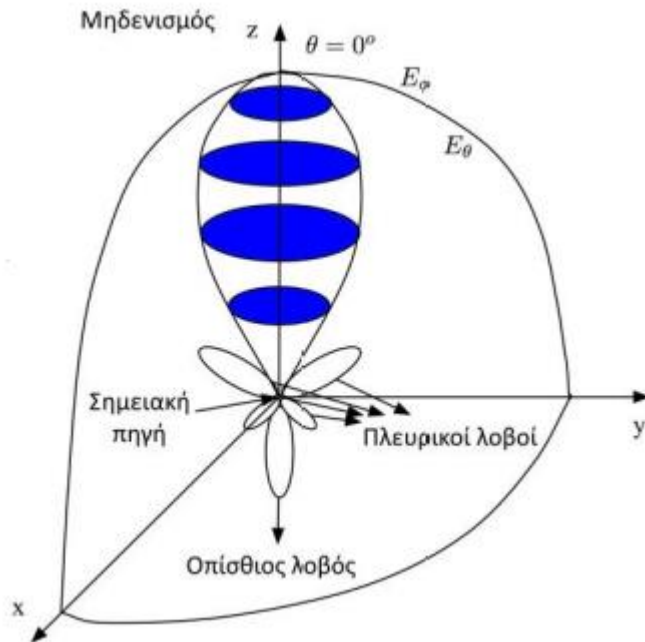


Εικόνα 1.3: Απεικόνιση εγγύς και ενδιάμεσου πεδίου. [31]

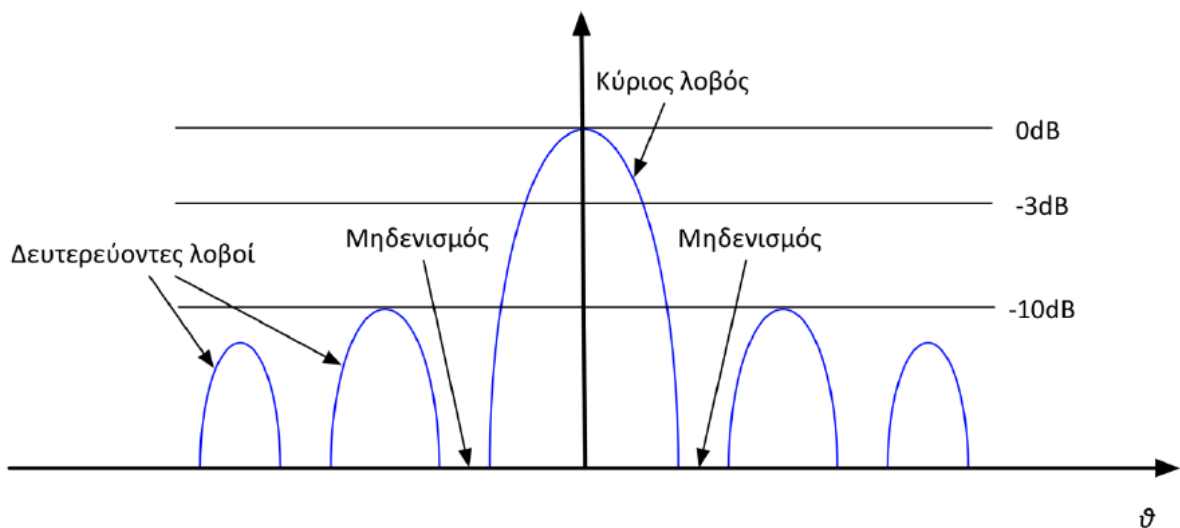
Το διάγραμμα ακτινοβολίας αποτελεί την γραφική απεικόνιση των παραμέτρων, που χαρακτηρίζουν την λειτουργία μίας κεραίας (ένταση πεδίου και ακτινοβολίας, πόλωση, κατευθυντικότητα, πυκνότητα ροής ισχύος) αναφορικά με τις συντεταγμένες χώρου. Γενικότερα, όταν γίνεται λόγος για το διάγραμμα ακτινοβολίας αναφερόμαστε στην κατεύθυνση αυτής στο μακρινό πεδίο. Οι απεικονίσεις δύνανται να γίνουν μονοδιάστατα, δισδιάστατα ή ακόμα και τρισδιάστατα.

Σε ένα διάγραμμα ακτινοβολίας απεικονίζονται κυρίως περισσότεροι από ένα λοβοί. Διακρίνονται στους κύριους λόβους (major, main lobes), δευτερεύοντες (minor lobes), πλευρικούς (side lobes) και οπίσθιους (back lobes). Ο κύριος λοβός διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους λόγω του αυξημένου μεγέθους του και βρίσκεται στη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Πλευρικοί ονομάζονται οι λοβοί που έχουν διεύθυνση διαφορετική από την επιθυμητή. Οπίσθιοι είναι οι λοβοί που ακτινοβολούν αντίθετα των κύριων λοβών. Ωστόσο, όλοι οι λοβοί πέραν των κύριων μπορούν να θεωρηθούν δευτερεύοντες. Οι σταθμές είναι επιθυμητό να κυμαίνονται από -20dB έως -30dB. Ο σχεδιαστής της κεραίας μέσω τεχνικών καλείται να περιορίσει τους δευτερεύοντες λοβούς, έτσι ώστε να μην επηρεάζουν τη διεύθυνση σκόπευσης της, όπως όταν αναγνωρίζουν «ψευδοστόχους».

[31]



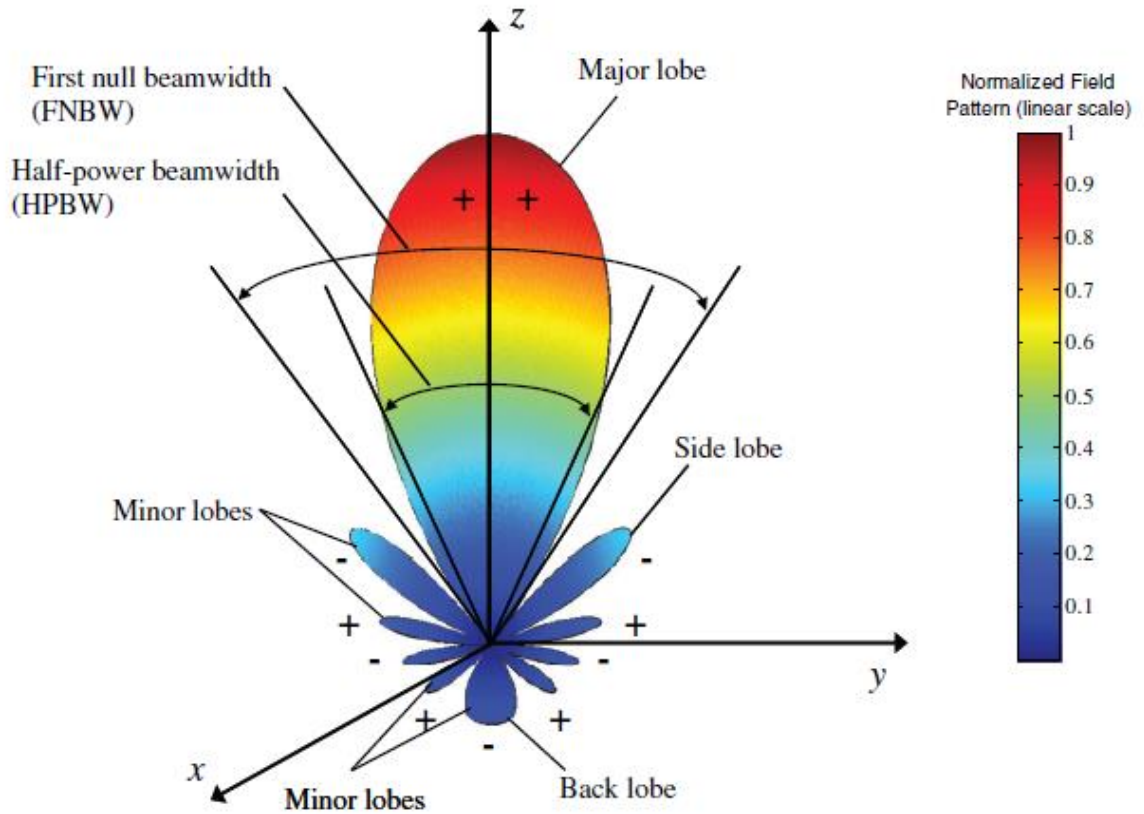
Εικόνα 1.4 : Διάγραμμα ακτινοβολίας. [27]



Εικόνα 1.5: Λογαριθμικό διάγραμμα ισχύος ακτινοβολίας. [27]

1.2.2 Εύρος δέσμης και κατευθυντικότητα

Εύρος δέσμης (ή beamwidth) είναι η διαφορά που παρουσιάζουν οι γωνίες αντίστοιχων σημείων από την αντίθετη πλευρά συγκριτικά με το μέγιστο που παρουσιάζεται στο διάγραμμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν υπάρχει κάποιος σχολιασμός όσον αφορά το εύρος δέσμης. Αυτό σημαίνει ότι γίνεται αναφορά στη γωνία ημίσειας ισχύος ή HPBW, δηλαδή στην διαφορά των γωνιών που αντιπροσωπεύουν το μισό της μέγιστης ισχύος. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι γίνεται λόγος και στο εύρος ζώνης πρώτου μηδενισμού, FNBW. Πρόκειται για την απόσταση των γωνιών μεταξύ των πρώτων μηδενισμών της ενέργειας που μεταδίδεται από την κεραία. [26] [31]



Εικόνα 1.6 : Λοβοί ακτινοβολίας και εύρος δέσμης σε πολική μορφή.[31]

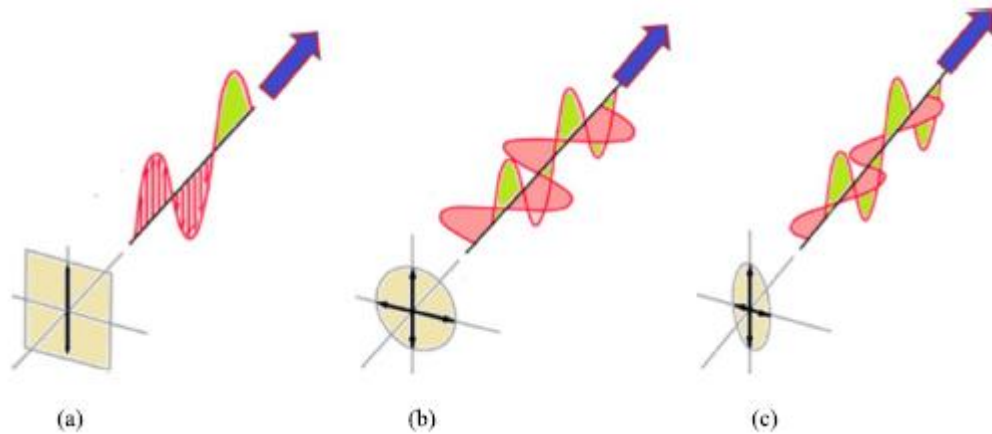
Η κατευθυντικότητα μιας κεραίας, ορίζεται ως το πηλίκο της έντασης της ακτινοβολίας που εκπέμπει σε συγκεκριμένη διεύθυνση προς τη μέση ακτινοβολούμενη ισχύ μίας πανκατευθυντικής κεραίας. Αν η διεύθυνση διάδοσης δεν είναι σαφώς ορισμένη, θεωρείται αυτή κατά την οποία η κεραία παρουσιάζει την μέγιστη ένταση ακτινοβολίας (ακτινοβολούμενη ισχύ). [31]

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

Εξίσωση υπολογισμού κατευθυντικότητας (1.3)

1.2.3 Πόλωση

Η πόλωση της κεραίας αποτυπώνει την διαδρομή του Η/Μ κύματος με το πέρασμα του χρόνου στο χώρο στην ευθεία διάδοσης του. Όπως απεικονίζεται στην παρακάτω φωτογραφία, μία κεραία μπορεί να έχει είτε (α) γραμμική, είτε (β) κυκλική, είτε (γ) ελλειπτική τροχιά.



Εικόνα 1.7: Απεικόνιση γραμμικής, κυκλικής και ελλειπτικής τροχιάς. [24]

1.2.4 VSWR

Το Voltage Standing Wave Ratio αποτελεί δείκτη αποδοτικότητας της μεταφοράς του σήματος από τη γραμμή μεταφοράς προς την κεραία. Μας παρουσιάζει κατά πόσο διαφέρει η τιμή της αντίστασης εισόδου της κεραίας από την αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της, τόσο καλύτερο matching έχει πραγματοποιηθεί μεταξύ των προαναφερθέντων κυκλωμάτων, γεγονός που αποτελεί βασική προϋπόθεση για την λειτουργία της κεραίας. [31]

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

Όπου Γ είναι ο συντελεστής ανάκλασης και ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$|\Gamma| = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

1.2.5 Κέρδος

Το κέρδος λαμβάνει υπόψιν τόσο την απόδοση της κεραίας, όσο και τις κατευθυντικές ιδιότητές της, όπως είναι η κατευθυντικότητα. Για συγκεκριμένη τιμή ισχύος, το κέρδος αντιπαραθέτει την ένταση ακτινοβολίας της υπό μελέτης κεραίας με την αντίστοιχη ισχύ ακτινοβολίας που θα προκαλούσε μία πανκατευθυντική κεραία. Βασική προϋπόθεση, όμως, είναι και οι δύο κεραίες να εκπέμπουν την ίδια ισχύ ακτινοβολίας. [31]

1.2.6 Κέρδος Ισχύος

Κέρδος ισχύος ορίζεται το πηλίκο του κέρδους ισχύος που εκπέμπει σε συγκεκριμένη διεύθυνση με το κέρδος ισχύος μίας πανκατευθυντικής κεραίας. Σε περίπτωση που δεν γίνεται λόγος για την διεύθυνση αναφοράς, θεωρούμε αυτή κατά την οποία παρουσιάζεται η μέγιστη ακτινοβολία. [31]

$$G = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

1.2.7 Εύρος Ζώνης

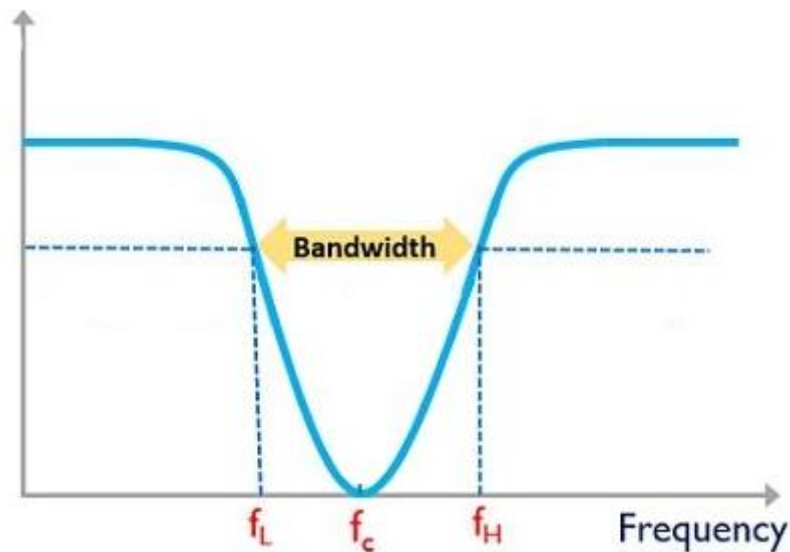
Εύρος ζώνης (ή πιο συνηθισμένα bandwidth) ονομάζεται η περιοχή συχνοτήτων στις οποίες η κεραία ικανοποιεί τις απαιτήσεις απόδοσης της. Αναλυτικότερα, βρίσκεται εκατέρωθεν της συχνότητας συντονισμού και εντός των συγκεκριμένων ορίων εμφανίζει χαρακτηριστικά, όπως η εμπέδηση εισόδου, το διάγραμμα ακτινοβολίας, το εύρος δέσμης, η πόλωση, η στάθμη πλευρικών λοβών, η απολαβή, η διεύθυνση δέσμης και η απόδοση ακτινοβολίας με αποδεκτές τιμές σε σχέση με αυτά της συχνότητας συντονισμού. [26] [31]

Το εύρος ζώνης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$BW = f_H - f_L$$

και αντίστοιχα το κλασματικό εύρος ζώνης ερμηνεύεται ως ο λόγος του εύρους ζώνης προς την κεντρική συχνότητα.

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_c}$$



Εικόνα 1.8: Διάγραμμα εύρους ζώνης (S11 άξονας y, Συχνότητα [GHz] άξονας x)

Το συνολικό εύρος ζώνης, σε περίπτωση που η κεραία είναι πολυζωνική, μπορεί να αποτελείται από πολλές περιοχές ανάλογα με πλήθος των συχνοτήτων συντονισμού της.

1.2.8 Συντελεστής ανάκλασης

Ο συντελεστής ανάκλασης ερμηνεύει το ποσοστό που ανακλάται λόγω του VSWR.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Μικροταινιακές κεραίες

Με το πέρασμα των χρόνων η ανάγκη χρήσης του διαδικτύου αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς. Όλο και περισσότερα αντικείμενα της καθημερινής μας ζωής γίνονται «έξυπνα», γεγονός που απαιτεί την σύνδεση τους με το διαδίκτυο και, μάλιστα, κατά την πλειοψηφία τους με ασύρματο τρόπο. Μία συνέπεια αυτών είναι και η αυξημένη ζήτηση κεραίων, οι οποίες χρειάζεται να είναι «ευέλικτες», ώστε να είναι συμβατές με όσο περισσότερα αντικείμενα είναι εφικτό. Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί πως εμφανίζεται η ανάγκη για πολυσυχνοτικές κεραίες με σκοπό την καλύτερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης για μεμονωμένη χρήση μίας υπηρεσίας ή ακόμα και τον συνδυασμό διαφορετικών υπηρεσιών μέσω μίας συσκευής. Συμπερασματικά, το κατάλληλο μέγεθος και βάρος της κεραίας, η ευκολία εγκατάστασης, η απόδοσή της και φυσικά το κόστος της αποτελούν αδιαπραγμάτευτα σημαντικούς παράγοντες για την επιλογή μίας κεραίας.

Τα χαρακτηριστικά αυτά συναντώνται στις μικροταινιακές κεραίες. Το ιδιαίτερα μικρό τους μέγεθος σε σχέση με τις παραδοσιακές κεραίες, η μηχανική τους αντοχή και η δυνατότητά τους να λειτουργούν σε πολλαπλές συχνότητες, τις καθιστούν ιδανικές στην πλειοψηφία των εφαρμογών που η αγορά καλείται να καλύψει. [21] [22] [23]

2.1 Δομή Μικροταινιακών Κεραίων

Κάθε μικροταινιακή κεραία αποτελείται από μία πολύ λεπτή μεταλλική πλάκα (patch), το διηλεκτρικό υλικό και την γραμμή τροφοδοσίας.

Η μεταλλική πλάκα ακτινοβολεί κάθετα στην επιφάνεια της, το πάχος της ορίζεται συνήθως στα 0.035 mm, ενώ το υλικό κατασκευής της είναι ο χαλκός. Ειδικότερα, το πάχος και το ύψος της πρέπει να είναι πολύ μικρότερα του μήκους κύματος ($h \ll \lambda_0$, συχνότερα $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.005\lambda_0$). Το μέγεθος της καθορίζεται με βάση το λ_0 και την συχνότητα λειτουργίας στην οποία είναι επιθυμητό να εκπέμπει και να λαμβάνει Η/Μ σήματα. Τέλος, το μήκος της παίρνει τιμές ανάμεσα στο $\lambda_0/3$ και στο $\lambda_0/2$.

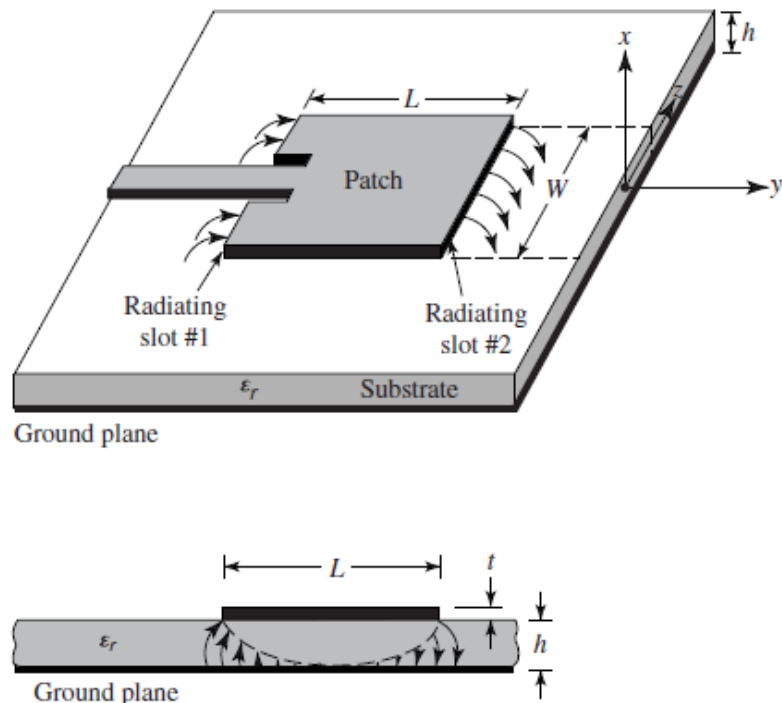
Το διηλεκτρικό υπόστρωμα στηρίζει από την μία πλευρά τη μεταλλική πλάκα, ενώ η άλλη του όψη είναι γειωμένη (συνήθως το πάχος της είναι 0.035 mm) και συντελεί στην βελτιωμένη απόδοση της κεραίας. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη υποστρωμάτων, ωστόσο τα πιο εύχρηστα είναι αυτά των οποίων η διηλεκτρική σταθερά κυμαίνεται μεταξύ $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Δεδομένου ότι τα υποστρώματα αυξημένου πάχους (ϵ_r πιο κοντά στο 2.2) προσφέρουν αυξημένο εύρος ζώνης και απόδοσης, αυξάνεται το μέγεθος του patch. Αντίστοιχα, αυτά που φέρουν μικρότερο πάχος (ϵ_r τείνει στο 12), εμφανίζουν λιγότερους πλευρικούς λοβούς και σύζευξη, αλλά παρέχουν αυξημένες απώλειες, μειωμένο κέρδος και εύρος ζώνης λειτουργίας. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι οι διαστάσεις δεν ορίζονται αποκλειστικά από μαθηματικούς τύπους, καθώς ο σχεδιαστής καλείται να τις παραμετροποιήσει, προκειμένου να επιτύχει την βέλτιστη λειτουργία της κεραίας με βάση το στόχο που έχει ορίσει.

Η τροφοδοσία μία μικροταινιακής κεραίας μπορεί να επιτευχθεί μέσω:

- 1) Ομοαξονικού σηματολήπτη
- 2) Σύζευξης μέσω ανοίγματος
- 3) Σύζευξης μέσω γεινίασης
- 4) Άμεσης σύζευξης

Το υλικό της γραμμής τροφοδοσίας είναι απαραίτητο να είναι αγωγίμο και να έχει πλάτος L , πολύ μικρότερο της μεταλλικής πλάκας (patch). [31]

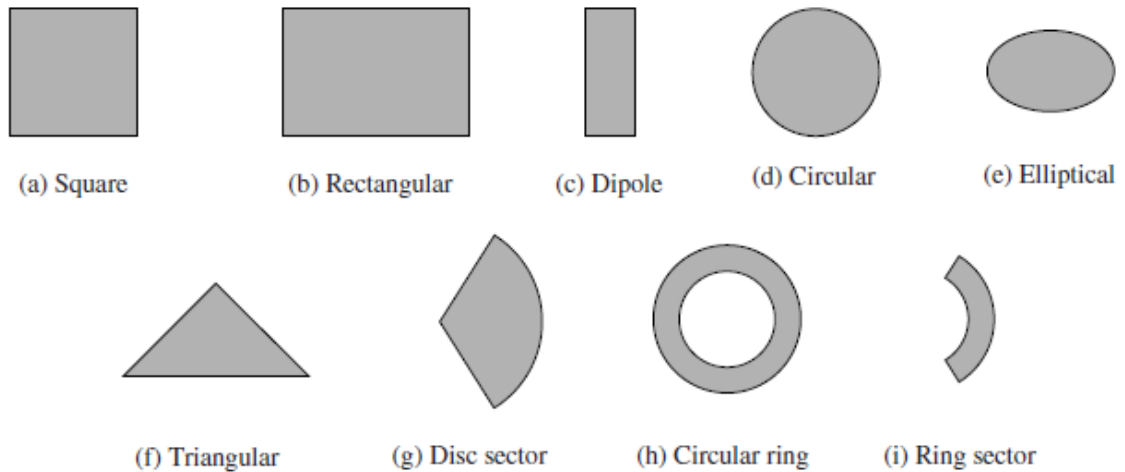
Όσο αυξάνεται το πάχος του substrate, αυξάνεται και η ανεπιθύμητη ακτινοβολία στην περιοχή τροφοδοσίας με αποτέλεσμα την μείωση του εύρους ζώνης.



Εικόνα 2.1: Δομή κεραίας μικροταινίας. [31]

2.2 Ειδή Μικροταινιακών Κεραίων

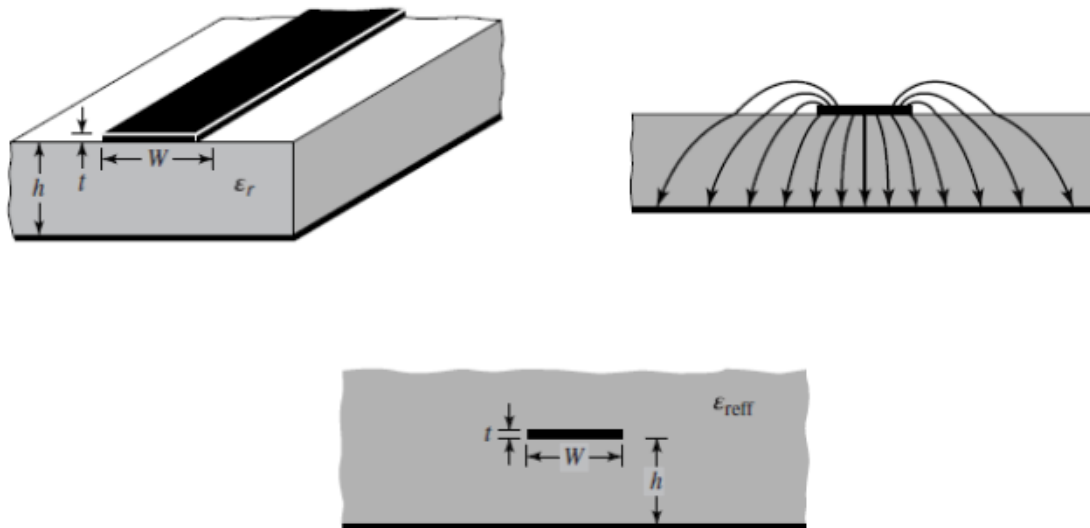
Στις κεραίες μικροταινίας, η μεταλλική πλάκα είναι δυνατό να φέρει α) τετραγωνικό σχήμα, β) ορθογωνικό, γ) δίπολο, δ) κυκλικό, ε) ελλειπτικό, στ) τριγωνικό, ζ) τμήμα δίσκου, η) κυκλικού δακτύλιου, θ) τμήμα δακτυλίου. Συχνότερα επιλέγονται το ορθογωνικό και το κυκλικό σχήμα μεταλλικής πλάκας (patch) [31]



Εικόνα 2.2: Αντιπροσωπευτικά σχήματα μικροταινιακών στοιχείων. [31]

2.2.1 Φαινόμενα κροσσών στη γραμμή μικροταινίας

Το μέγεθος της μικροταινίας χρειάζεται να περιορίζεται εντός συγκεκριμένων ορίων, προκειμένου μια υλοποίηση να θεωρείται ρεαλιστική. Ωστόσο, τα Η/Μ πεδία συνεχίζουν και μετά το τέλος της μεταλλικής πλάκας, εφόσον παρουσιάζεται το φαινόμενο των κροσσών, των οποίων η ύπαρξη εξαρτάται από τις διαστάσεις και το ύψος του patch. [31]



Εικόνα 2.3: Γραμμή μικροταινίας, Δυναμικές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου, Ενεργός διηλεκτρική σταθερά. [31]

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, τα Η/Μ πεδία έχουν πιο ισχυρή παρουσία στο υπόστρωμα, φαινόμενο που γίνεται εντονότερο όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας. Συνεπώς, απαιτείται ο υπολογισμός της ενεργού διηλεκτρικής σταθεράς και κατά επέκταση το πρόσθετο ηλεκτρικό μήκος της κεραίας ΔL .

$$\varepsilon_{r_{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{h}{w}}}$$

Εξίσωση υπολογισμού ενεργού διηλεκτρικής σταθεράς

$$\Delta L = 0,412 \cdot h \frac{(\varepsilon_{r_{eff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\varepsilon_{r_{eff}} - 0,3) \left(\frac{W}{h} - 0,264\right)}$$

Εξίσωση υπολογισμού πρόσθετου ηλεκτρικού μήκους

Τελικά το ενεργό μήκος, το πραγματικό μήκος και το πλάτος της κεραίας προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$L_{eff} = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_{r_{eff}}}}$$

Εξίσωση υπολογισμού ενεργού μήκους

$$L = L_{eff} - 2 \cdot \Delta L$$

Εξίσωση υπολογισμού πραγματικού μήκους

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}}$$

Εξίσωση υπολογισμού πλάτους

2.2.2 Προσαρμογή τροφοδοσίας [31]

Η λειτουργία της κεραίας θα εξαρτηθεί, αρχικά, από την πιθανότητα ύπαρξης προσαρμογής του κυκλώματος της με το κύκλωμα τροφοδοσίας. Με άλλα λόγια, όπως έχει συμφωνηθεί από τον IEEE, οι αντιστάσεις εισόδου των δύο κυκλωμάτων χρειάζεται να είναι ίσες με 50 Ω. Παράλληλα, η κεραία θα πρέπει να λειτουργεί στην επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας και να αποδίδει το αντίστοιχο κέρδος.

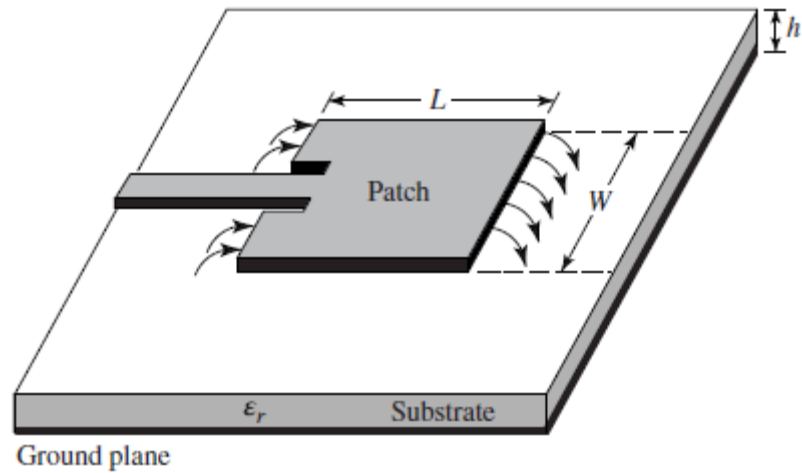
Η τροφοδοσία μίας κεραίας μικροταινίας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω μικροταινιακής γραμμής που εισχωρεί στη μεταλλική της πλάκα (patch), είτε μέσω ομοαξονικού σηματολήπτη κάθετα στη κεραία. Στη δεύτερη περίπτωση, η διάμετρος d του pin, η διηλεκτρική σταθερά ε_r , η διάμετρος D του σηματολήπτη, οι συντεταγμένες τοποθέτησης του και τα υλικά που τα περικλείουν είναι παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική λειτουργία της κεραίας. Υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$f_c = \frac{11,8}{\sqrt{\varepsilon_r} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_o + D_i}{2}\right)}$$

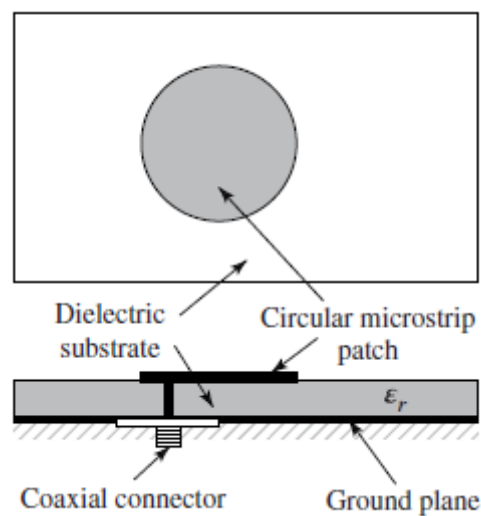
Εξίσωση υπολογισμού συχνότητας αποκοπής

$$Z_0 = \frac{138 \log_{10} \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

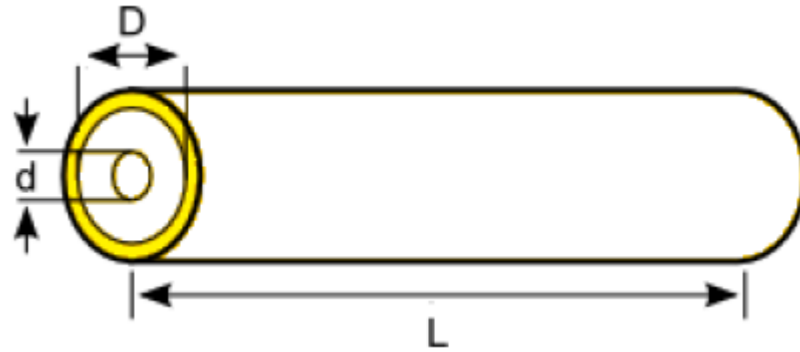
Εξίσωση υπολογισμού εμπέδησης σηματολήπτη



Εικόνα 2.4: Μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας. [31]



Εικόνα 2.5: Τροφοδοσία με σηματολήπτη. [31]



Εικόνα 2.6: Ομοαξονικός σηματολήπτης

Τέλος, οι διαστάσεις της γείωσης και του διηλεκτρικού αντίστοιχα υπολογίζονται από τους τύπους:

$$L_s = L + 6 \cdot h$$

$$W_s = W + 6 \cdot h$$

Εξισώσεις υπολογισμού μήκους και πλάτους γείωσης/διηλεκτρικού

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραιών [31]

Ορισμένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μικροταινιακών κεραιών είναι:

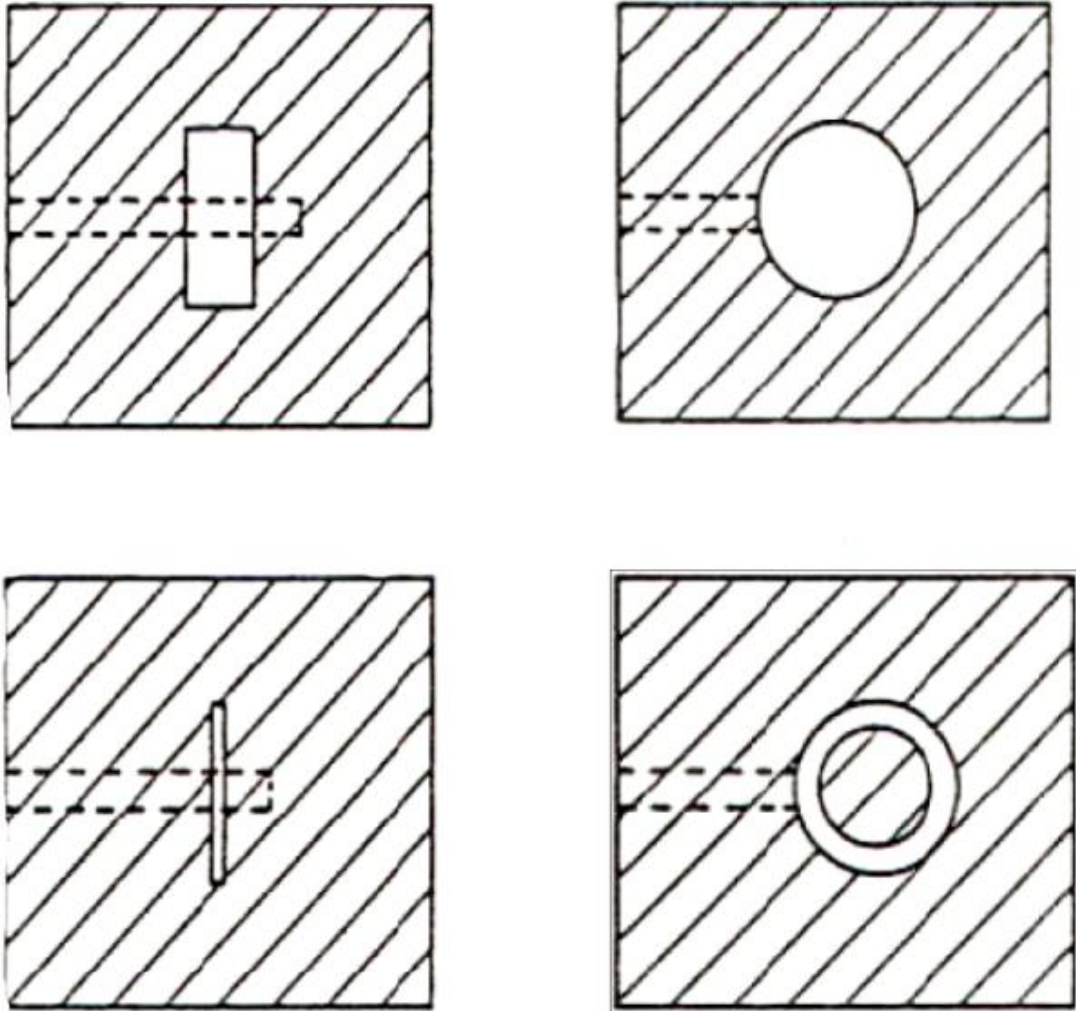
- 1) Συνδυάζουν συμπαγή κατασκευή, χαμηλό βάρος και ελάχιστο όγκο. Μπορούν να προσαρμοστούν σε μικρές ηλεκτρονικές συσκευές, επίπεδες και κυλινδρικές επιφάνειες ή ακόμα και σε εσοχές λόγω του χαμηλού αισθητικά προφίλ τους.
- 2) Εμφανίζουν κατευθυντική συμπεριφορά και πολυσυχνοτικό εύρος λειτουργίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλο εύρος ακτινοβολίας και ακριβής σκόπευση, όπως π.χ. σε δορυφορικές επικοινωνίες. Με κατάλληλες αλλαγές στην γεωμετρία τους, όπως για παράδειγμα με το άνοιγμα οπών, γίνεται εφικτή η χρήση τους για περισσότερα από ένα εύρη συχνοτήτων.
- 3) Έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής σε σχέση με τις παραδοσιακές κεραιές οπότε δεν αποτελεί εμπόδιο η ανάγκη μαζικής παραγωγής τους.

Στον αντίλογο, τα κυριότερα μειονεκτήματα των κεραιών μικροταινίας είναι:

- 1) Δεν αποδίδουν υψηλό κέρδος και έχουν στενό εύρος ζώνης, ειδικά όταν η επιφάνεια του υποστρώματος είναι γειωμένη.
- 2) Εμφανίζουν ισχυρές ωμικές απώλειες και ψευδοακτινοβολία κατά την τροφοδοσία της κεραίας.
- 3) Έχουν αυξημένο επίπεδο δυσκολίας αμιγούς πόλωσης.
- 4) Χαρακτηρίζονται από ανίσχυρη ικανότητα σάρωσης.

2.4 Σχισμοκεραίες

Οι σχισμοκεραίες ανήκουν στην οικογένεια των κεραίων ανοίγματος. Ουσιαστικά, αποτελούν κεραίες μικροταινίας, των οποίων η μεταλλική πλάκα φέρει μία ή πολλαπλές οπές. Τις περισσότερες φορές χαράσσονται σε σχήματα που βασίζονται σε ορθογωνικές ή κυκλικές γεωμετρίες, ενώ μπορούν να οδηγήσουν τη κεραία σε διέγερση, αλλά και σε άλλες συχνότητες πέραν της βασικής. [31]



Εικόνα 2.7: Ενδεικτικά σχήματα στοιχειοκεραίων με τροφοδοσία μέσω μικροταινιακής γραμμής

2.5 Ευζωνικές και Πολυσυχνοτικές Κεραίες

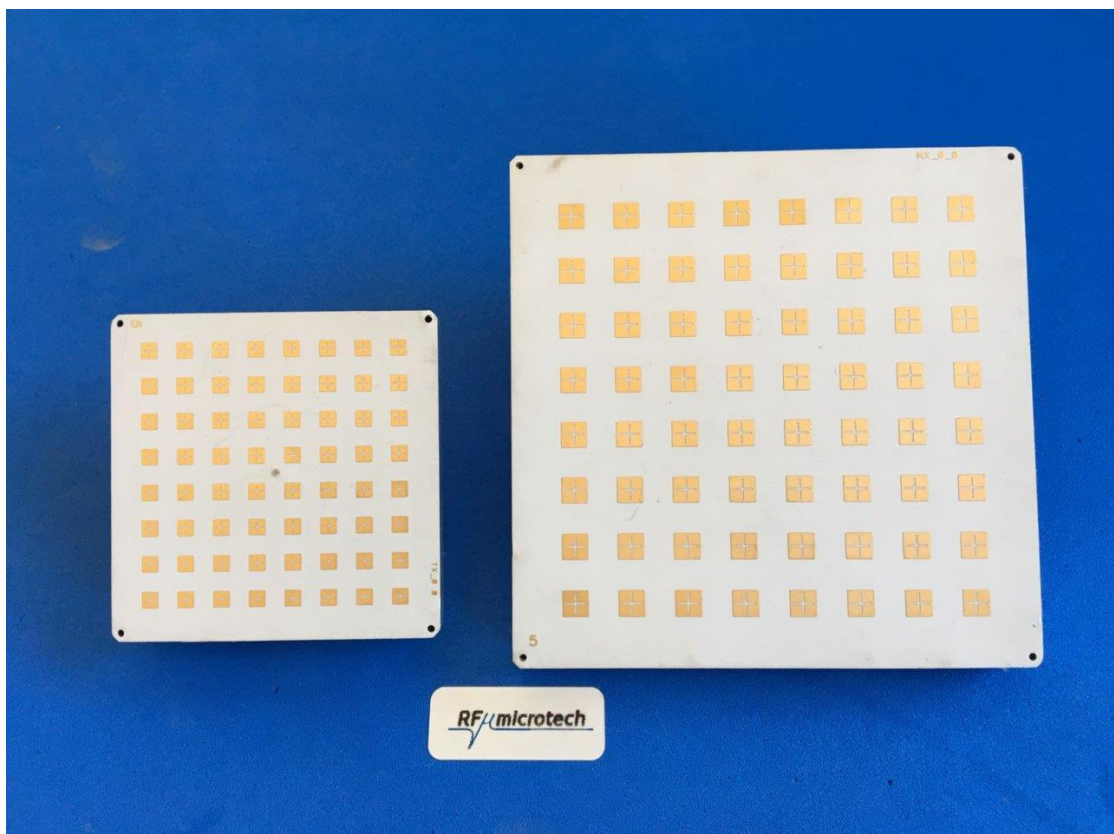
Σε αντίθεση με τις κεραίες στενής ζώνης, οι κεραίες μικροταινίας είναι σχεδιασμένες, ώστε να λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Χαρακτηρίζονται από ευελιξία και είναι ιδανικές, διότι παρέχουν πλήρεις παροχές επικοινωνίας στα ασύρματα δίκτυα. Η δυνατότητα να λειτουργούν για διαφορετικά εύρη συχνοτήτων μπορεί να βελτιστοποιηθεί και να προσαρμοστεί στις εκάστοτε ανάγκες, μιας και η χρήση του εύρους ζώνης μπορεί είτε να εστιαστεί σε μικρότερα εύρη, είτε να γίνει συνδυασμός. [20]

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Στοιχειοκεραίες [31] [1] [2]

Ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως είναι οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα συστήματα ραντάρ, η ραδιοαστρονομία κ.α., απαιτούν κεραίες με πολύ ισχυρή ικανότητα κατευθυντικότητας και συνεπώς κέρδους. Την ανάγκη αυτή δεν είναι εφικτό να καλύψει μεμονωμένα ένα στοιχείο ακτινοβολίας, καθώς η κατευθυντική της ικανότητα δεν επαρκεί για μεγάλες αποστάσεις. Την λύση στο ζήτημα αυτό προσφέρουν οι στοιχειοκεραίες.

3.1 Βασικές πληροφορίες Στοιχειοκεραιών

Όσον αφορά στη δομή των στοιχειοκεραιών αποτελείται από μεμονωμένα στοιχεία ακτινοβολίας που τις περισσότερες φορές έχουν το ίδιο σχήμα γεωμετρικά και την ίδια ηλεκτρική μορφή. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της νέας δομής βασίζεται στην γεωμετρική διάταξη μεμονωμένων κεραίων, διότι η παράταξη τους σε κυκλικό, γραμμικό, ορθογωνικό ή σφαιρικό μοτίβο επηρεάζει την διεύθυνση ακτινοβολίας και το κέρδος της στοιχειοκεραίας. Επιπρόσθετα, καθοριστικούς παράγοντες αποτελούν η απόσταση μεταξύ των στοιχείων, το διάγραμμα που αποδίδει το κάθε στοιχείο, το πλάτος τους, η φάση τους και οι συντεταγμένες του σημείου από όπου τροφοδοτείται η κεραία.



Εικόνα 3.1: Στοιχειοκεραία που κυκλοφορεί στο εμπόριο αποτελούμενη από σχισμοκεραίες

3.2 Στοιχειοκεραίες και δίκτυα τροφοδοσίας

Οι στοιχειοκεραίες μπορούν να τροφοδοτηθούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

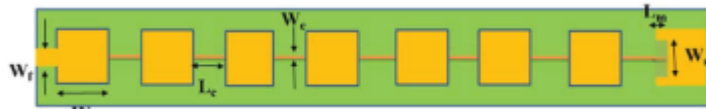
- 1) Εν σειρά τροφοδοσία (series – feed network)

- 2) Κατανεμημένη τροφοδοσία (corporate – feed network)
- 3) Συνδυασμός των δύο παραπάνω τεχνικών

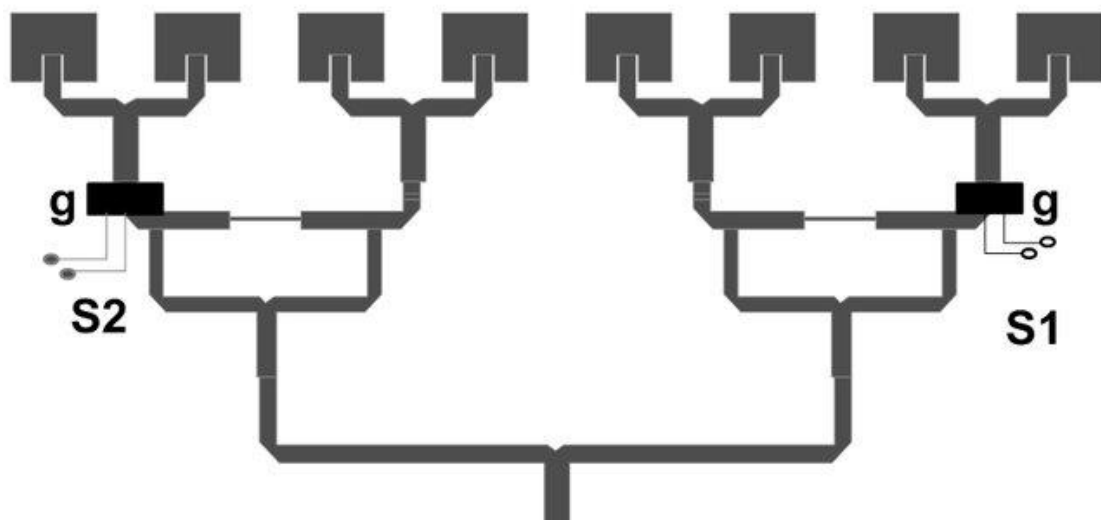
Χωρικά η τροφοδοσία μίας στοιχειοκεραίας μπορεί να εφαρμοστεί πάνω στο υπόστρωμα των μικροταινιακών κεραιών, όχι όμως απαραίτητα στο πρώτο επίπεδο, ενώ μπορεί να τροφοδοτηθεί και στη πλακέτα. Ο σχεδιαστής επιλέγει αν η ισχύς τροφοδοσίας θα κατανεμηθεί ισόποσα, με την ίδια ή με διαφορά φάσης, και ο λόγος έγκειται στη διαμόρφωση του κύριου λοβού ακτινοβολίας. Βάσει προγενέστερων ερευνών είναι πλέον γνωστό πως αν τα μεμονωμένα στοιχεία ρυθμιστούν να έχουν τροφοδοσία που θα αυξάνεται σταδιακά με συγκεκριμένο ρυθμό μεταξύ τους, τότε ο κύριος λοβός ακτινοβολίας θα έχει συγκεκριμένη σκότευση.

Για την επίτευξη της εν σειρά τροφοδοσίας, ιδιαίτερα χρήσιμο κρίνεται να χαράσσεται στο υπόστρωμα της στοιχειοκεραίας το κύκλωμα τροφοδοσίας, έτσι ώστε τα pin να βρίσκονται σε τέλεια ευθυγράμμιση με την πηγή. Συνεπώς, τα στοιχεία ακτινοβολίας απομονώνονται ηλεκτρομαγνητικά από την τροφοδοσία του κυκλώματος, τεχνική η οποία συνεπάγεται την αύξηση του εύρους ζώνης εκπομπής και λήψης της κεραίας.

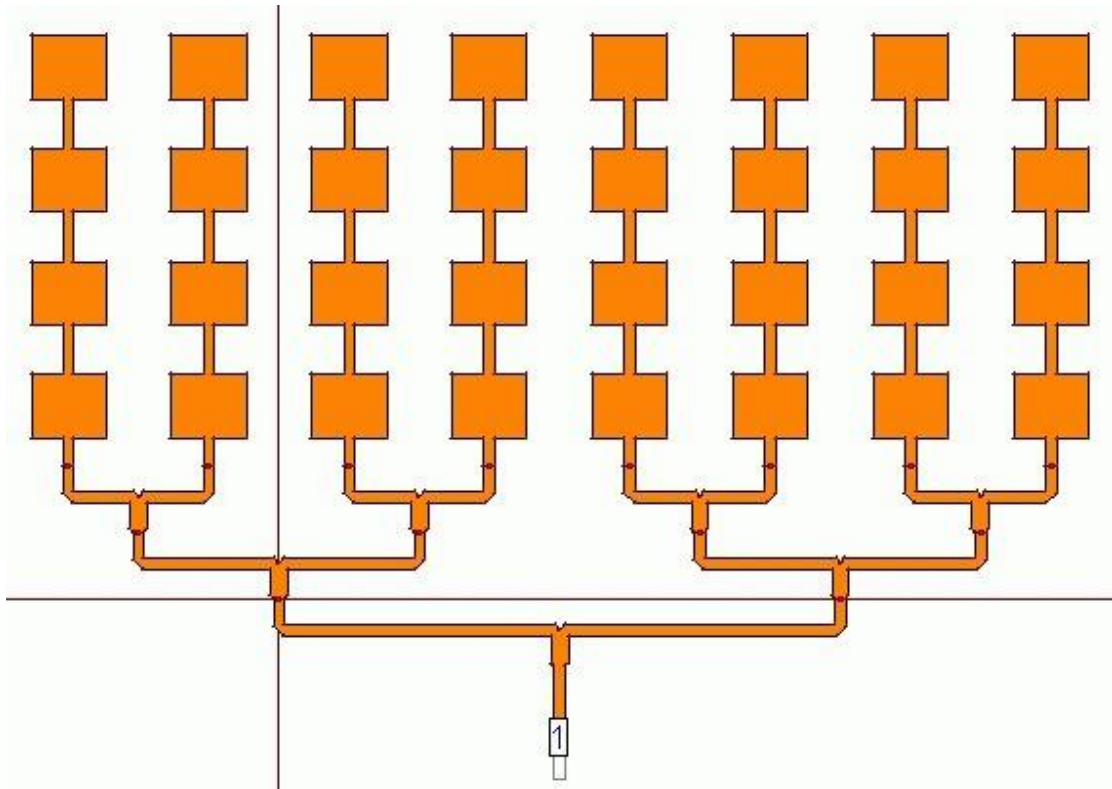
Όσον αφορά το κύκλωμα παράλληλης τροφοδοσίας χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται σάρωση του χώρου. Ωστόσο, χρησιμεύει στη μορφοποίηση δέσμης, διότι μπορεί να ρυθμίσει τη φάση και το πλάτος τροφοδοσίας των στοιχείων ακτινοβολίας που αποτελούν τη στοιχειοκεραία.



Εικόνα 3.2: Δίκτυο εν σειράς τροφοδοσίας. [15]



Εικόνα 3.3: Δίκτυο κατανεμημένης τροφοδοσίας. [16]

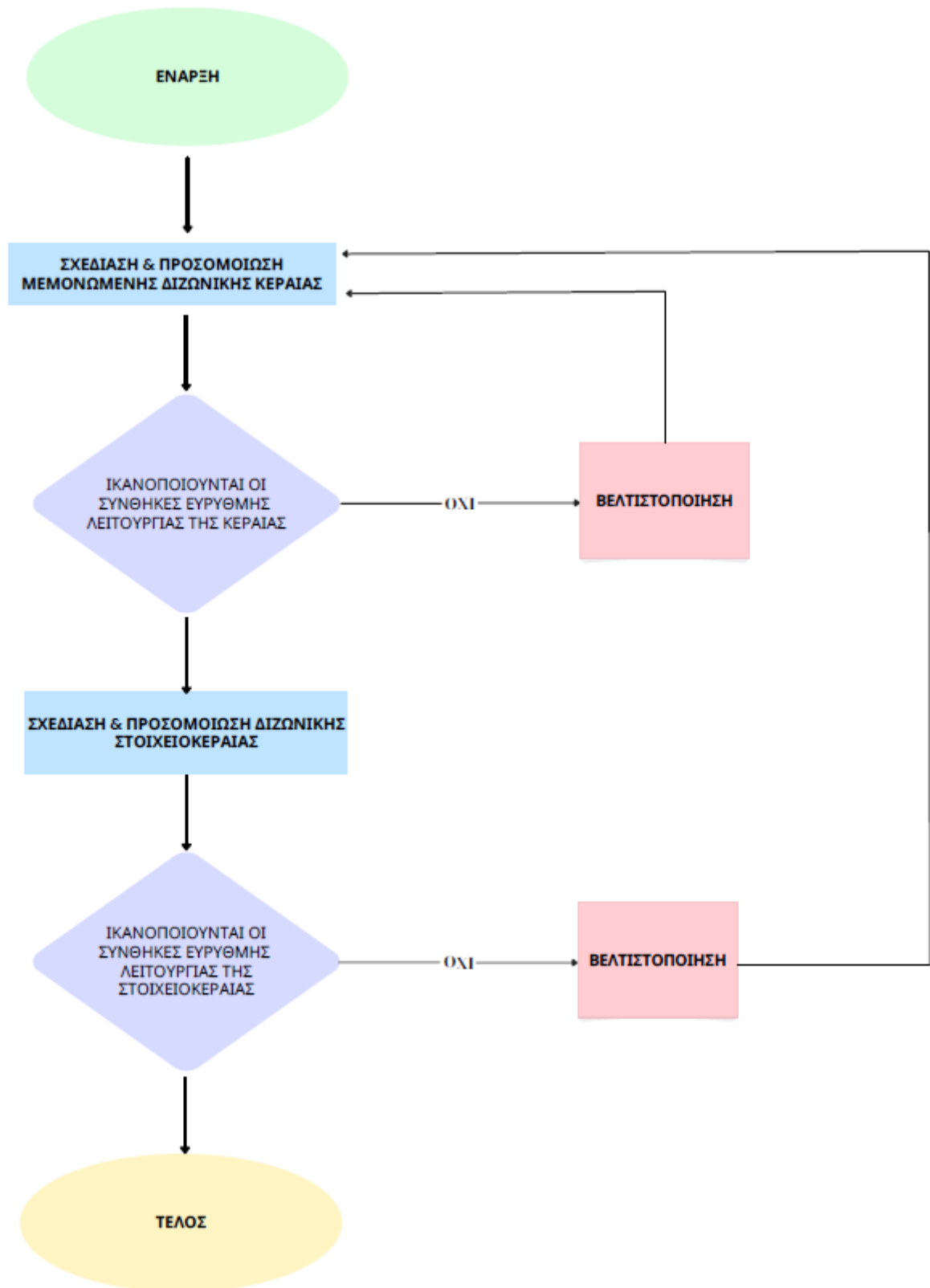


Εικόνα 3.4: Δίκτυο με συνδυασμό εν σειράς και κατανεμημένης τροφοδοσίας. [14]

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Σχεδίαση κεραίας και ανάλυση Η/Μ συμπεριφοράς

Στο τρέχον κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί το κυρίως μέρος της διπλωματικής εργασίας, το οποίο αποτελείται από τη διαδικασία σχεδίασης της μεμονωμένης πολυζωνικής κεραίας, την Η/Μ προσομοίωσή της, την σχεδίαση στοιχειοκεραίας 2X2 και την μαθηματική προσομοίωσή της. Όσον αφορά τη στοιχειοκεραία, στο τέλος του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί ο σχεδιασμός και η προσομοίωση συστήματος τροφοδοσίας, μέσω του οποίου δύναται η μορφοποίηση της δέσμης ακτινοβολίας της (Beam Forming network).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως απαιτείται εκτενή μελέτη των προηγούμενων κεφαλαίων προκειμένου να είναι κάποιος σε θέση να ξεκινήσει τη διαδικασία σχεδιασμού της κεραίας. Εξάλλου, κάθε αλλαγή που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάποια από τις διαστάσεις των μερών που την αποτελούν (διηλεκτρικό, σχισμή, γείωση, τροφοδοσία), μπορεί να έχουν τρανταχτές αλλαγές στην Η/Μ συμπεριφορά της.



Εικόνα 4: Αλγόριθμος σχεδίασης

Όσον αφορά, λοιπόν, στη συγκεκριμένη κεραία, το διηλεκτρικό πάνω στο οποίο έγινε η χάραξη της είναι το ROGERS RO4350B, το οποίο όπως φαίνεται στο παρακάτω data sheet της ROGERS CORPORATION [6] έχει διηλεκτρική σταθερά ίση με 3.66, ενώ το πάχος του είναι 1.524 mm. Τέλος, οι συχνότητες συντονισμού της κεραίας είναι τα 1.87 GHz και 3.33 GHz.

Property	Typical Value		Direction	Units	Condition	Test Method
	RO4003C	RO4350B				
Dielectric Constant, ϵ_r (Process specification)	3.38±0.05	3.48±0.05	Z	-	10 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5 Clamped Stripline
Dielectric Constant, ϵ_r (Design specification)	3.55	3.66	Z	-	FSR / 23°C	IPE-TM-650 2.5.5.6 FSR
Dissipation Factor tan, δ	0.0027 0.0021	0.0037 0.0031	Z	-	10GHz/23°C 2.5 GHz/23°C	IPC-TM-650, 2.5.5.5
Copper Peel Strength	0.88 (5)	0.70 (4)	-	N/mm (pli)	After Solder Float, ½ oz TCR foil	IPC-TM-650, 2.4.8
Flammability	N/A	V-0	-	-	-	UL 94

Εικόνα 4.1: Datasheet RO430B. [6]

Standard Thickness
RO4003C: 0.008" (0.203mm), 0.012 (0.305mm), 0.016" (0.406mm), 0.020" (0.508mm) 0.032" (0.813mm), 0.060" (1.524mm)
RO4350B: 0.0066" (0.168mm) 0.010" (0.254mm), 0.0133 (0.338mm), 0.0166 (0.422mm), 0.020" (0.508mm) 0.030" (0.762mm), 0.060" (1.524mm)

Εικόνα 4.2: Datasheet RO430B. [6]

4.1 Διαστάσεις διάταξης

4.1.1 Υπολογισμοί διαστάσεων διάταξης patch

Το πρώτο στάδιο της σχεδίασης είναι ο υπολογισμός των διαστάσεων της κεραίας, ενώ δεύτερο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός των διαστάσεων του διηλεκτρικού όπου και θα χαραχθεί η κεραία.

Αρχικά ως συχνότητα πρώτου συντονισμού επιλέγονται τα 2.4 GHz.

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,4 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{\frac{3,66 + 1}{2}}} = 0.04094\text{m} = 40.94\text{mm}$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{h}{w}}} = \frac{3.66 + 1}{2} + \frac{3.66 - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1.524}{40.94}}} = 3.433$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,4 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3.433}} = 0.0337m = 33.73mm$$

$$\Delta L = 0,412 \cdot h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,3) \left(\frac{W}{h} - 0.264\right)} =$$

$$= 0.412 \cdot 1.524 \frac{(3.433 + 0,3) \left(\frac{40.94}{1.524} + 0.264\right)}{(3.433 - 0,258) \left(\frac{40.94}{1.524} + 0.8\right)} = 0.7239mm$$

$$L = L_{eff} - 2 \cdot \Delta L = 33.73 - 2 \cdot 0.7239 = 32.3mm$$

4.1.2 Υπολογισμοί διαστάσεων substrate

Οι διαστάσεις του διηλεκτρικού RO4350B συμπίπτουν με αυτές της γείωσης, εφόσον επικαλύπτουμε την μία πλευρά του με χαλκό πάχους 0.035mm.

$$L_s = L + 6 \cdot h = 32.3 + 6 \cdot 1.524 = 41.4mm$$

$$W_s = W + 6 \cdot h = 40.94 + 6 \cdot 1.524 = 50.84mm$$

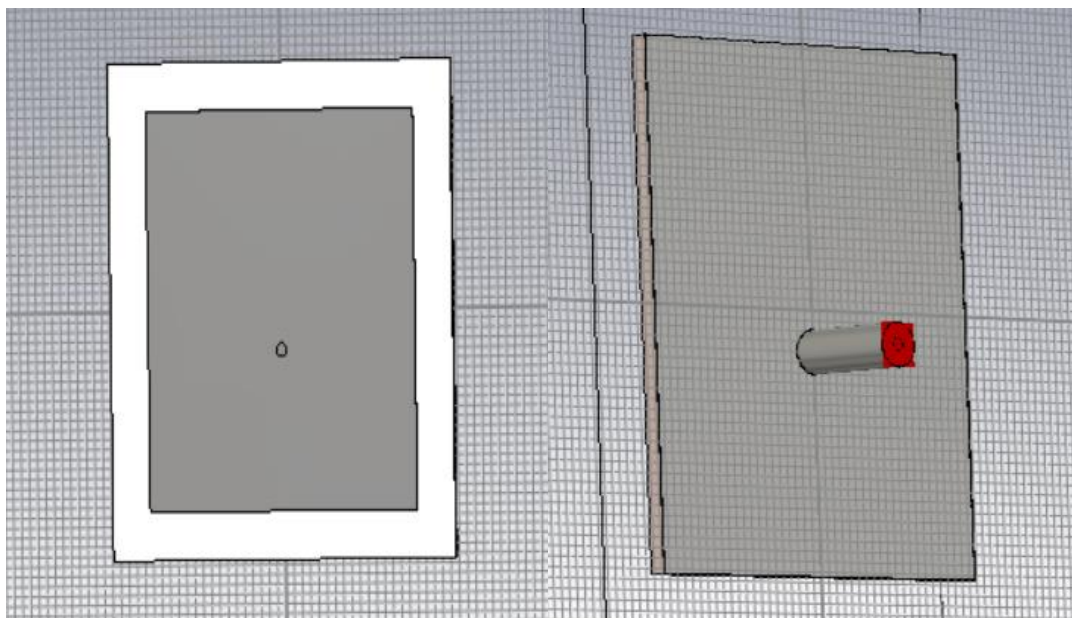
4.2 Επιλογή – Αιτιολόγηση τρόπου τροφοδοσίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας

Αρχικά, επιλέχθηκε η τροφοδοσία του στοιχείου να γίνεται μέσω μίας μικροταινιακής γραμμής η οποία ξεκινούσε από το ένα άκρο του διηλεκτρικού και κατέληγε στο patch. Ωστόσο, για λόγους καθαρά γεωμετρικούς και συγκεκριμένα ως προς τις προϋποθέσεις σχεδίασης της στοιχειοκεραίας, ζήτημα που θα αναλυθεί εκτενέστερα στην αντίστοιχη ενότητα, στόχος ήταν να μειώσουμε το εμβαδόν της κατασκευής μας στους άξονες x,y. Συμπερασματικά, βέλτιστη λύση θεωρήθηκε η τροφοδότηση μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου και συγκεκριμένα μέσω του RG402 με εσωτερική αντίσταση που ισούται με 50Ω και διηλεκτρική σταθερά ίση με 2.08. Το διηλεκτρικό του είναι φτιαγμένο από PTFE ή απλούστερα Teflon. [5]

4.2.1 Θεωρητικός υπολογισμός αντίστασης σηματολήπτη

Όπως παρατηρούμε στους υπολογισμούς της παρακάτω σχέσης, για εξωτερική διάμετρο ίση με 4.22 mm και εσωτερική ίση με 1.27 mm επαληθεύεται η τιμή των 50Ω.

$$Z_0 = \frac{138 \log_{10} \left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{138 \log_{10} \left(\frac{4.22}{1.27}\right)}{\sqrt{2.08}} = 49.9\Omega$$



Εικόνα 4.3 & 4.4: Οι δύο όψεις του patch μετά τους θεωρητικούς υπολογισμούς

4.2.2 Προσθήκη σχισμής στην επιφάνεια της μικροταινιακής κεραίας

Σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, και συγκεκριμένα στην ενότητα 2.4, για να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του patch, προστέθηκε μια οπή σχήματος ορθογώνιου παραλληλόγραμμου, ώστε η κεραία να συντονίζεται σε περισσότερες από μία συχνότητες, και να καθίσταται πλέον ως πολυζωνική. Στη περίπτωση μας θα εκμεταλλευτούμε δύο συγκεκριμένες συχνότητες, οπότε η λειτουργία της κεραίας ορίζεται ως διζωνική.

Οι διαστάσεις της οπής επιλέχθηκαν έπειτα από παραμετροποίηση αυτών που υπολογίστηκαν από τους παραπάνω τύπους και μέσω της διαδικασίας trial & error, ούτως ώστε η τελική συμπεριφορά της κεραίας να είναι η επιθυμητή.

4.3 Προσομοίωση μεμονωμένου στοιχείου Η/Μ ακτινοβολίας και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

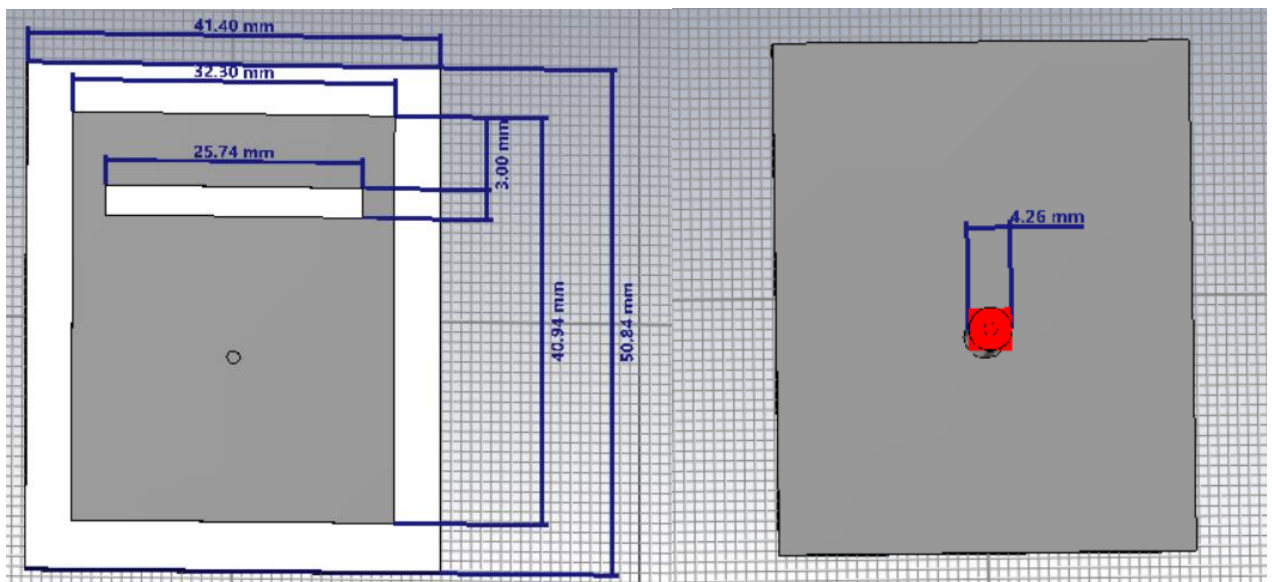
Εφόσον ολοκληρώθηκαν οι υπολογισμοί των διαστάσεων του patch και καταλήξαμε στο μέγεθος που θα φέρει η οπή, είμαστε πλέον σε θέση για την Η/Μ δοκιμή της κεραίας.

Βασικός γνώμονας καθορισμού του σχεδιασμού μας ως πετυχημένο είναι η αντίσταση εισόδου της κεραίας να προσεγγίζει την τιμή της αντίστασης που φέρει ο σηματολήπτης μας, δηλαδή τα 50Ω . Με αυτόν τον τρόπο, τα δύο αυτά κυκλώματα θα είναι συμβατά μεταξύ τους, υπό κοινή τροφοδοσία και στο πλαίσιο πραγματικών μετρήσεων.

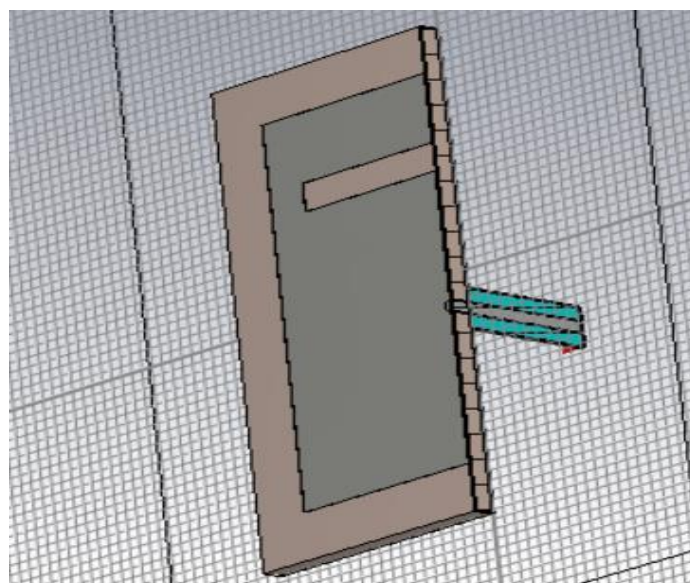
Εξίσου σημαντικό για να θεωρηθεί η υλοποίηση της παρούσας εργασίας ρεαλιστική, είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μεμονωμένου patch να είναι ικανοποιητικά για την μετέπειτα σχεδίαση της στοιχειοκεραίας.

Ειδικότερα, όσον αφορά στα στοιχεία ακτινοβολίας που θα τοποθετηθούν στο array πρέπει να απέχουν απόσταση μεταξύ τους $\lambda/2$ - $\lambda/3$, έτσι ώστε να μην υπάρχει ισχυρή παρουσία πλευρικών λοβών και να έχουμε την μέγιστη δυνατή ισχύ συσσωρευμένη στον κύριο λοβό. Επιπρόσθετα, συμπεραίνουμε ότι εκ των δύο συχνοτήτων που θα επιλέξουμε, η απόσταση την οποία θα ορίσουμε να απέχουν οι κεραίες μεταξύ τους, θα καθοριστεί από την χαμηλότερη τιμή συντονισμού, έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές στο εύρος του $\lambda/2$ - $\lambda/3$, ανεξάρτητα από το ποια τιμή θα επιλεγεί μετέπειτα ως δεύτερη συχνότητα συντονισμού.

Άλλοι αξιοσημείωτοι παράγοντες είναι το εύρος ζώνης και το βύθισμα/τιμή των S11 παραμέτρων στις επιθυμητές συχνότητες λειτουργίας.



Εικόνα 4.5 & 4.6: Οι δύο όψεις του patch μετά το άνοιγμα της οπής



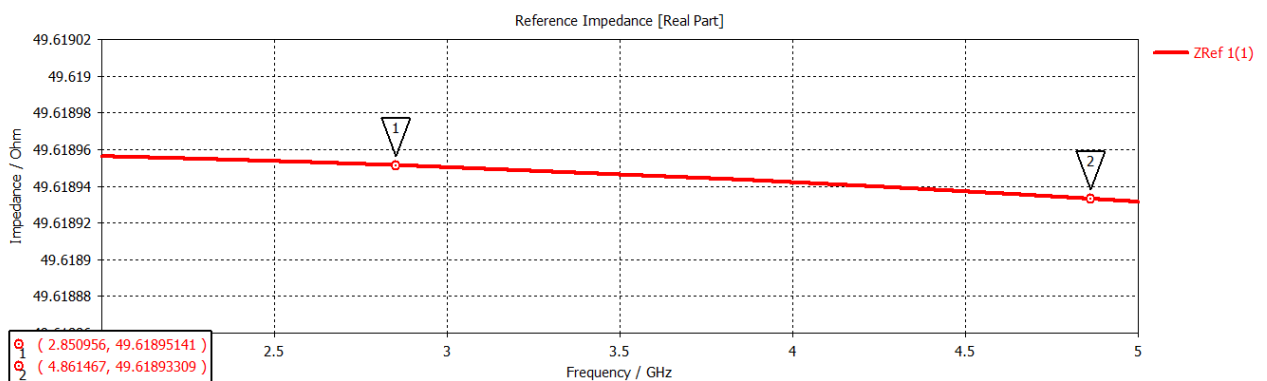
Εικόνα 4.7: Όψη του εσωτερικού του patch

4.3.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης

4.3.1.1 Δοκιμαστική προσομοίωση μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας

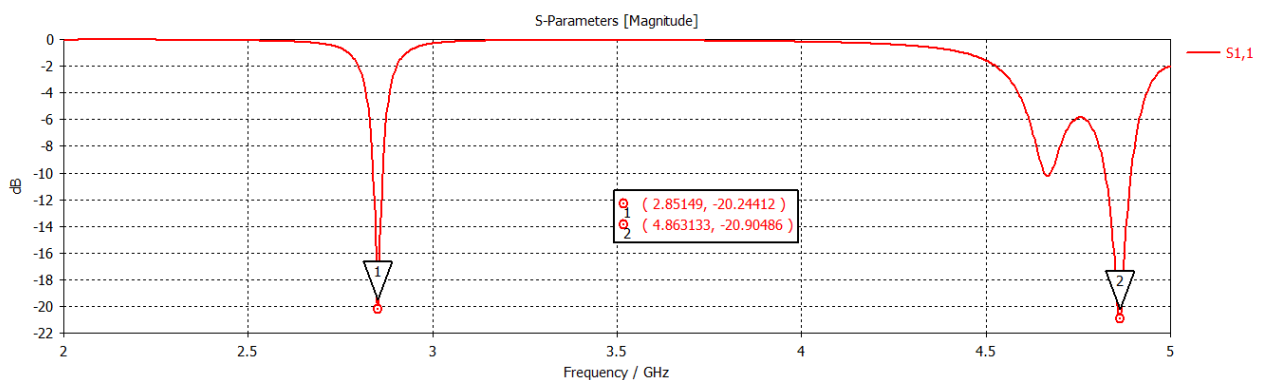
Η πρώτη απόπειρα Η/Μ προσομοίωσης έγινε δοκιμαστικά. Στόχος σε αυτό το στάδιο είναι να δούμε τη συμπεριφορά του μεμονωμένου patch ως προς την αντίσταση που θα παρουσιάσει, το μέγιστο κέρδος, το VSWR και την κατευθυντικότητα. Αν τα αποτελέσματα που έχουμε από το μεμονωμένο στοιχείο ακτινοβολίας είναι ικανοποιητικά, τότε μόνο μπορούμε να προχωρήσουμε στην μαθηματική και Η/Μ προσομοίωση της στοιχειοκεραίας. Διαφορετικά, θα υπάρξουν συνέπειες, οι οποίες σχετίζονται με απώλεια χρόνου στη σχεδίαση και φυσικά στα αποτελέσματα.

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι στις δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν μέχρι να καταλήξουμε στο τελικό μοντέλο της κεραίας, χρησιμοποιήθηκε συμμετρία magnetic στον άξονα YZ και πεπερασμένο-άπειρο ground plane, έτσι ώστε να ελαττωθεί ο χρόνος προσομοίωσης σημαντικά.



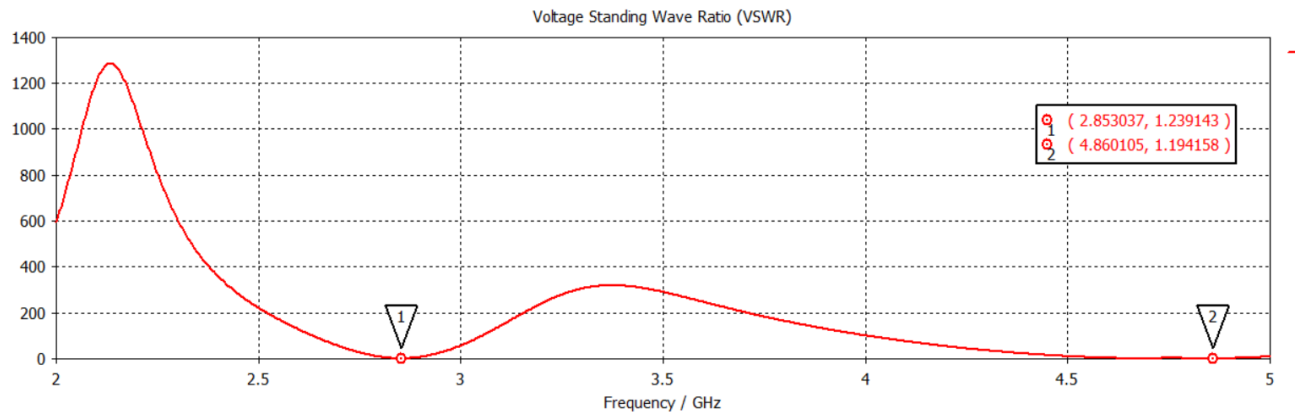
Εικόνα 4.8: Εμπέδηση εισόδου όπως προέκυψε από την δοκιμαστική προσομοίωση

Όσον αφορά στην αντίσταση εισόδου, παρατηρούμε ότι οι τιμές που προσεγγίζει στις συχνότητες συντονισμού είναι 49.6Ω. Συχνότητες ανεκτές, εφόσον προσεγγίζουν αρκετά τα 50Ω.



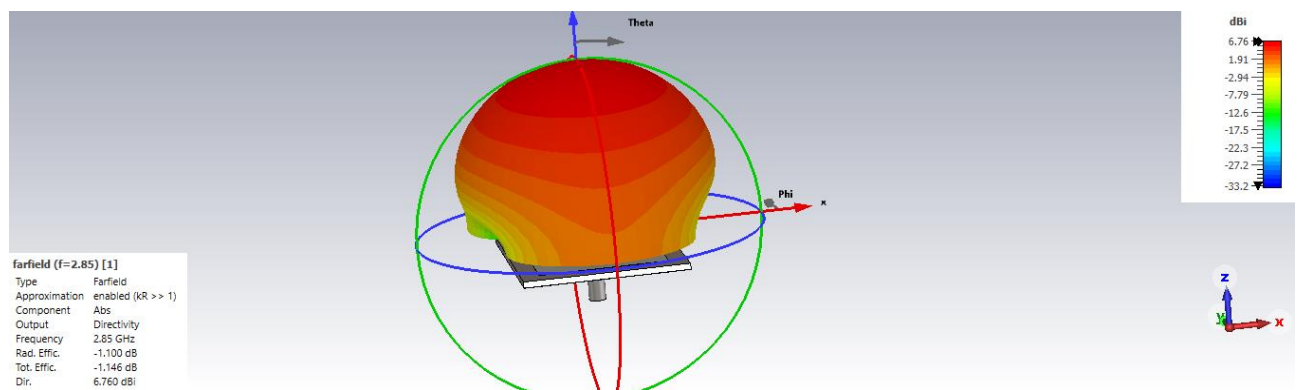
Εικόνα 4.9: S11 παράμετροι όπως προέκυψαν από την δοκιμαστική προσομοίωση

Παρατηρούμε ότι η πρώτη συχνότητα συντονισμού δεν εμφανίζεται στην επιθυμητή τιμή που είναι τα 2.4GHz. Πρόκειται για κάτι που αναμέναμε να συμβεί, δεδομένου ότι οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του patch είναι προσεγγιστικοί. Συνεπώς, οι συχνότητες λειτουργίας είναι τα 2.85GHz και τα 4.86GHz.



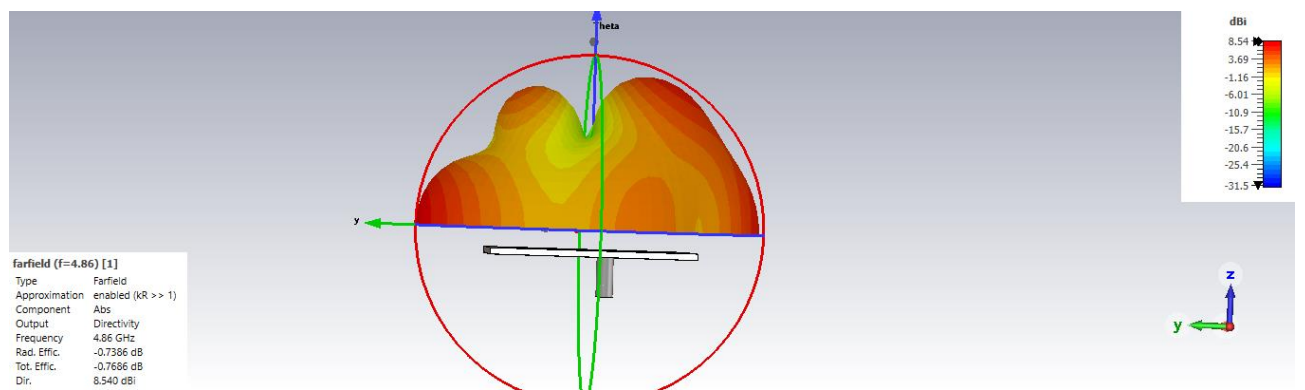
Εικόνα 4.10 : VSWR μεμονωμένου patch στις συχνότητες λειτουργίας 2.85 GHz και 4.86 GHz

Οι τιμές του λόγου στασίμου κυμάτος VSWR στις συχνότητες λειτουργίας είναι πολύ κοντά στο 1, πληροφορία που υποδεικνύει ότι η προσαρμογή της κεραίας είναι αρκετά καλή.



Εικόνα 4.11: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στη χαμηλή συχνότητα (2.85 GHz)

Τέλος, παρατηρούμε το διάγραμμα ακτινοβολίας και στις δύο επιλεγμένες συχνότητες λειτουργίας. Για την χαμηλή συχνότητα (2.85 GHz), τα αποτελέσματα είναι πλήρως ικανοποιητικά, διότι αφενός το στοιχείο ακτινοβολίας παρουσιάζει υψηλή κατευθυντικότητα, αφετέρου αποδίδει 6.76 dBi κέρδος, το οποίο ήταν αναμενόμενο βάσει της άπειρης γείωσης που θεωρήσαμε, τουλάχιστον για την δοκιμαστική προσομοίωση.



Εικόνα 4.12: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στην υψηλή συχνότητα (4.86 GHz)

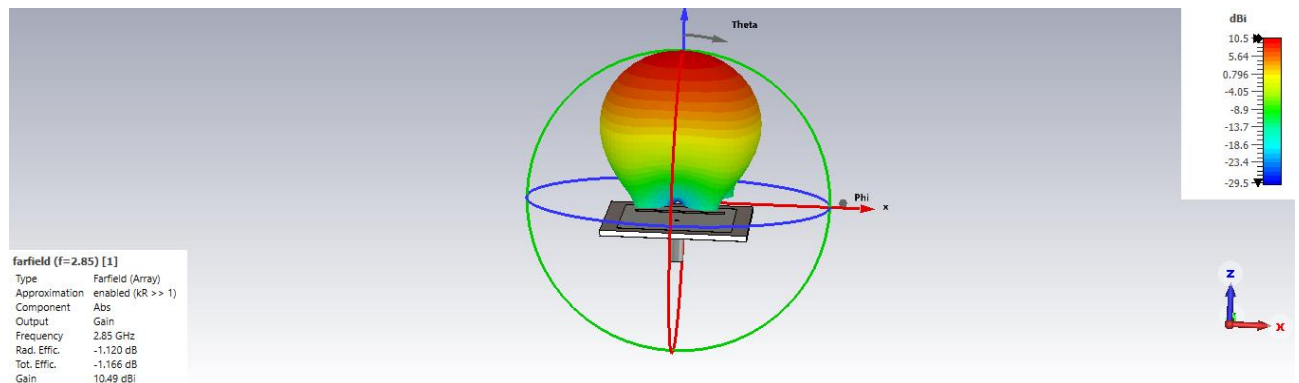
Όσον αφορά στην υψηλή συχνότητα (4.86 GHz), η κατευθυντικότητα της κεραίας δεν είναι ικανοποιητική, δεδομένα που μαρτυρούν α) το άνοιγμα στον κύριο λοβό, β) την ισχύ του σήματος χαμηλά στα άκρα του.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι πιθανότατα θα έχουμε ισχυρούς πλευρικούς λοβούς και μειωμένη κατευθυντικότητα, πληροφορίες που καθιστούν την κεραία μας μη αποδεκτή.

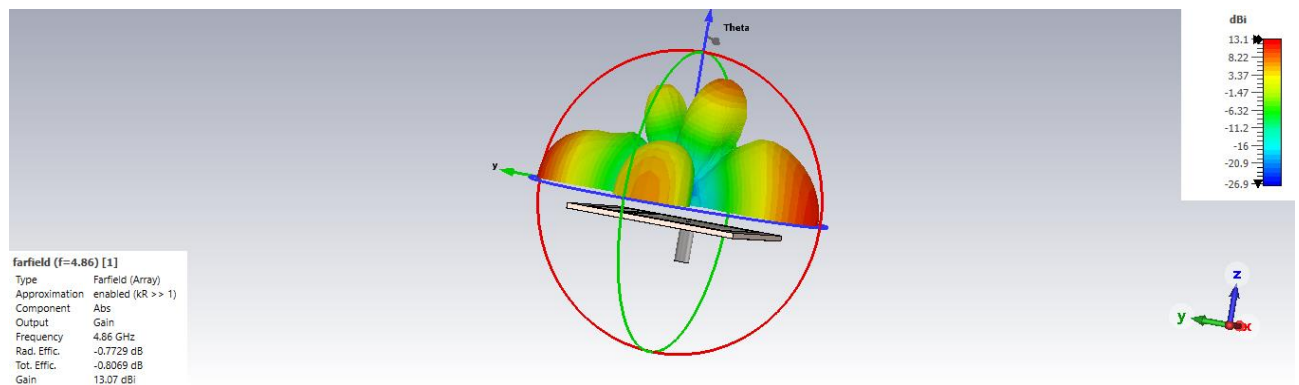
4.3.1.2 Δοκιμαστική προσομοίωση στοιχειοκεραίας 2x2

Αρχικά έγινε μαθηματική προσομοίωση της στοιχειοκεραίας, η απόσταση μεταξύ των στοιχείων σε οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα ορίστηκε στα $\lambda/2 = 52.63\text{mm}$.

Έγινε χωρίς περιστροφή λοβού, ενώ όλα τα στοιχεία ακτινοβολίας είχαν την ίδια φάση.



Εικόνα 4.13: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στη χαμηλή συχνότητα (2.85 GHz)



Εικόνα 4.14: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (4.86 GHz)

Το διάγραμμα ακτινοβολίας για την χαμηλή συχνότητα είναι ικανοποιητικό. Ωστόσο, όπως ήταν αναμενόμενο, τα συμπεράσματα για την υψηλή συχνότητα δεν είναι αποδεκτά.

Υπάρχουν ισχυρότατοι πλευρικοί λοβοί.

Η κεραία, λοιπόν, λειτουργεί μεν σε δύο συχνότητες (διζωνική), αλλά θα χρειαστεί βελτίωση των παραμέτρων της, προκειμένου να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ορθής λειτουργίας και να κατασταλούν οι πλευρικοί λοβοί.

4.3.2 Βελτιστοποίηση γεωμετρίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας

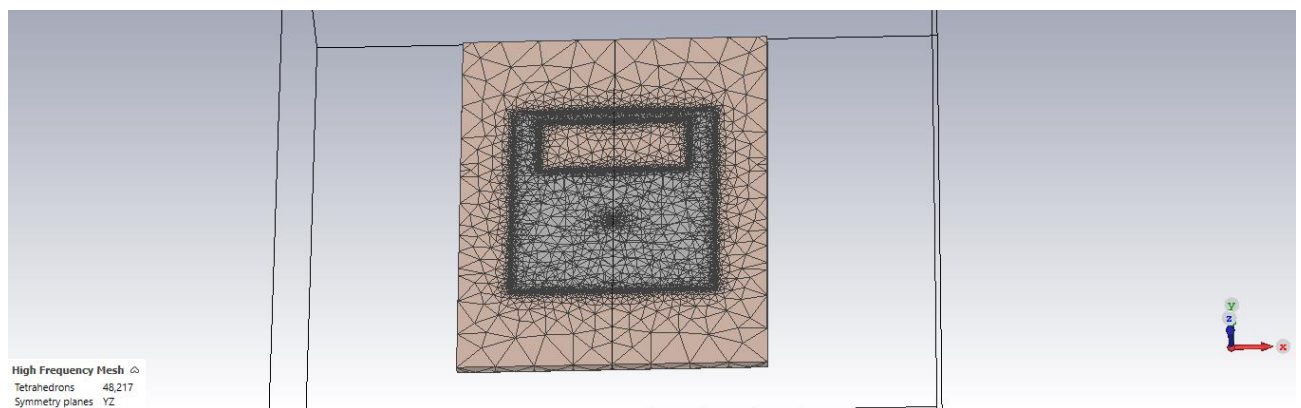
Πρώτη σκέψη για την βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς της στοιχειοκεραίας ήταν να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ των μεμονωμένων κεραιών, άρα επί της ουσίας έπρεπε να αυξηθεί το μήκος κύματος λ και να μειωθεί σίγουρα η πρώτη συχνότητα λειτουργίας.

Οι τελικές διαστάσεις της κεραίας προέκυψαν έπειτα από πολλαπλές προσομοιώσεις, αυτή τη φορά σε συνθήκες ελεύθερου χώρου. Οι σημαντικότερες αλλαγές ήταν η αύξηση της επιφάνειας του διηλεκτρικού, άρα και της γείωσης, έτσι ώστε να αυξηθεί το μέγιστο κέρδος και να μειωθεί η χαμηλή συχνότητα λειτουργίας. Οι διαστάσεις της κεραίας παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

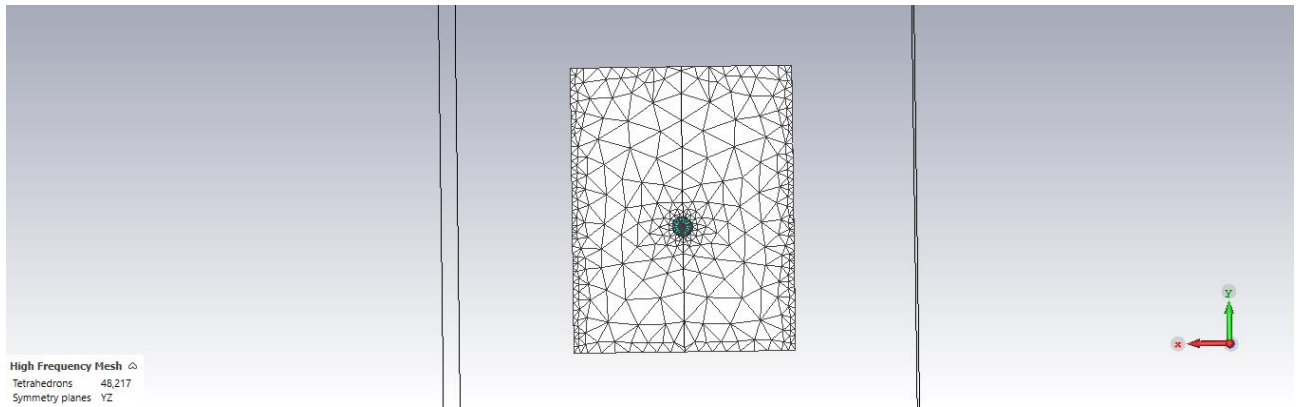
Parameter List			
Y	Name	Expression	Value
-	xsub	= 49.6	49.6
-	ysub	= 63.6	63.6
-	hsub	= 1.524	1.524
-	metal_thick	= 0.035	0.035
-	L	= 33	33
-	W	= 35.3	35.3
-	D0	= 4.22	4.22
-	Di	= 1.27	1.27
-	ypin	= -4	-4
-	lcoax	= 10	10
-	a	= 5.6	5.6

Πίνακας 4.1.1: Τελικός πίνακας διαστάσεων μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας

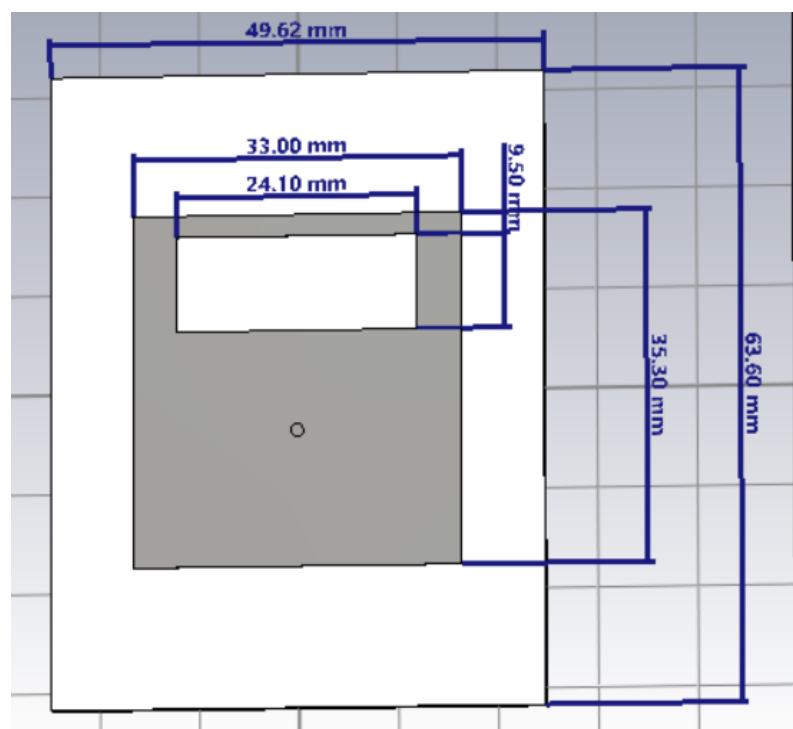
Η κεραία διακριτοποιήθηκε σε 48217 τετράεδρα, ως όριο σφάλματος για την ανάλυση της ορίστηκε το 2% για τον υπολογισμό της S11 παραμέτρου.



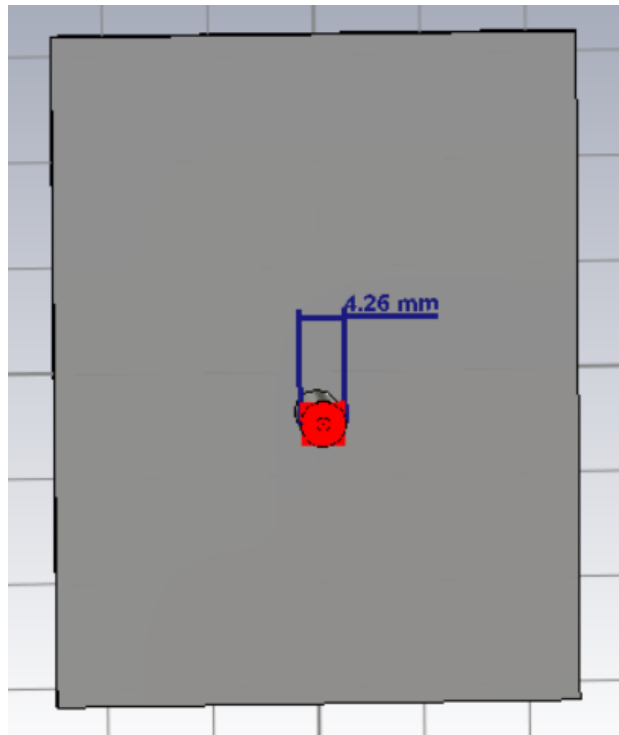
Εικόνα 4.15: Εμπρόσθια όψη μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας σε διακριτοποιημένα κελιά



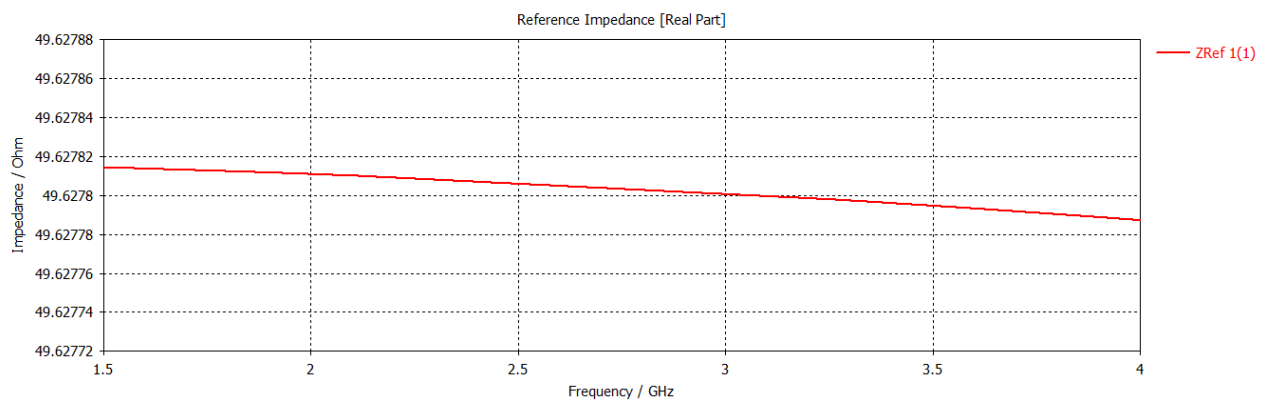
Εικόνα 4.16: Οπίσθια όψη μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας σε διακριτοποιημένα κελιά



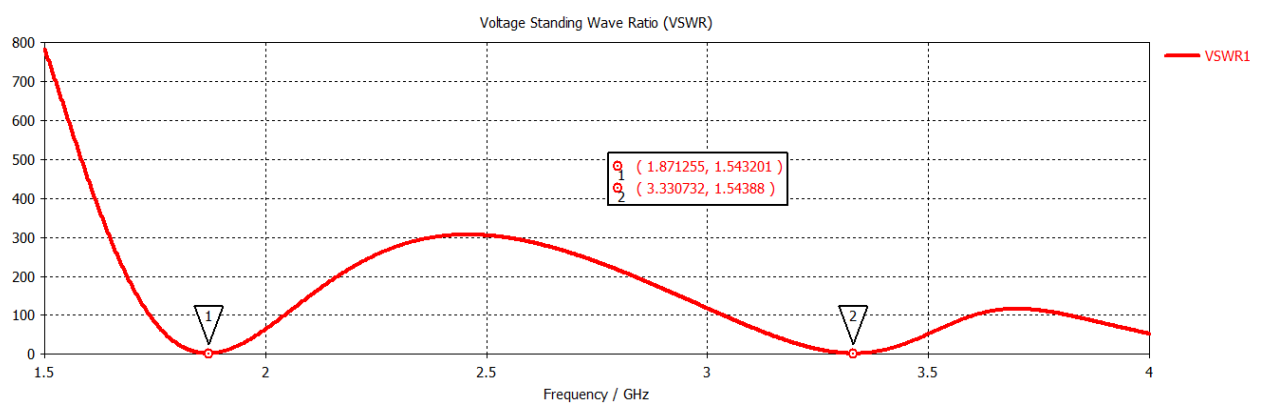
Εικόνα 4.17: Τελική όψη μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας (εμπρόσθια)



Εικόνα 4.18: Τελική όψη μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας(οπίσθια)

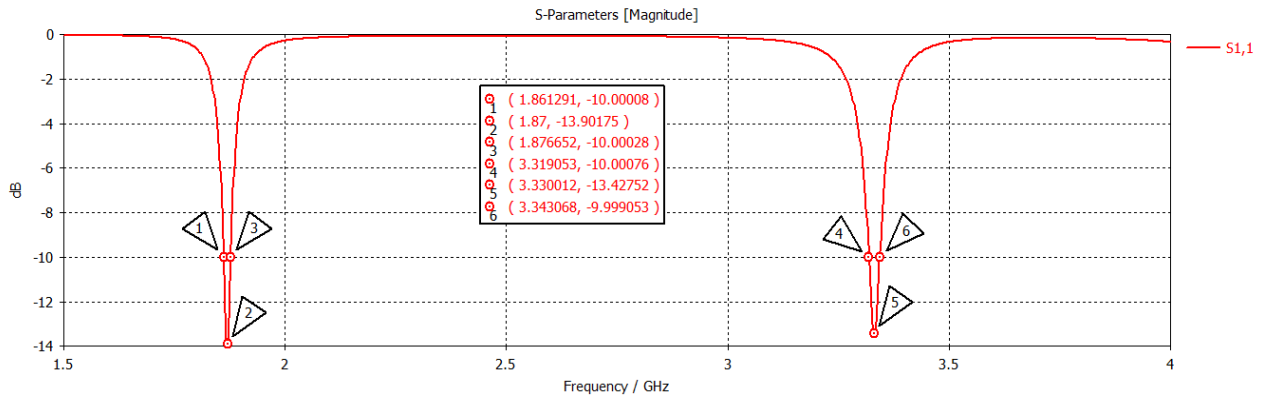


Εικόνα 4.19: Εμπέδηση εισόδου όπως προέκυψε από την τελική προσομοίωση



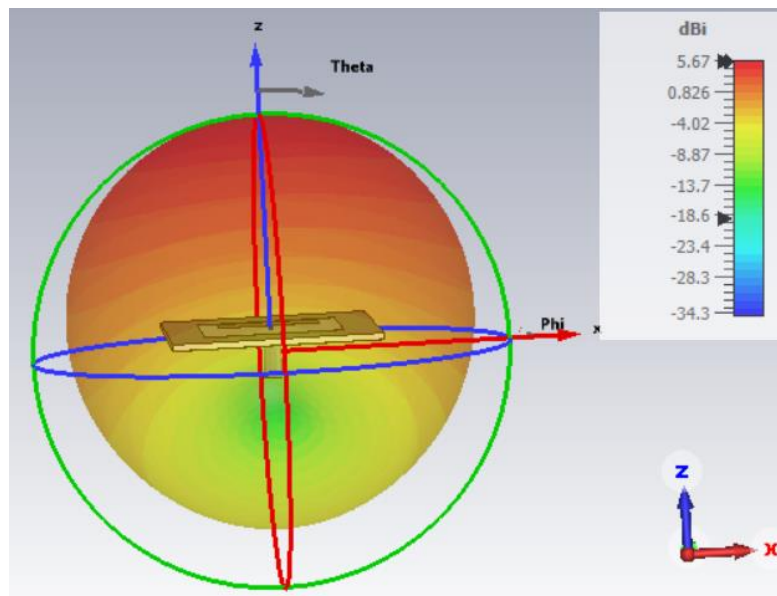
Εικόνα 4.20: VSWR μεμονωμένου patch στις συχνότητες 1.87 GHz και 3.33 GHz

Οι τιμές που προέκυψαν αναμένονταν βάσει της θεωρίας. Η εμπέδηση εισόδου αγγίζει τα 49.62 Ω και το VSWR το 1.54, τιμές ανεκτές εφόσον προσεγγίζουν αρκετά τα 50 Ω και το 1, αντίστοιχα.

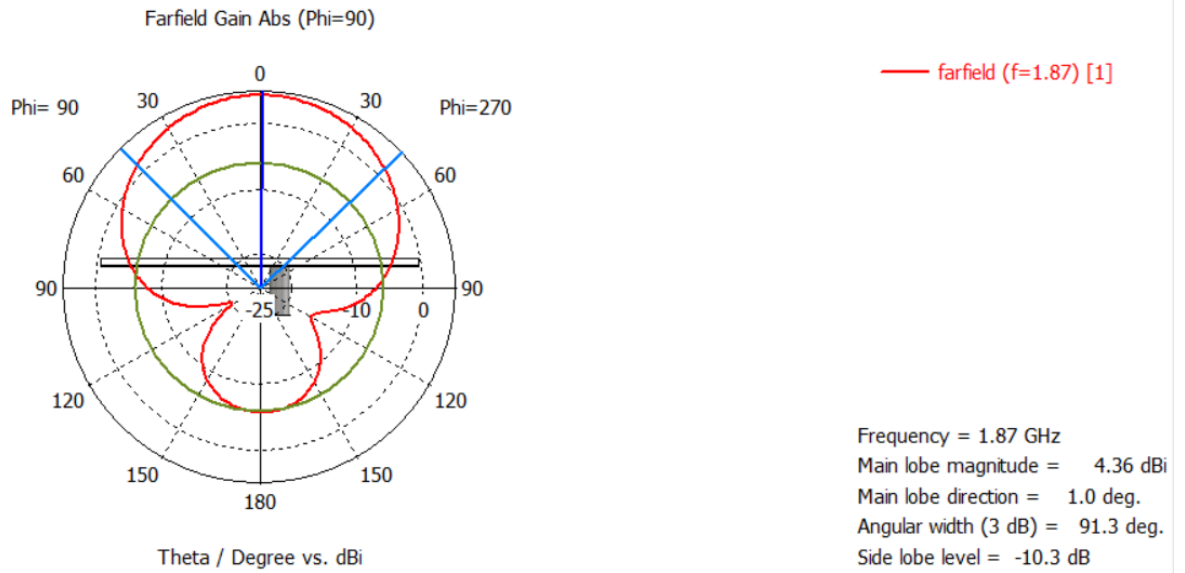


Εικόνα 4.21: S11 παράμετροι όπως προέκυψαν από την τελική προσομοίωση

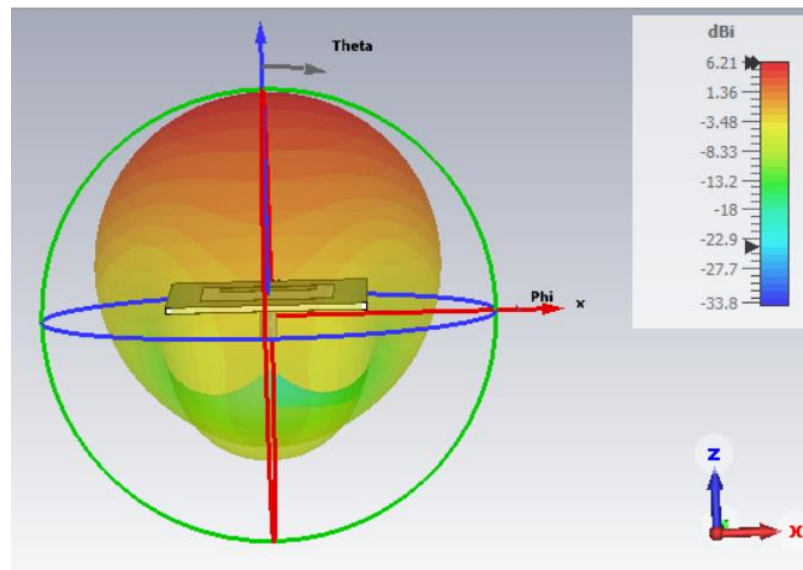
Τα εύρη ζώνης της κεραίας είναι 1.861 - 1.876 GHz και 3.319 - 3.343 GHz.



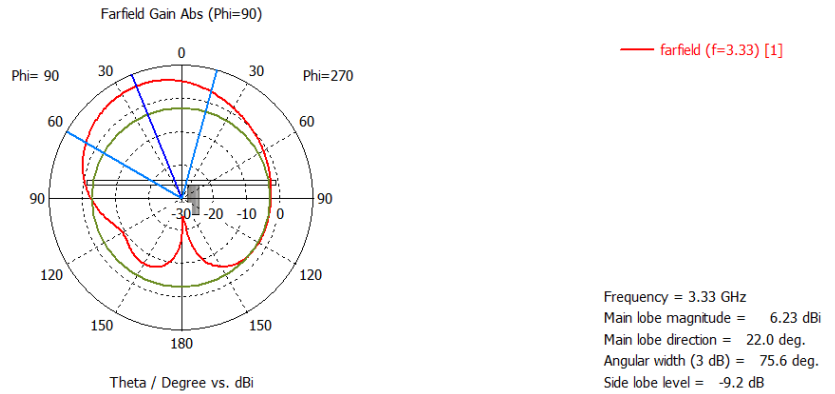
Εικόνα 4.22: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στη χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz)



Εικόνα 4.23: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στη χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz)



Εικόνα 4.24: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz)



Εικόνα 4.25: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz)

Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα ακτινοβολίας για τα μεμονωμένα στοιχεία δεν παρουσιάζουν ισχυρούς δευτερεύοντες λοβούς, στοιχείο απαραίτητο για την σχεδίαση της στοιχειοκεραίας. Επίσης, η κατευθυντική της ικανότητα δεν είναι ισχυρή, αλλά αναμένουμε να βελτιωθεί. Τέλος, παρουσιάζουν 5.67 dBi και 6.21dBi κέρδος, τιμές αναμενόμενες, δεδομένου ότι το διηλεκτρικό είναι πλήρως γειωμένο στην μία πλευρά του.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την Η/Μ προσομοίωση του μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας για την χαμηλή συχνότητα λειτουργίας - 1.87 GHz και αντίστοιχα την υψηλή συχνότητα - 3.33 GHz.

Η/Μ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	ΧΑΜΗΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ 1.87 GHz	ΥΨΗΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ 3.33 GHz
Main lobe magnitude	4.36 dBi	6.23 dBi
Main lobe direction	1.0 deg	22.0 deg
Angular width (3dB)	91.3dB	75.6dB
Side lobe lever	-10.3dB	-9.2dB

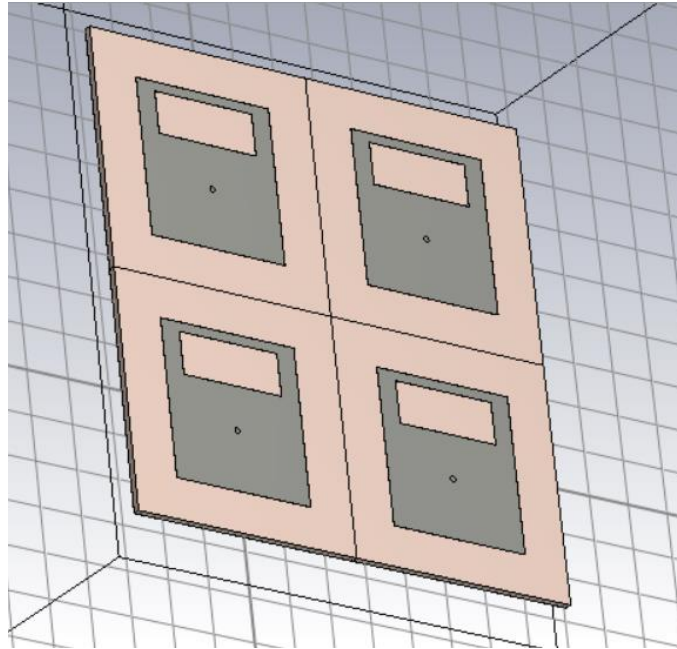
Πίνακας 1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων Η/Μ προσομοίωσης για την χαμηλή συχνότητα του μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας

4.4 Σχεδίαση Στοιχειοκεραίας

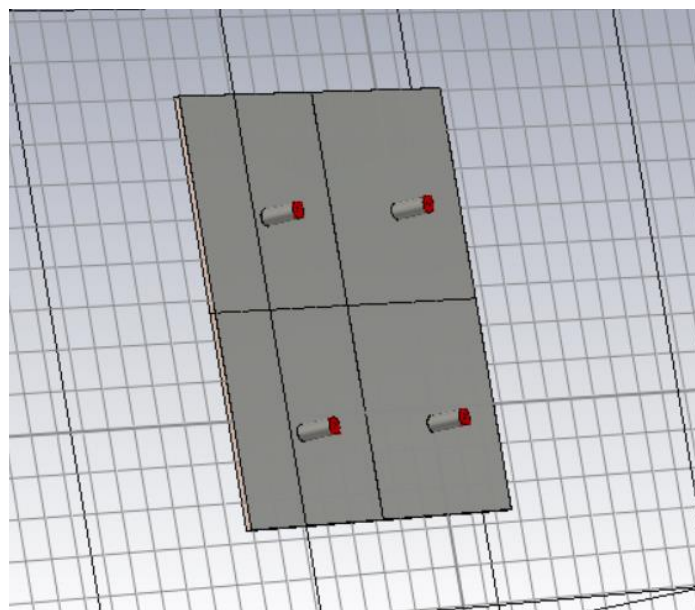
Τα στοιχεία ακτινοβολίας τοποθετήθηκαν σε διάταξη 2x2, δύο στον οριζόντιο άξονα και δύο στον κάθετο άξονα με ορθογωνική συμμετρία. Βάσει της χαμηλής συχνότητας 1.87 GHz που φέρει μήκος κύματος $\lambda=160.42$ mm, τα στοιχεία τοποθετήθηκαν σε απόσταση $\lambda/3=53.47$ mm. Η συγκεκριμένη απόσταση ορίστηκε μετά από πολλαπλές δοκιμές και λάθη για τις αποστάσεις μεταξύ $\lambda/2$ και $\lambda/3$. Στόχος ήταν η μέγιστη δυνατή συγκέντρωση κέρδους στον κύριο λοβό και η παρουσία το δυνατόν όσο πιο ανίσχυρων λοβών ήταν εφικτό. Όπως παρατηρούμε στα παρακάτω

διαγράμματα, για $\lambda/3$ διαφορά, η στοιχειοκεραία παρουσιάζει αυξημένη και μάλιστα ισχυρή κατευθυντικότητα μετά την μαθηματική προσομοίωση, χωρίς την παρουσία πλευρικών λοβών, ειδικά στη δεύτερη συχνότητα λειτουργίας της. Το μέγιστο κέρδος που αποδίδουν έχει αυξηθεί και είναι της τάξης, έπειτα από την μαθηματική προσομοίωση, 6.91dBi για την χαμηλή συχνότητα και 12.1dBi για την υψηλή συχνότητα και αντίστοιχα 8.99dBi και 13.8dBi όπως προέκυψαν από την Η/Μ προσομοίωση.

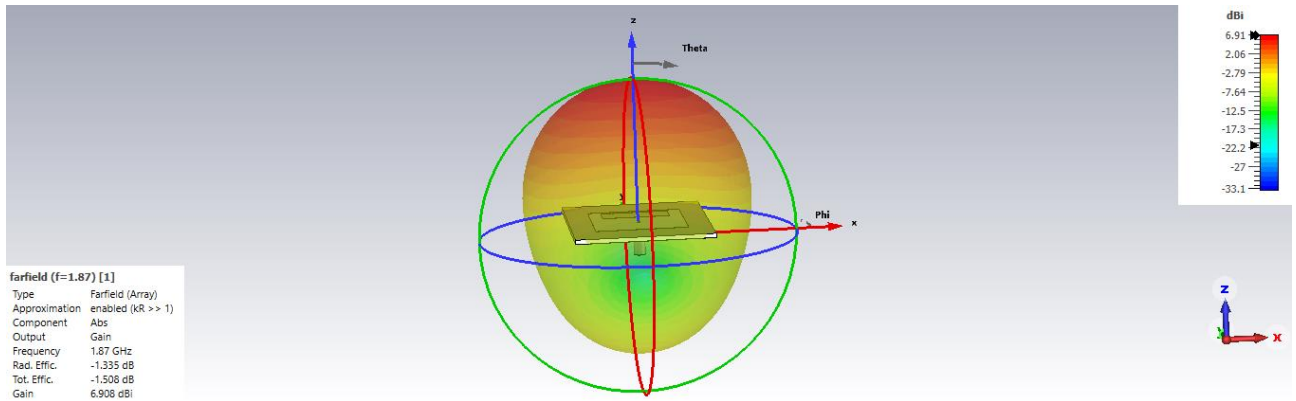
Η τροφοδοσία της κεραίας επιτυγχάνεται μέσω feeding network, αποτελούμενο από διαίρετες ισχύος Wilkinson, το οποίο έχει 1 είσοδο και 4 εξόδους, ώστε να τελικά να τροφοδοτούνται μέσω coaxial σηματολήπτη τα 4 στοιχεία ακτινοβολίας που αποτελούν τη στοιχειοκεραία.



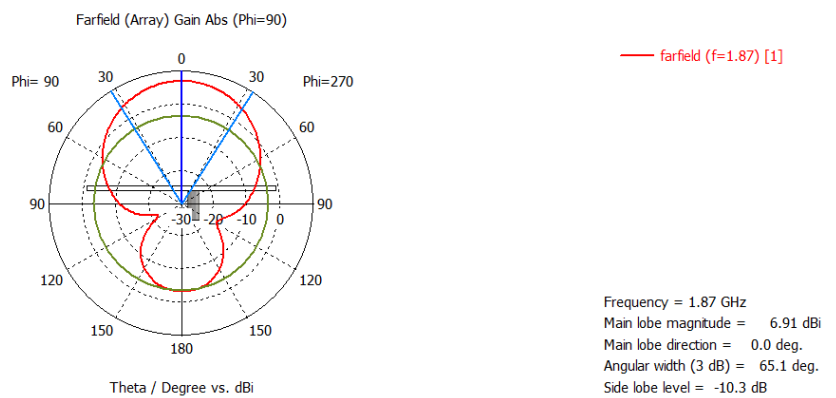
Εικόνα 4.26: Εμπρόσθια όψη στοιχειοκεραίας



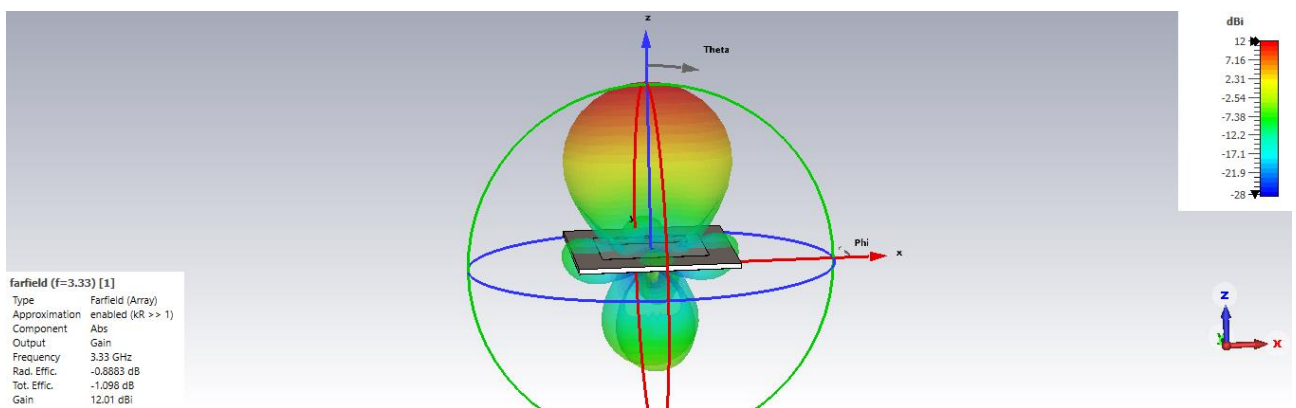
Εικόνα 4.27: Οπίσθια όψη στοιχειοκεραίας 2x2



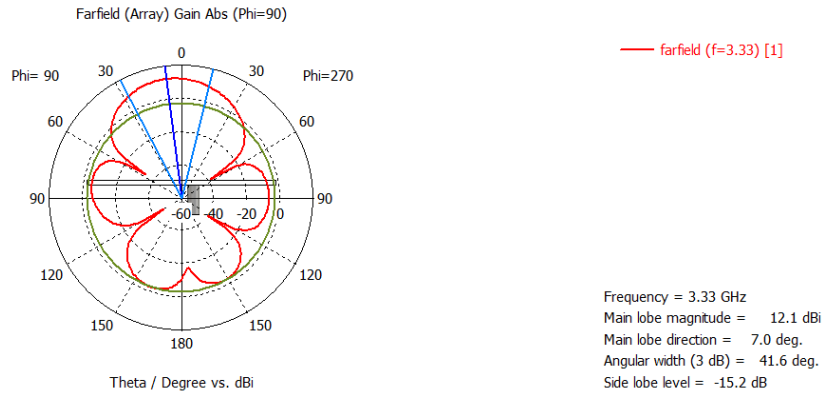
Εικόνα 4.28: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2Χ2 στην χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz) μετά την μαθηματική προσομοίωση



Εικόνα 4.29: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2Χ2 στην χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz) μετά την μαθηματική προσομοίωση

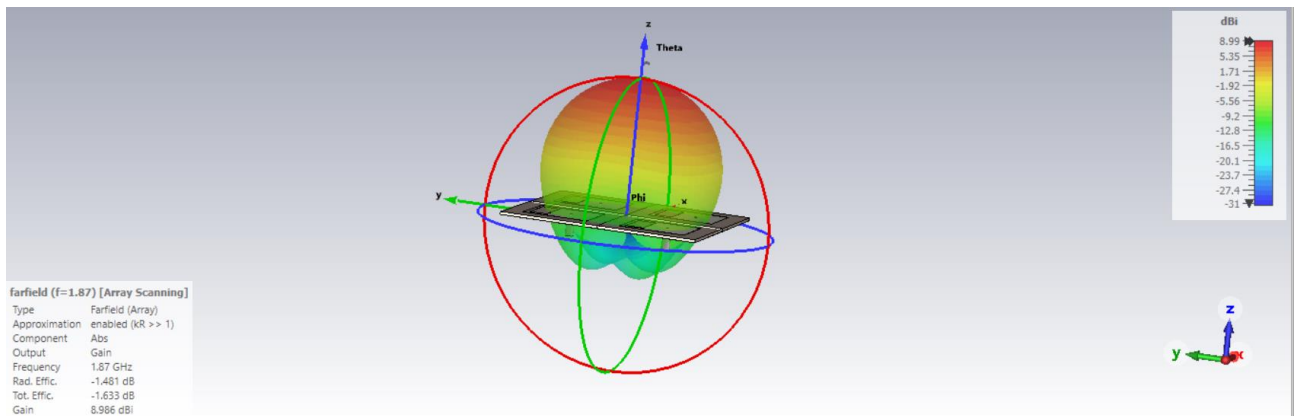


Εικόνα 4.30: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2Χ2 στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz) μετά την μαθηματική προσομοίωση

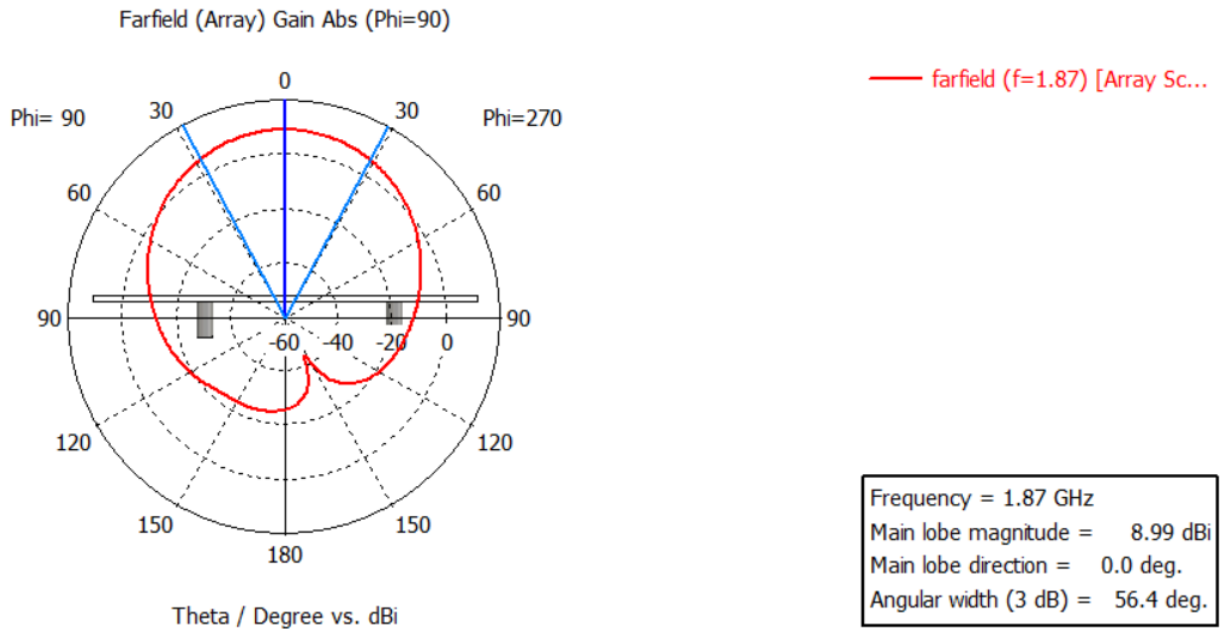


Εικόνα 4.31: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz) μετά την μαθηματική προσομοίωση

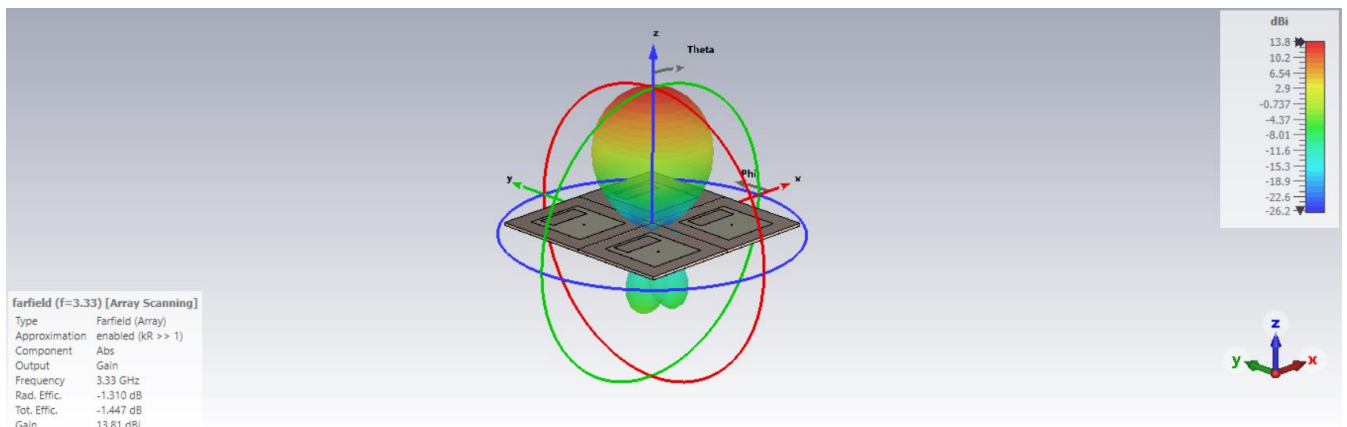
Τέλος, κατόπιν της μαθηματικής προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε Η/Μ προσομοίωση της στοιχειοκεραίας. Παρατηρούμε μικρές διαφορές στα χαρακτηριστικά ακτινοβολήσης, οι οποίες ενδεχομένως εμφανίζονται λόγω της ακρίβειας των μαθηματικών πράξεων.



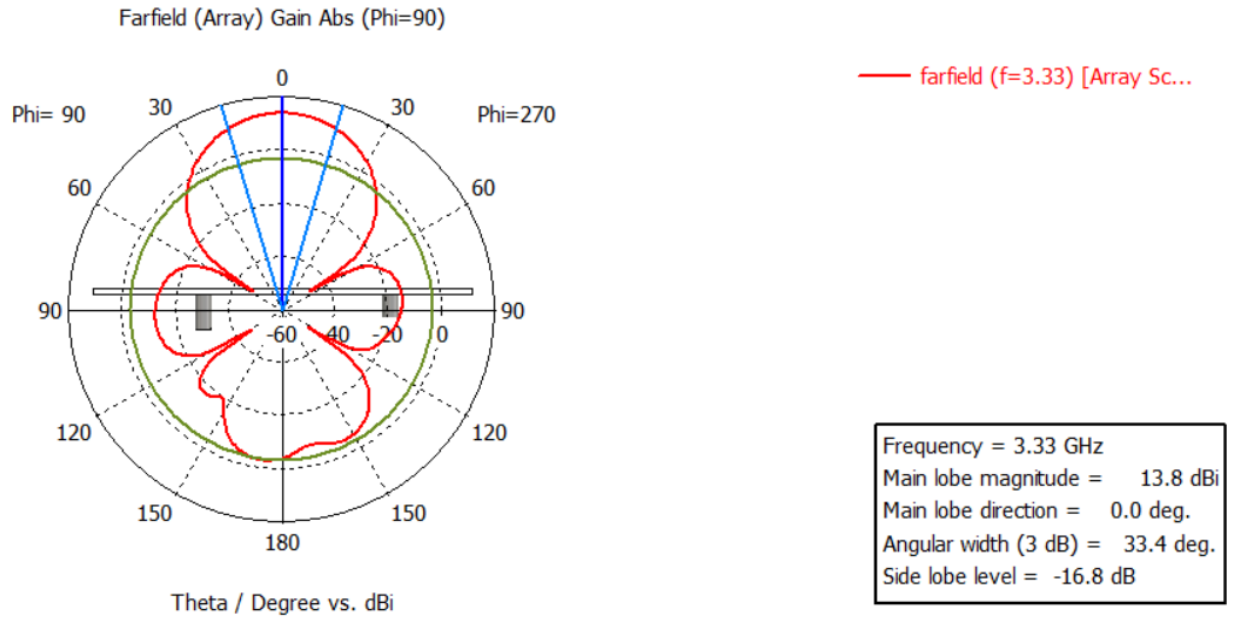
Εικόνα 4.32: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στη χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz) μετά την Η/Μ προσομοίωση



Εικόνα 4.33: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην χαμηλή συχνότητα (1.87 GHz) μετά την H/M προσομοίωση



Εικόνα 4.34: 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz) μετά την H/M προσομοίωση



Εικόνα 4.35: 1D Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 2X2 στην υψηλή συχνότητα (3.33 GHz) μετά την H/M προσομοίωση

Χαμηλή συχνότητα – 1.87 GHz

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	H/M ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
Main lobe magnitude	6.91dBi	8.99dBi
Main lobe direction	0 deg	0 deg
Angular width (3dB)	65.1dB	56.4dB
Side lobe lever	-10.3dB	-

Πίνακας 2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ μαθηματικής και H/M προσομοίωσης για την χαμηλή συχνότητα της στοιχειοκεραίας

Υψηλή συχνότητα – 3.33 GHz

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	H/M ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
Main lobe magnitude	12.1dBi	13.8dBi
Main lobe direction	7.0 deg	0 deg
Angular width (3dB)	41.6dB	33.4dB
Side lobe lever	-15.2dB	-16.8dB

Πίνακας 3: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ μαθηματικής και H/M προσομοίωσης για την υψηλή συχνότητα της στοιχειοκεραίας

ΧΑΜΗΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ - 1.87 GHz

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ
Main lobe magnitude	4.36 dBi	8.99 dBi
Main lobe direction	1.0 deg	0 deg
Angular width (3dB)	91.3dB	56.4dB
Side lobe lever	-10.3dB	-

Πίνακας 4: Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας μεμονωμένης κεραίας και στοιχειοκεραίας όπως προέκυψαν από Η/Μ προσομοίωση με αναφορά την χαμηλή συχνότητα

ΥΨΗΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ - 3.33 GHz

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ
Main lobe magnitude	6.23 dBi	13.8dBi
Main lobe direction	22.0 deg	0 deg
Angular width (3dB)	75.6dB	33.4dB
Side lobe lever	-9.2dB	-16.8dB

Πίνακας 5: Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας μεμονωμένης κεραίας και στοιχειοκεραίας όπως προέκυψαν από Η/Μ προσομοίωση με αναφορά την υψηλή συχνότητα

Παρατηρώντας τους πίνακες αντιλαμβανόμαστε πως η συμπεριφορά της στοιχειοκεραίας σε σχέση με τα μεμονωμένα στοιχεία ακτινοβολίας, συνοδεύεται από μεγαλύτερη κατευθυντικότητα, καθώς και οι δύο συχνότητες έχουν την ίδια σκόπευση. Συνεπώς, το συνολικό κέρδος είναι αυξημένο, κάτι το οποίο εξηγείται και από την μειωμένη ισχύ των πλευρικών λοβών.

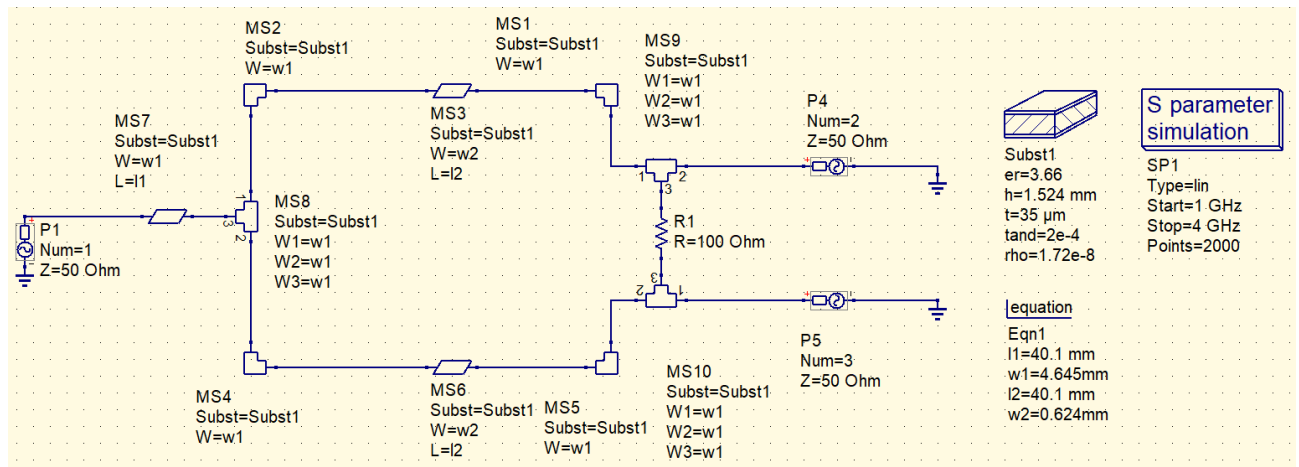
4.5 Η/Μ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

4.5.1 Μορφοποίηση Δέσμης [18]

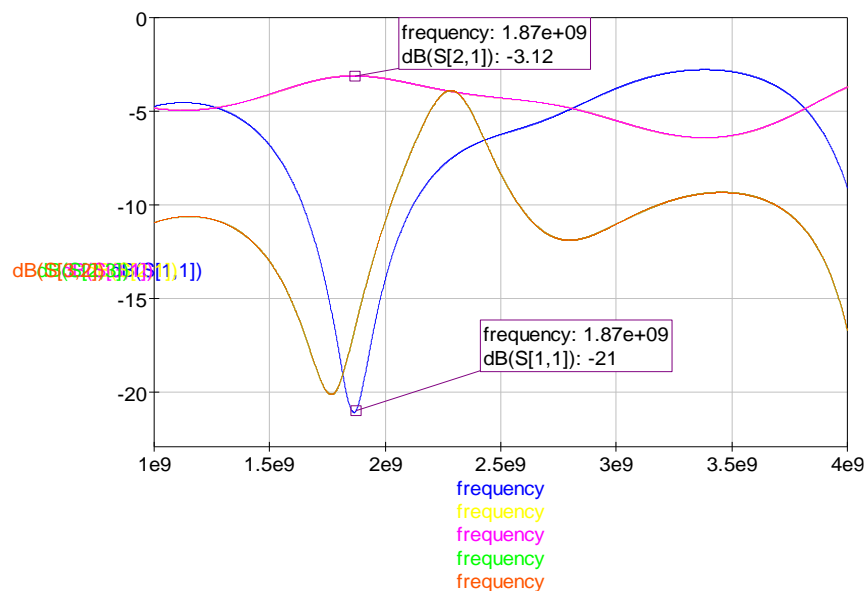
Για την επίτευξη μορφοποίησης δέσμης της στοιχειοκεραίας απαιτείται η προσθήκη ενός module. Επρόκειτο για κύκλωμα τροφοδοσίας και συγκεκριμένα ενός διαιρέτη ισχύος Wilkinson 1:4, το οποίος μέσω διαδοχικής στοίχισης με 1 είσοδο και 4 εξόδους μπορεί να λειτουργήσει ως combiner, ώστε να μπορούν να τροφοδοτηθούν τα 4 στοιχεία ακτινοβολίας μέσω ομοαξονικού σηματολήπτη. Γενικότερα, στόχος του διαιρέτη ισχύος Wilkinson power, ως τρίθυρο δικτύωμα είναι η ισόποση κατανομή ισχύος των 3dB σε κάθε μια από τις 2 εξόδους του.

Συγκεκριμένα στη παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην επίτευξη matching state στις εισόδους της στοιχειοκεραίας (αποτελείται από 4 πανομοιότυπα μεμονωμένα στοιχεία ακτινοβολίας), με απώτερο στόχο την εκμηδένιση ανακλάσεων και συνεπώς τη πλήρη διάδοση του σήματος από το κύκλωμα τροφοδοσίας. Βασικές απαιτήσεις είναι η αντίσταση και η συχνότητα

λειτουργίας του να είναι ίσες με της στοιχειοκεραίας δηλαδή με 50 Ohm, ώστε να επιτυγχάνεται προσαρμογή και απομόνωση μεταξύ των κυκλωμάτων. Επιπλέον, το διηλεκτρικό σχεδίασης του feeding network να είναι ίδιο με αυτό της κεραίας. Το μήκος της μικροταινίας που χρησιμοποιήθηκε για τον διαιρέτη ισχύος είναι $\lambda/4=40.1$ mm για λειτουργία στα 1.87 GHz, ενώ τοποθετήθηκε και μια αντίσταση των 100Ω, ώστε να επιτευχθεί απομόνωση μεταξύ των εξόδων.



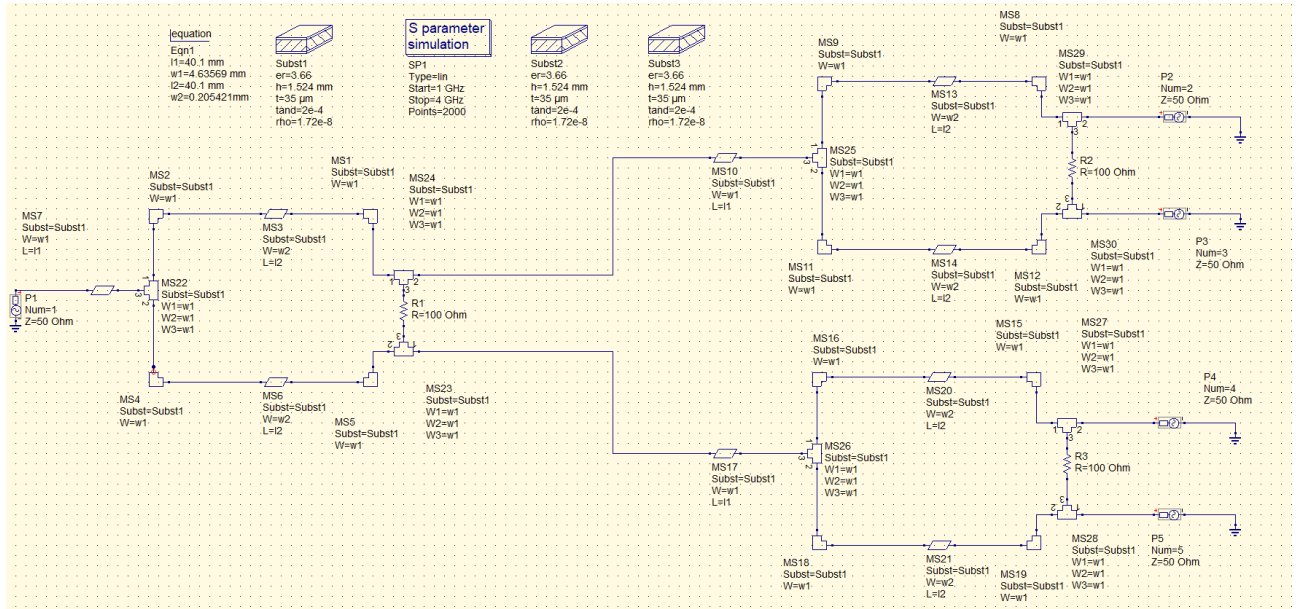
Εικόνα 4.36: Wilkinson Power Divider



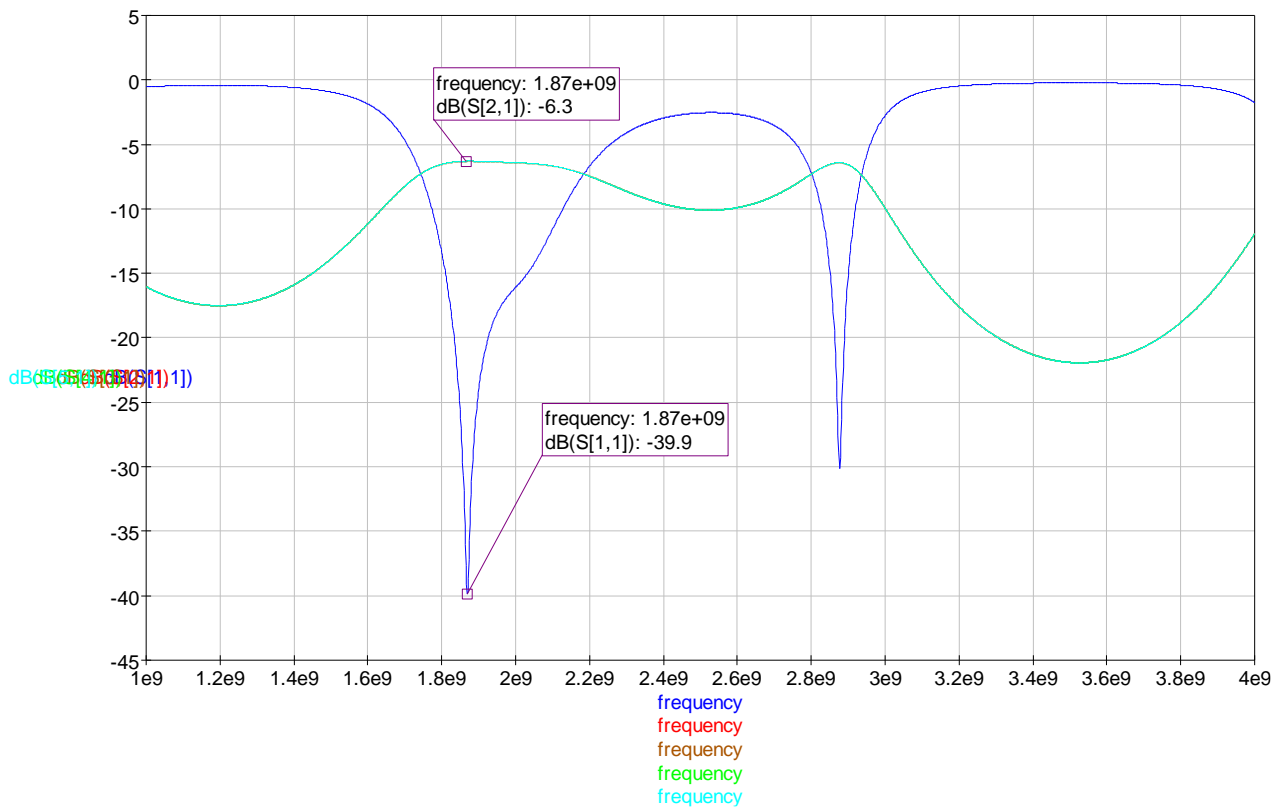
Εικόνα 4.37: Διάγραμμα S παράμετρων Wilkinson Power Divider

Το αποτέλεσμα είναι να τροφοδοτείται ισόποσα η κάθε είσοδος του κυκλώματος έως τις εξόδους του. Παρατηρούμε, πως η S11 είναι στα 1.87 GHz στα -21dB, ταυτόχρονα η ισχύς μοιράζεται από την πόρτα 1-2, 1-3 στα -3.12dB.

Κατόπιν, αναπαράχθηκε ο διαιρέτης που σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε, ώστε να υλοποιηθεί σύστημα τροφοδοσίας Wilkinson με 7 πόρτες εκ των οποίων οι 4 είναι οι εξοδοί που καταλήγουν στα στοιχεία που αποτελούν τη στοιχειοκεραία.



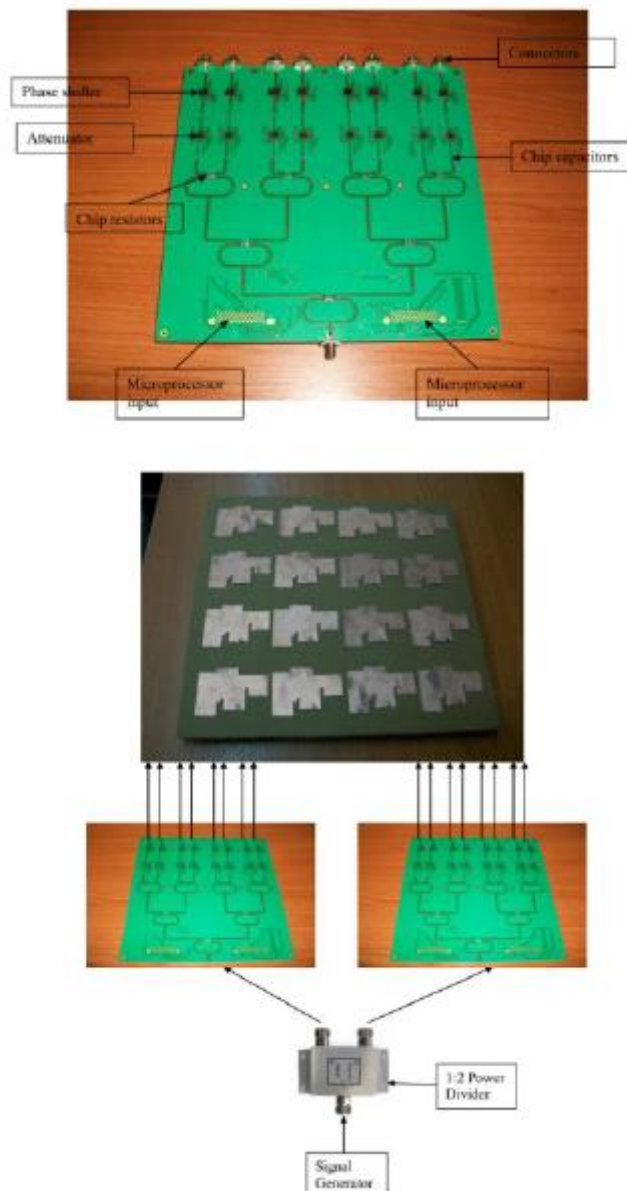
Εικόνα 4.38: Wilkinson Feeding Network 1:4



Εικόνα 4.39: Διάγραμμα S παράμετρων Feeding Network 1:4

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, ο συντονισμός πλέον είναι σχεδόν στα -40dB, στις θύρες εξόδου έχουμε -6.03dB τιμή που επαληθεύει ότι για κάθε διαιρέτη ισχύος ανεβαίνει κατά 3dB.

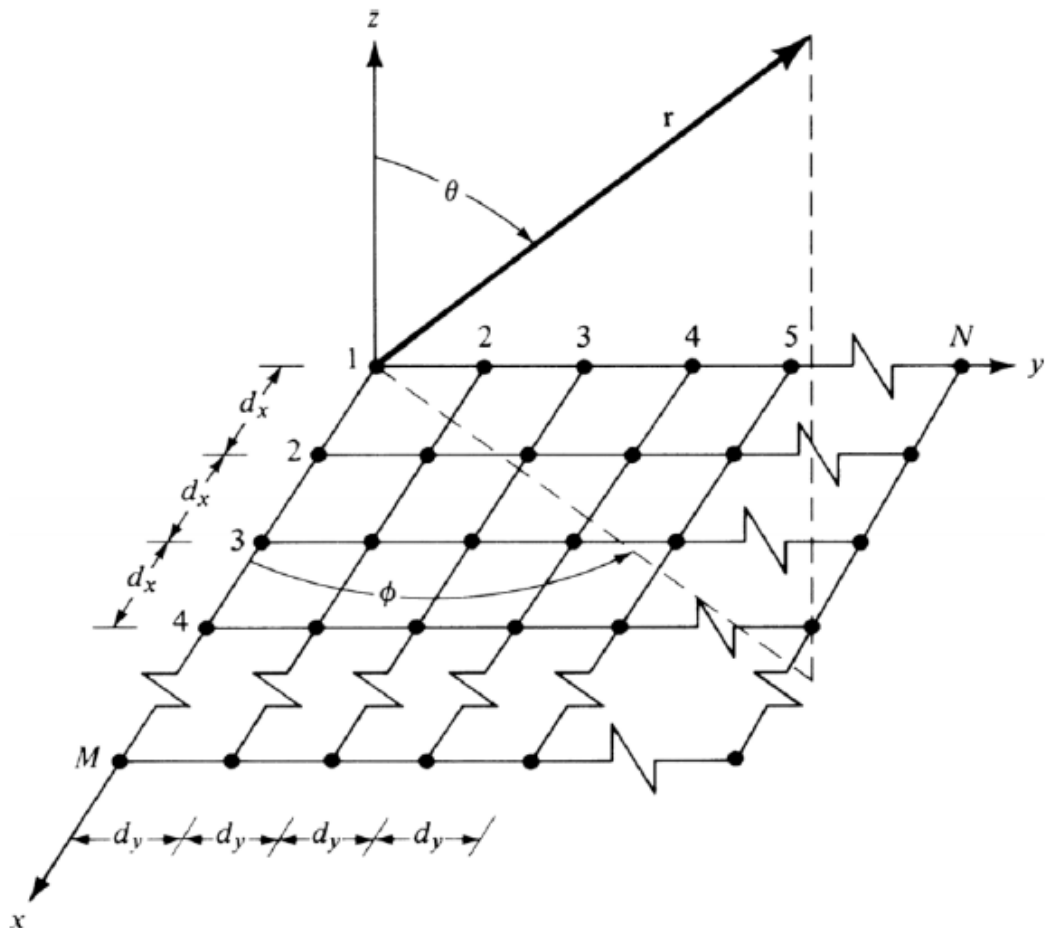
Η μορφοποίηση δέσμης επιτυγχάνεται σε μία γωνία τη φορά, την οποία ορίζει ο χρήστης. Για να επιτύχουμε διαδοχικές στρέψεις του λοβού ακτινοβολίας η φάση και το πλάτος πρέπει να αλλάζουν συνεχώς. Επιπρόσθετα θα αλλάζουν και οι τιμές των phase shifters και των attenuators σύμφωνα με τις DC τάσεις που τροφοδοτούνται. Οι διαδοχικές ηλεκτρονικές στρέψεις της κεραίας, καθιστούν εφικτή την χρήση της ως ραντάρ.



Εικόνα 4.40: Παράδειγμα αναπαράστασης beam forming module με 16 εξόδους για στοιχειοκεραία 4x4. [2]

4.5.2 Μελέτη και αριθμητικό παράδειγμα στρέψης λοβού ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας [31]

Θεωρούμε γραμμική στοιχειοκεραία, που να περιλαμβάνει N στοιχεία ακτινοβολίας στον άξονα x και M στοιχεία ακτινοβολίας στον άξονα y , τοποθετημένα σε διάταξη ορθογωνικού πλέγματος, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό επιπεδικής στοιχειοκεραίας. Με τη συγκεκριμένη διάταξη ο λοβός ακτινοβολίας δύναται να μετακινηθεί σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου.



Εικόνα 4.41: Γεωμετρία επίπεδης στοιχειοκεραίας [31]

Ο παράγοντας συστοιχίας, δεδομένου ότι οι πηγές είναι σημειακές και ιστροπικές, ενώ υπάρχει απομόνωση μεταξύ των τροφοδοτημένων ακτινοβολητών, υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$AF_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\}$$

Κανονικοποιημένη εξίσωση υπολογισμού παράγοντα συστοιχίας

Με τα Ψ_x, Ψ_y να δίνονται από τις σχέσεις:

$$\psi_x = kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x$$

$$\psi_y = kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y$$

Εξισώσεις υπολογισμού Ψ_x, Ψ_y

Προκύπτει ότι τα β_x και β_y υπολογίζονται από τους τύπους:

$$\beta_x = -\frac{2\pi}{\lambda} dx \sin \theta \cos \phi$$

$$\beta_y = -\frac{2\pi}{\lambda} dy \sin \theta \sin \phi$$

Εξισώσεις υπολογισμού β_x, β_y

Τα αριθμητικά δεδομένα του παραδείγματος είναι $\phi=90^\circ, \theta=10^\circ, dx=dy=\lambda/3$. Το αριθμητικό παράδειγμα εφαρμόστηκε δεδομένου της απόστασης $dx=dy=\lambda/3$ που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της στοιχειοκεραίας της παρούσας εργασίας και γωνία αζιμούθιου $\phi=90^\circ$. Η απόσταση $\lambda/3=53.47$ mm, διότι όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, χρησιμοποιείται η χαμηλή συχνότητα συντονισμού έναντι της υψηλής για τη μέγιστη δυνατή απομάκρυνση των στοιχείων ακτινοβολίας.

A/A	ϕ°	θ°	β_x°	β_y°
1	90	0	0	0
2	90	10	0	36.36
3	90	20	0	71.63
4	90	30	0	104.71
5	90	40	0	134.62
6	90	50	0	160.43
7	90	60	0	181.37

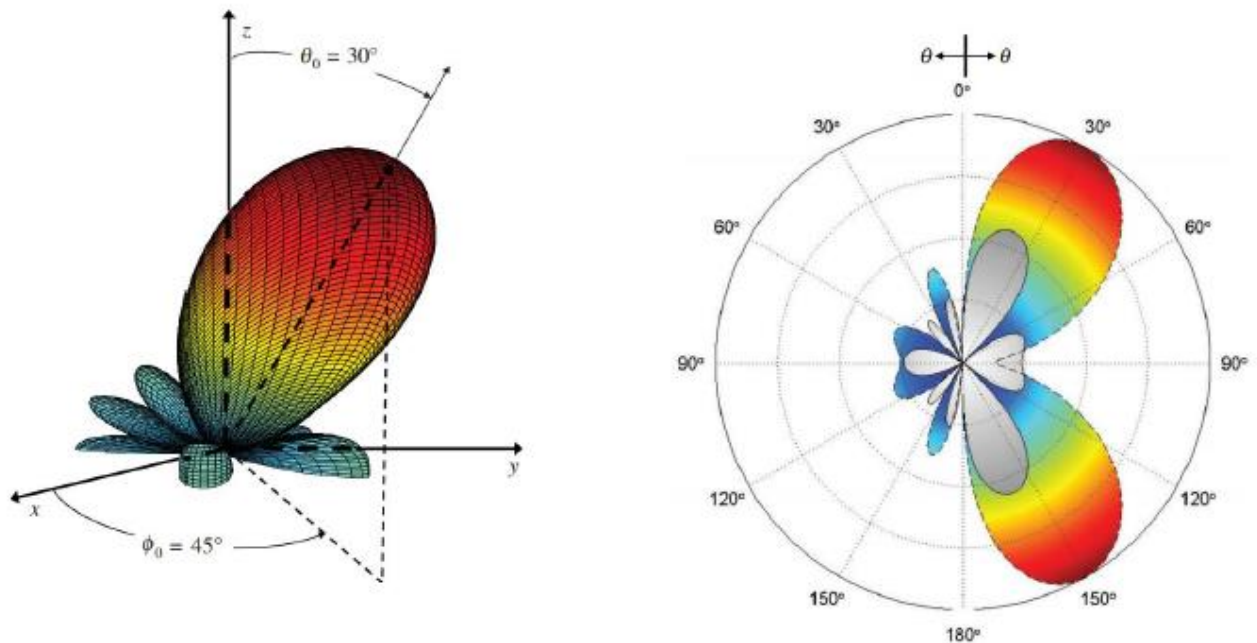
Πίνακας 7: Υπολογισμοί β_x, β_y για ανυψωτική μετακίνηση του λοβού

Η συμμετρία στη γεωμετρία της στοιχειοκεραίας, της προσδίδει τη δυνατότητα σάρωσης του λοβού έως περίπου 37° ανυψωτικά για 90° αζιμούθιο.

Τέλος, υπολογίζεται η διαφορά φάσης β_x και β_y , ώστε η σάρωση του λοβού ακτινοβολίας να μετατοπιστεί αζιμουθιακά και σε γωνία ανύψωσης.

A/A	φ °	θ °	β_x °	β_y °
1	10	10	35.81	6.31
2	20	20	67.31	24.49
3	30	30	90.68	52.35
4	40	40	103.12	86.53
5	50	50	103.12	122.29
6	60	60	90.68	157.07

Πίνακας 8: Υπολογισμοί β_x , β_y για μετατόπιση του λοβού αζιμουθιακά και ανυψωτικά



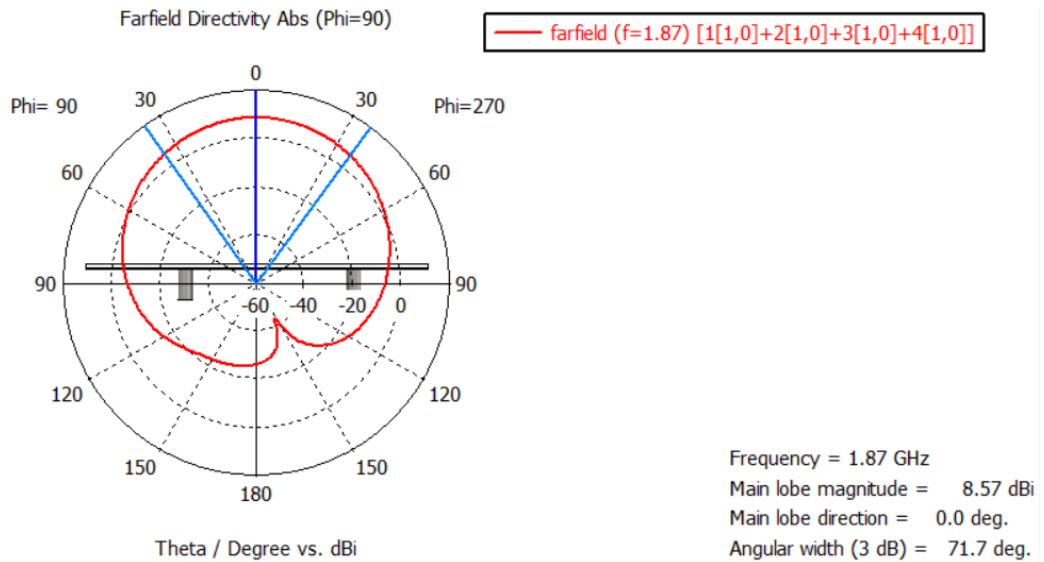
Εικόνα 4.42: Απεικονίσεις διαγραμμάτων επιπεδικής στοιχειοκεραίας στοιχείων σε απόσταση $dx=dy=\lambda/2$ μεταξύ τους, με διέγερση ίσου πλάτους και προοδευτική ολίσθηση φάσης [31]

4.5.3 Στρέψη λοβού ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας

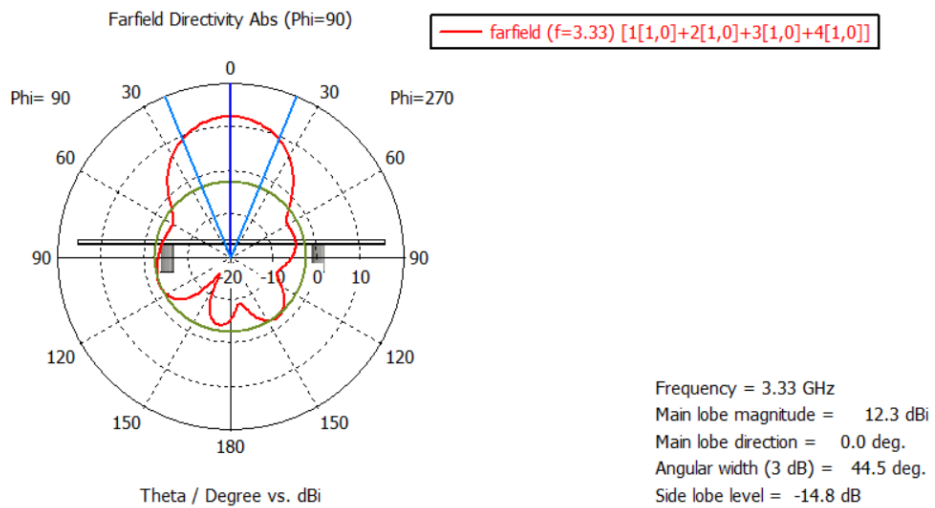
Η στοιχειοκεραία βάσει των μαθηματικών υπολογισμών, δύναται να σαρώσει τον ελεύθερο χώρο έως 24° ανυψωτικά για 90° αζιμούθιο και έως 13° ανυψωτικά για 0° αζιμούθιο

Τα 4 στοιχεία ακτινοβολίας της κεραίας τροφοδοτήθηκαν με διαφορά φάσης της τάξης των 45 ως προς την ανύψωση, ώστε η στοιχειοκεραία να καλύπτει άνοιγμα δέσμης 180° . Παρακάτω στις Εικόνες 4.43,4.44 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας για τις 2 δύο συχνότητες λειτουργίας, όταν όλα τα στοιχεία ακτινοβολίας έχουν την ίδια φάση, ενώ στις επόμενες εικόνες

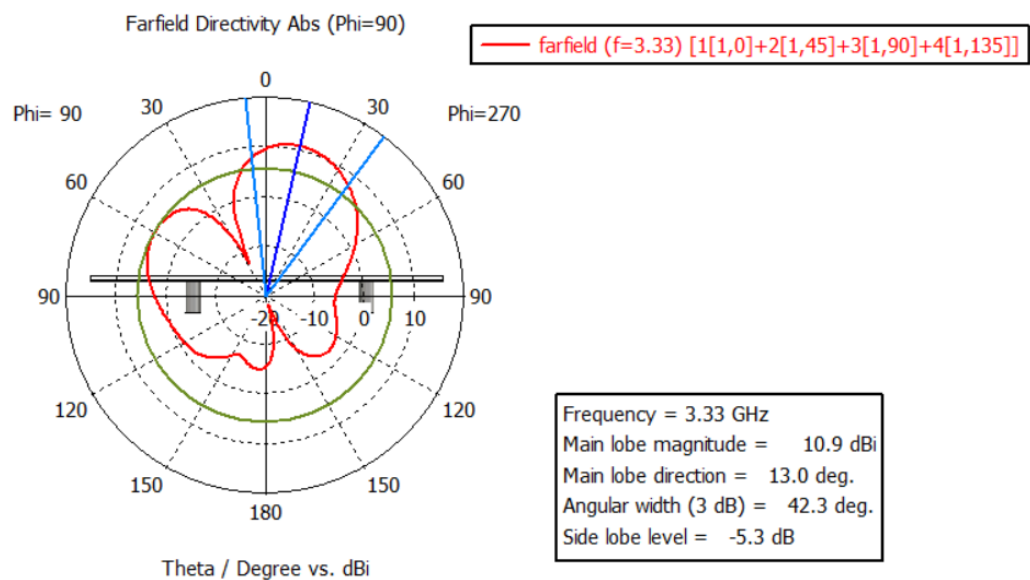
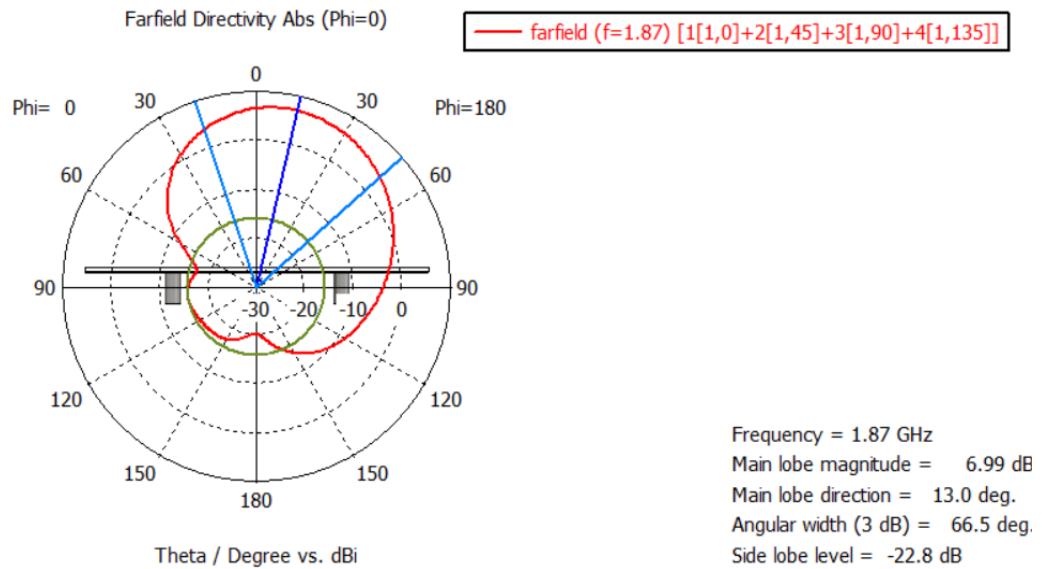
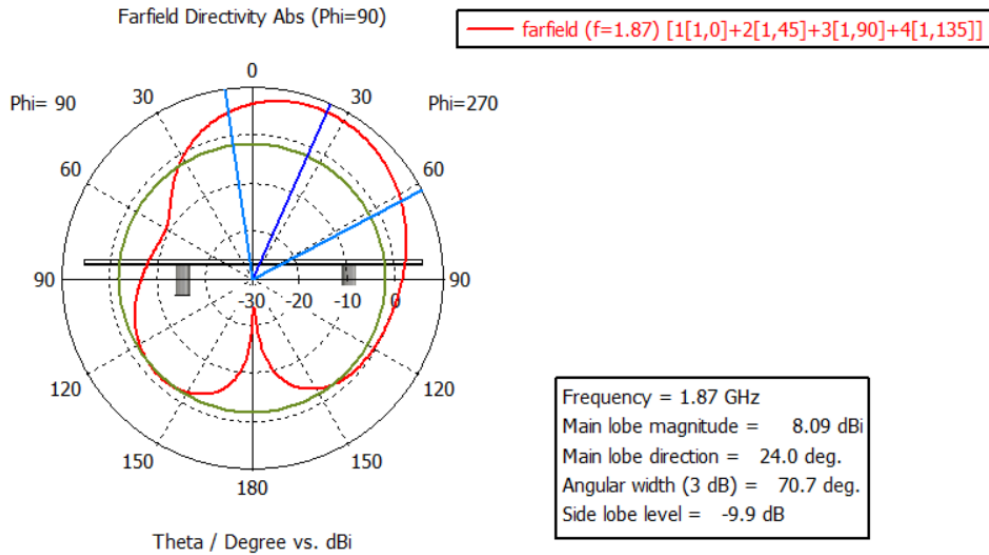
απεικονίζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τροφοδοσία με διαφορά φάσης 45° και -45° για αζιμούθιο $\varphi=90^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.

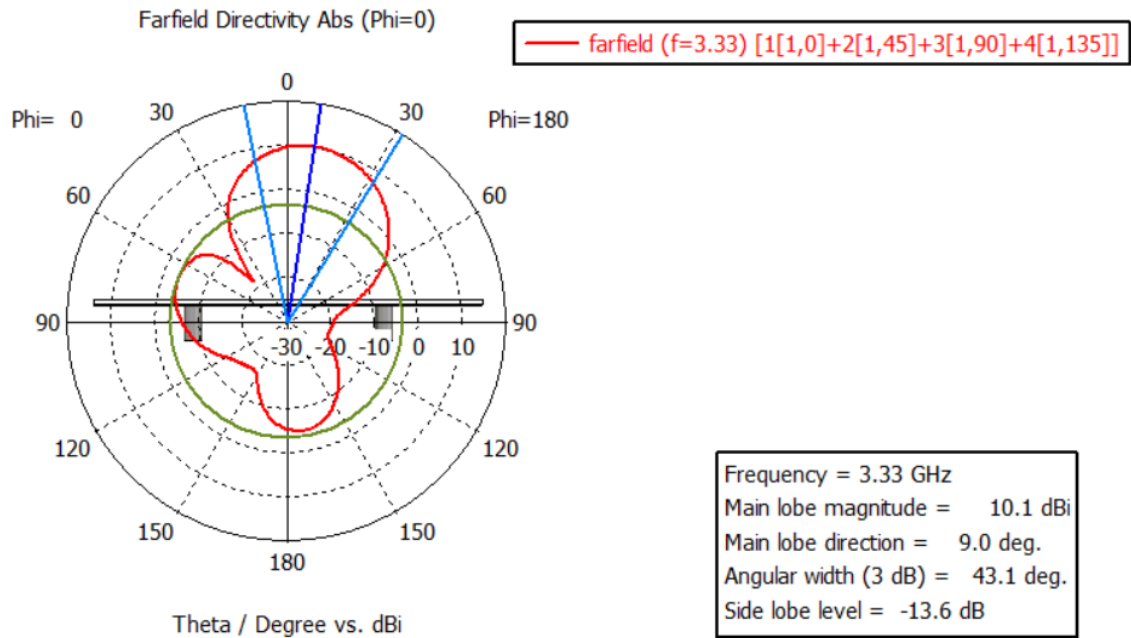


Εικόνα 4.43: Απεικόνιση διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας στη χαμηλή συχνότητα, ενώ όλα τα στοιχεία ακτινοβολίας έχουν την ίδια φάση

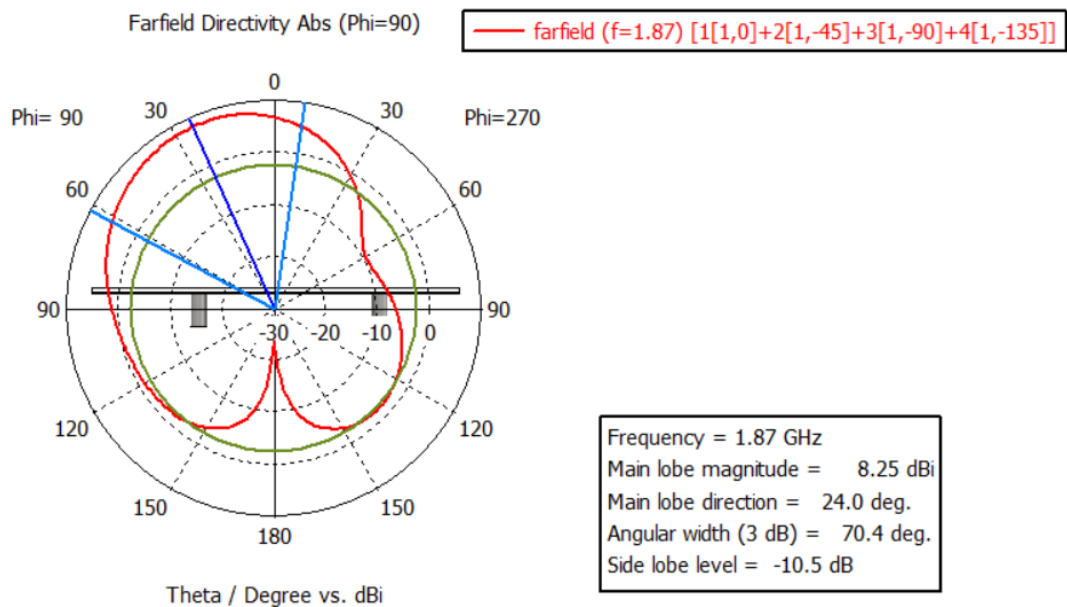


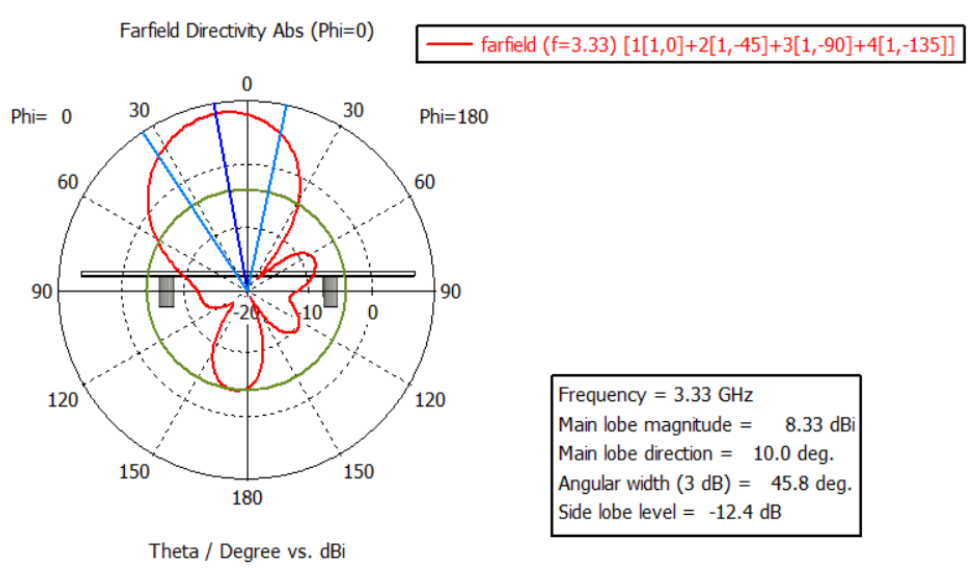
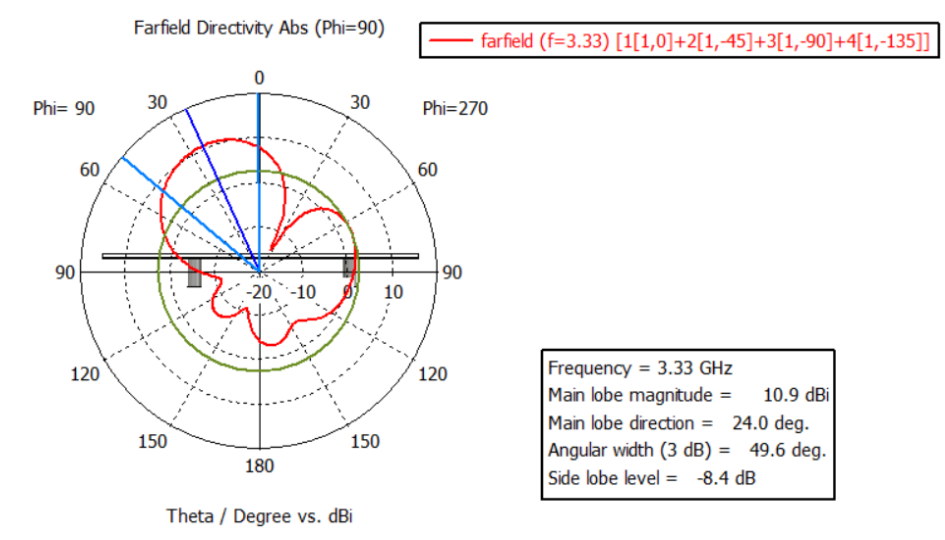
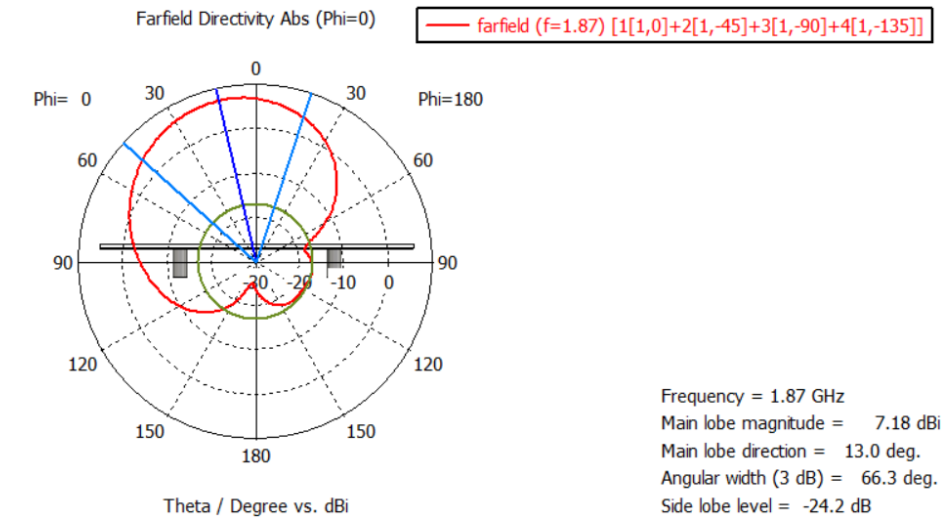
Εικόνα 4.44: Απεικόνιση διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας στη υψηλή συχνότητα, ενώ όλα τα στοιχεία ακτινοβολίας έχουν την ίδια φάση





Εικόνα 4.45: Απεικόνιση διαγραμμάτων ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας στη χαμηλή συχνότητα, ενώ τα στοιχεία ακτινοβολίας παρουσιάζουν διαφορά φάσης 45 μοιρών





Εικόνα 4.46: Απεικόνιση διαγραμμάτων ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας στη υψηλή συχνότητα, ενώ τα στοιχεία ακτινοβολίας παρουσιάζουν διαφορά φάσης -45 μοιρών

Αν παρατηρήσουμε τις παραπάνω εικόνες γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η γωνία θ , μειώνεται το κέρδος της κεραίας σε dBi, κάτι που επαληθεύτηκε και από τους μαθηματικούς υπολογισμούς. Συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μεταξύ της χαμηλής και της υψηλής συχνότητας, αντιλαμβανόμαστε ότι οι διαφορές τους πριν και μετά την περιστροφή του λοβού είναι σχεδόν είναι πολύ μικρές.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ	ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ
- 1.87 GHz		
Main lobe magnitude	8.57 dBi	8.09 dBi
Main lobe direction	0 deg	24 deg
Angular width (3dB)	71.7 dB	70.7 dB
Side lobe lever	-	-9.9 dB

Πίνακας 9: Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας πριν και μετά την περιστροφή του λοβού για την χαμηλή συχνότητα

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ	ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ
- 3.33 GHz		
Main lobe magnitude	12.3 dBi	10.9 dBi
Main lobe direction	0 deg	13.0 deg
Angular width (3dB)	44.5 dB	42.3 dB
Side lobe lever	-14.8 dB	-5.3 dB

Πίνακας 10: Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας πριν και μετά την περιστροφή του λοβού για την υψηλή συχνότητα

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.5 Σύνοψη Μελέτης

Η περάτωση συγγραφής της διπλωματικής εργασίας επισφραγίστηκε έπειτα από την σχεδίαση στοιχειοκεραίας 2x2 και την αναφορά στις τεχνολογίες beam forming και beam steering. Οι συχνότητες λειτουργίας της κεραίας είναι τα 1.87 GHz και 3.33 GHz. Τα στοιχεία ακτινοβολίας στοιχίστηκαν σε ορθογωνική συμμετρία σε απόσταση $\lambda/3$ μεταξύ τους βάσει της χαμηλής συχνότητας. Η εργασία μας συνεισφέρει στην κατανόηση της σημαντικότητας της μελέτης του θεωρητικού υπόβαθρου των κεραιών, αλλά και της άρτιας γνώσης του λογισμικού σχεδίασης. Συνοπτικά, δεν αρκεί η σχεδίαση και τροφοδοσία ενός Η/Μ στοιχείου. Ωστόσο απαιτείται κανείς να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους σχεδίασης, καθώς οποιαδήποτε από αυτές, όταν μεταβληθεί, ενδέχεται να έχει αλυσιδωτές αρνητικές επιδράσεις στη συμπεριφορά άλλων παραγόντων. Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία σχεδίασης μίας κεραίας απαιτεί επιμονή και άφθονο ζήλο, διότι οποιαδήποτε αλλαγή μπορεί να στοιχήσει χρονικά, ενώ παράλληλα να επαναφέρει την διαδικασία της έρευνας στα αρχικά στάδια υλοποίησης της.

4.6 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το αντικείμενο της διπλωματικής δύναται να επεκταθεί με βάσει τις παρακάτω προτάσεις:

- 1) Αύξηση του εύρους ζώνης των δύο συχνοτήτων συντονισμού της κεραίας και λειτουργία της στοιχειοκεραίας σε μεγαλύτερες συχνότητες.
- 2) Οι συχνότητες να ανήκουν σε διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων λειτουργίας.

Η παραπάνω πρόταση στηρίζεται σε πρακτικούς λόγους, που βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στο χώρο της ναυτιλίας:

- a) Ενδεχόμενο βλάβης στο δορυφόρο επικοινωνίας του πλοίου, όπου και ενδέχεται να χρειαστεί η σύνδεση με δορυφόρο άλλης μπάντας για να υπάρχει η απαραίτητη κάλυψη/επικοινωνία μεσοπέλαγα.
 - b) Η αλλαγή γεωγραφικής θέσης του πλοίου. Η νέα θέση καλύπτεται από τη μία μπάντα και όχι απαραίτητα και από τις δύο.
 - c) Η αλλαγή παρόχου συνδεσιμότητας. Ορισμένοι πάροχοι καλύπτουν συχνότητες μιας συγκεκριμένης μπάντας, οπότε η διακοπή συνεργασίας μαζί τους απαιτεί αλλαγή κεραίας, κάτι το οποίο μπορεί να αποφευχθεί με τη συγκεκριμένη λύση.
- 3) Λειτουργία της κεραίας σε περισσότερες από δύο συχνότητες.
 - 4) Προγραμματισμός της κεραίας μέσω κατάλληλου κώδικα, ώστε να μετατραπεί σε smart adaptive.
 - 5) Μέτρηση του δείκτη SAR, ώστε να είναι γνωστή ποσότητα ακτινοβολίας που απορροφάται από ανθρώπινο ή ζωικό σώμα.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] N. C. Athanasopoulos, I. K. Petropoulos, and K. N. Voudouris, “A phased array unit for adaptive backhauling in WiMAX relay networks,” in *2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, 2011, pp. 94–97. doi: 10.1109/ICEAA.2011.6046334.
- [2] K. Voudouris, I. Petropoulos, N. Athanasopoulos, R. Abd-Alhameed, and S. Jones, “Phased Array Antenna Receives 4G Networks,” *Microwaves and Rf*, vol. 51, Nov. 2012.
- [3] X. Quan, R. Li, Y. Cui, and M. M. Tentzeris, “Analysis and Design of a Compact Dual-Band Directional Antenna,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 11, pp. 547–550, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2199458.
- [4] Σουρίλας Γεώργιος, “Σχεδίαση εκτυπωμένων κεραιών MIMO κατάλληλων για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς,” Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2021.
- [5] “RG402 Coax Cable with Copper Outer Conductor.” <https://www.pasternack.com/semirigid-0.141-rg402-50-ohm-coax-cable-copper-rg402-u-bulk-p.aspx> (accessed Aug. 20, 2023).
- [6] “RO4003C™ Laminates.” <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates> (accessed Aug. 20, 2023).
- [7] U. Rafique, H. Khalil, and Saif-Ur-Rehman, “Dual-band microstrip patch antenna array for 5G mobile communications,” in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, 2017, pp. 55–59. doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293110.
- [8] Κοντορινάκης Ευστράτιος, “Διερεύνηση της τεχνολογίας Substrate Integrated Waveguide - SIW για εφαρμογές χαμηλού κόστους σε χιλιοστομετρικές συχνότητες 5G μέσω ευφών κεραιών,” Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2020. Accessed: Aug. 20, 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.26265/polynoe-1031>
- [9] R. Ouali, S. Ghnimi, A. Gharsallah, and T. Razban, “Analysis and Design of a New Dual Band Microstrip Patch Antenna Based on Slot Matching Y-Shaped,” *Journal of Engineering Research*, vol. 11, Jan. 2015, doi: 10.24200/tjer.vol11iss2pp89-97.
- [10] Y. Jandi, F. Gharnati, and A. O. Said, “Design of a compact dual bands patch antenna for 5G applications,” in *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/WITS.2017.7934628.
- [11] M. Teng, S. Yu, and N. Kou, “A Dual-Band Beam-Steering Array Antenna With Integration of Reflectarray and Phased Array,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 22, no. 6, pp. 1241–1245, 2023, doi: 10.1109/LAWP.2023.3237633.
- [12] M. A. Meor Said, S. Jaya, Z. Zakaria, M. Misran, and M. Ismail, “Design of a dual-band antenna for energy harvesting application,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 10, pp. 3265–3273, Dec. 2021, doi: 10.11591/eei.v10i6.3203.
- [13] A. Makalesi, S. Küçükcan, and A. Kaya, “Dual-Band Microstrip Patch Antenna Design for Wi-Fi Applications,” *European Journal of Science and Technology*, pp. 661–664, Mar. 2022, doi: 10.31590/ejosat.1084147).

- [14] J. Saily, A. Lamminen, and J. Francey, “Low cost high gain antenna arrays for 60 GHz millimetre wave identification (MMID),” Aug. 2023.
- [15] M. K. Ishfaq, T. A. Rahman, Y. Yamada, and K. Sakakibara, “8×8 Phased series fed patch antenna array at 28 GHz for 5G mobile base station antennas,” in *2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 2017, pp. 160–162. doi: 10.1109/APWC.2017.8062268.
- [16] M. T. Ali, M. R. Kamarudin, T. Abd Rahman, and R. Sauleau, “Design of reconfigurable multiple elements microstrip linear array antenna,” *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 6, pp. 21–35, Jun. 2009, doi: 10.2528/PIERC08122101.
- [17] Μαρία Δούκα, “Μελέτη βελτιστοποίησης της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ στοιχείων κεραιών MIMO,” Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2020. Accessed: Aug. 20, 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.26265/polynoe-1012>
- [18] David M. Pozar, *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [19] Hubregt J. Visser, *Array and Phased Array Antenna Basics*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [20] David A. Sánchez-Hernández, *Multiband Integrated Antennas for 4G Terminals*. Norwood: ARTECH HOUSE, INC, 2008.
- [21] J. W. Howell, “Microstrip antennas,” *IEEE Trans Antennas Propag*, 1975.
- [22] R. E. Manson, “Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays,” *IEEE Trans Antennas Propag*, 1974.
- [23] Anuj Mehta, “Microstrip Antenna,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, vol. 4, no. 03, Mar. 2015.
- [24] I. Nadeem *et al.*, “A comprehensive survey on ‘Circular Polarized Antennas’ for existing and emerging wireless communication technologies,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 55, Oct. 2021, doi: 10.1088/1361-6463/ac2c36.
- [25] M. T. John D. Kraus, *Radio Astronomy*. New York, 1966.
- [26] R. J. M. John D. Kraus, *Antennas for all applications*. Delhi: Tata McGraw-Hill, 2003.
- [27] Βουγιούκας Δημοσθένης, *Δορυφορικές επικοινωνίες*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015.
- [28] Roshni Y, “Antenna – Need and Parameters.” <https://electronicsdesk.com/antenna.html> (accessed Aug. 19, 2023).
- [29] Hubregt J. Visser, *ANTENNA THEORY AND APPLICATIONS*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [30] Chuck Moozakis, “What is wireless communications? Everything you need to know,” Jan. 2023.
- [31] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [32] RCR Wireless News, “Nextivity 5G strategy: Targeting low and mid-bands to effectively and affordably boost 5G cellular signals indoors,” Jun. 14, 2023. <https://www.rcrwireless.com/20230614/5g/nextivity-5g-strategy-targeting-low-and-mid-bands-to-effectively-and-affordably-boost-5g-cellular-signals-indoors> (accessed Aug. 19, 2023).

- [33] M. Attaran, “The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization,” *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 14, no. 5, pp. 5977–5993, 2023, doi: 10.1007/s12652-020-02521-x.
- [34] «EUROPEAN SPACE AGENCY» Available:
https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Satellite_frequency_bands.
- [35] «Γ. Ιωάννης, «ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΙΜΟ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ,» ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, 2022.
- [36] V. M. G. Medina, R. Z. Syeda και Α. Ε. Omisakin, «Design and Implementation of a 4-element Phased Array Antenna System,» 2016.