

Πτυχιακή εργασία

**Σχεδιασμός, ανάλυση και πειραματική αξιολόγηση κυκλικά
πολωμένης ελικοειδής φασικής στοιχειοκεραίας πολύ
συμπαγούς γεωμετρίας**

Χαράλαμπος Κουσιουμάρη

Λευκωσία, Μάιος 2024

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

Σχεδιασμός, ανάλυση και πειραματική αξιολόγηση κυκλικά
πολωμένης ελικοειδούς φασικής στοιχειοκεραίας πολύ συμπαγούς
γεωμετρίας

Χαράλαμπος Κουσιουμάρη

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Θεμιστοκλής Χαραλάμπους

Λευκωσία, Μάιος 2024

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Όνομα επίθετο φοιτητή, έτος ολοκλήρωσης πτυχιακής

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπων της παρούσας πτυχιακής εργασίας Δρ . Θεμιστοκλής Χαραλάμπους χάρις στον οποίο έγινε εφικτή η υλοποίηση της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης για την αδιαμφησβήτητα καθοριστική καθοδήγηση τον Δρ. Κωνσταντινίδη Αντώνη που μεταλαμπάδευσε πολύτιμες γνώσεις και τεχνικές. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την ψυχολογική στήριξη και την ανοχή που έδειξε απέναντι μου μέχρι την περάτωση του έργου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη σχεδίαση, την ανάπτυξη και την αξιολόγηση της απόδοσης μιας συμπαγούς γεωμετρίας ενεργής φασικής στοιχειοκεραίας ευρείας ζώνης για την παρακολούθηση του υψίσυχνου φάσματος(HF). Οι παραδοσιακές κεραίες HF πολλαπλών στοιχείων υπόκεινται συχνά σε περιορισμούς μεγέθους. Ο λόγος μπρος-πίσω της προτεινόμενης κυκλικά πολωμένης φασικής στοιχειοκεραίας, υπερβαίνει τα 20 dB σε όλο το εύρος λειτουργίας. Αυτή η συστοιχία επιτρέπει την ταυτόχρονη παρακολούθηση κατακόρυφα και οριζόντια πολωμένων σημάτων, προσφέροντας μια πρακτική εναλλακτική λύση έναντι σε μεγαλύτερου φυσικού μεγέθους κεραίες, ιδίως σε περιπτώσεις περιορισμένου διαθέσιμου χώρου. Μέσω του προηγμένου σχεδιασμού ενισχυτή χαμηλού θορύβου, βελτιστοποιείται η απόδοση και το εύρος ζώνης, ενώ παράλληλα μετριάζονται τα φαινόμενα αμοιβαίας σύζευξης. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του διαμορφωτή δέσμης βελτιώνει την απόδοση της συστοιχίας σε σχέση με τις πιο παραδοσιακές προσεγγίσεις σχεδιασμού φασικών στοιχειοκεραίων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών επαληθεύουν την εξαιρετική απόδοση με μέσο αξονικό λόγο 2 dB και υψηλό λόγο μπρος-πίσω ακόμα και πέρα από το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων. Τέλος, αυτή η μελέτη παρέχει πολύτιμα δεδομένα για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη συμπαγούς γεωμετρίας ευρείων φασικών στοιχειοκεραίων, παρέχοντας ταυτόχρονα μια αποτελεσματική λύση για την παρακολούθηση παρεμβολών HF.

Λέξεις κλειδιά: Ενισχυτές, Κεραίες, Διαμορφωτής Δέσμης, Ισχύς, Τρανζίστορ.

ABSTRACT

This work presents the design, development, and performance evaluation of a compact wide-band phased array active helical antenna for monitoring HF interference.

Traditional multi-element HF antenna designs are often subjected to size restrictions. The front-to-back ratio of the proposed circularly polarized phased array exceeds 20 dB across the operating range. This array enables simultaneous monitoring of vertically and horizontally polarized signals, offering a practical alternative to larger antennas, particularly in space-constrained scenarios. Through advanced low-noise amplifier design, efficiency and bandwidth are optimized while mitigating mutual coupling effects. Optimal beamformer design enhances array performance with respect to more traditional array design approaches. Test results verify exceptional performance with an average axial ratio of 2 dB and high front-to-back ratio beyond the desired frequency range. This study offers valuable insights into the design and deployment of compact wideband phased array antennas, providing an effective solution for monitoring HF interference.

Keywords: Amplifiers, Antennas, Beam formers, Power, Transistors.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ιστορική Αναδρομή	2
1.1.1	Ελικοειδής κεραίες.....	3
1.1.2	Οι φασματικές συμβολές	4
1.1.3	Βασικές αρχές ενεργών κεραιών	5
2	Ζητήματα σχεδιασμού της ελικοειδούς κεραίας κανονικής λειτουργίας	7
2.1	Σχεδιασμός και υλοποίηση LNA	13
2.2	Δοκιμή της ενεργής ελικοειδούς κεραίας σε πραγματικές συνθήκες	18
2.3	Βελτίωση των επιδόσεων της ενεργής ελικοειδούς κεραίας σε σχέση με το δίπολο μισού κύματος.....	20
2.4	Δοκιμή της NMHA σε σχέση με μια ενεργή κεραία διπλής πόλωσης (HE016) της Rohde & Schwarz.....	21
3	Αρχές σχεδιασμού της ελικοειδούς φασικής στοιχειοκεραίας	26
3.1	Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του διαμορφωτή δέσμης	30
3.2	Αξιολόγηση της απόδοσης του διαμορφωτή δέσμης 2.1.....	33
3.3	Τελική αξιολόγηση της ελικοειδούς φασικής συστοιχίας	36
4	Συμπερασματικές παρατηρήσεις	40

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τιμές σύνθετης αντίστασης εισόδου του ενισχυτή κοινού απαγωγού..... 15

Πίνακας 2: Δεδομένα προσομοίωσης του λογισμικού Multisim με βάση την πραγματική σύνθετη αντίσταση της ελικοειδούς κεραίας..... 18

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Η υπό δοκιμή ελικοειδής κεραία κανονικής λειτουργίας.....	9
Διάγραμμα 2: Το διάγραμμα ακτινοβολίας της ελικοειδούς κεραίας.....	10
Διάγραμμα 3 : Η εξασθένιση της αναντιστοιχίας φορτίου της ελικοειδούς κεραίας.....	11
Διάγραμμα 4: Η μετρούμενη σύνθετη αντίσταση της ελικοειδής κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 20 έως 30 MHz.....	12
Διάγραμμα 5: Κύκλωμα ενισχυτή χαμηλού θορύβου δύο σταδίων και υψηλής αντίστασης εισόδου.....	14
Διάγραμμα 6: Το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή κοινού συλλέκτη.....	14
Διάγραμμα 7: Η σύνθετη αντίσταση εισόδου του ενισχυτή κοινού απαγωγού.....	16
Διάγραμμα 8: Η σύνθετη αντίσταση εισόδου του ενισχυτή κοινής απαγωγής μετά την εξουδετέρωση των παρασιτικών χωρητικότητων εισόδου.....	17
Διάγραμμα 9: Τα αποτελέσματα του αναλυτή φάσματος της ελικοειδούς κεραίας σε πραγματικές συνθήκες.....	20
Διάγραμμα 10: Αποτελέσματα του αναλυτή φάσματος της ελικοειδούς κεραίας σε σχέση με το δίπολο μισού κύματος.....	21
Διάγραμμα 11: Η κεραία HE016 υπό δοκιμή.....	22
Διάγραμμα 12: Ο ψηφιακός δέκτης HF EM510.....	22
Διάγραμμα 13: Κάθετα πολωμένη ελικοειδής κεραία υπό δοκιμή.....	23
Διάγραμμα 14: Οριζόντια πολωμένη ελικοειδής κεραία υπό δοκιμή.....	23
Διάγραμμα 15: Φάσμα κάθετα πολωμένης HE016.....	24
Διάγραμμα 16: Φάσμα κάθετα πολωμένης ελικοειδής κεραίας.....	24
Διάγραμμα 17: Φάσμα οριζόντιας πολωμένης HE016.....	25
Διάγραμμα 18: Φάσμα οριζόντιας πολωμένης ελικοειδής κεραίας.....	25
Διάγραμμα 19: Η διάταξη των ελικοειδών κεραιών.....	26
Διάγραμμα 20: Διάγραμμα ακτινοβολίας δύο ελικοειδών κεραιών τοποθετημένων σε απόσταση $\lambda/8$ μεταξύ τους και με διαφορά φάσης 135°	28

Διάγραμμα 21: Το διάγραμμα ακτινοβολίας ελικοειδούς συστοιχίας στα 25MHz με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης EZNEC.....	29
Διάγραμμα 22:Προσομοίωση λογισμικού EZNEC στα 15 MHz, στα 20 MHz και στα 30 MHz	29
Διάγραμμα 23:Η σχέση φάσης μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών	31
Διάγραμμα 24:Το κυκλωματικό διάγραμμα του διαμορφωτή δέσμης.	32
Διάγραμμα 25:Διάταξη δοκιμής	33
Διάγραμμα 26: Όργανα μέτρησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής.....	34
Διάγραμμα 27: Η διαφορά φάσης των δύο ελικοειδών κεραιών υπό ιδανικές συνθήκες.	35
Διάγραμμα 28: Το πλάτος της φασικής στοιχειοκεραίας προς τα εμπρός(μπλε) και προς τα πίσω(πορτοκαλί)	35
Διάγραμμα 29: Λόγος μπρος-πίσω της φασικής στοιχειοκεραίας σε ιδανικές συνθήκες.	36
Διάγραμμα 30: Ελικώδης φασική στοιχειοκεραία υπό δοκιμή με κάθετη πόλωση	37
Διάγραμμα 31: : Ελικώδης φασική στοιχειοκεραία υπό δοκιμή με οριζόντια πόλωση .	37
Διάγραμμα 32: Παρακολούθηση σημάτων HF από την ελικοειδής φασική στοιχειοκεραία στον αέρα με τη χρήση του Tiny SA Ultra.....	38
Διάγραμμα 33: Μετρήσεις πλάτους της Φασική στοιχειοκεραία δοκιμασμένη σε κάθετη διάταξη.	38
Διάγραμμα 34: Μετρήσεις πλάτους της Φασική στοιχειοκεραία δοκιμασμένη σε κάθετη διάταξη.	39
Διάγραμμα 35: Η απόκριση του αξονικού λόγου της φασικής στοιχειοκεραίας	39
Διάγραμμα 36: Η απόκριση του λόγου μπρος-πίσω της φασικής στοιχειοκεραίας.	40

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

LNA: Low Noise Amplifier

AESA: Active Electronically Scanned Array

MIC: Microwave Integrated Circuit

MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit

PA: Power Amplifier

IoT: Internet of Things

NMHA: Normal Mode Helical Antenna

HF: High Frequency

AR: Axial Ratio

SNR: Signal to Noise Ratio

1 Εισαγωγή

Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια φασική στοιχειοκεραία συμπαγούς γεωμετρίας κυκλικής πόλωσης, με υψηλό λόγο μπρος-πίσω και ευαισθησία προσαρμοσμένη για τη λήψη του φάσματος των βραχέων κυμάτων. Στον τομέα των κεραιών λήψης, ο λόγος μπρος-πίσω έχει πρωταρχική σημασία, ιδιαίτερα όταν λαμβάνονται πολλά σήματα από διαφορετικές κατευθύνσεις. Η χρήση παραδοσιακών κατευθυντικών κεραιών για τη λήψη των βραχέων κυμάτων δεν αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για τη μείωση των παρεμβολών[2]. Ειδικότερα, οι λογαριθμικές κεραιές ή οι κεραιές τύπου Yagi-Uda, που χρησιμοποιούνται ευρέως για τη λήψη των βραχέων κυμάτων, αποτελούνται από στοιχεία μεγάλου μεγέθους, καθιστώντας την κατασκευή τους όχι μόνο δαπανηρή αλλά και ογκώδη, καταλαμβάνοντας πολύ χώρο στα σημεία εγκατάστασής τους. Ως εκ τούτου, οι εν λόγω κεραιές κυκλικής πόλωσης σπανίως χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις των βραχέων κυμάτων λόγω των μεγάλων διαστάσεών τους, αφού αποτελούνται από μεγάλο μήκος κατακόρυφα και οριζόντια στοιχεία. Η φασική στοιχειοκεραία που περιγράφεται σε αυτή την εργασία αποτελείται από δύο ελικοειδείς κεραιές εξαιρετικά μικρών διαστάσεων και βάρους, καθεμία ύψους 0.05λ, τοποθετημένες η μία απέναντι από την άλλη και σε απόσταση λ/8. Αυτή η πολύ μικρή φασική στοιχειοκεραία λειτουργεί σε όλο το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων με λόγο μπρος-πίσω που υπερβαίνει τα 20 dB. Αυτού του είδους στοιχειοκεραία επιτρέπει την ταυτόχρονη λήψη σε κατακόρυφα και οριζόντια πολωμένα σήματα, και αποτελεί εναλλακτική λύση σε σχέση με τις υπέρογκες κατευθυντικές κεραιές, σε συνθήκες περιορισμένου χώρου εγκατάστασης."

Αυτός ο συμπαγής γεωμετρίας και ελαφρύς σχεδιασμός, σε σύγκριση με την παραδοσιακή φασική στοιχειοκεραία ενός τέταρτου κύματος, προσφέρει μια εναλλακτική λύση τόσο για σταθερή όσο και για κινητή κεραία με πολύ καλές επιδόσεις.

Συνεχίζοντας, ένας από τους κύριους στόχους αυτού του έργου ήταν να μεγιστοποιηθεί ο λόγος μπρος-πίσω της φασικής στοιχειοκεραίας σε όλες τις επιθυμητές συχνότητες, διατηρώντας ένα συμπαγής γεωμετρίας σχεδιασμό. Έτσι τα δύο ενεργά στοιχεία της φασικής στοιχειοκεραίας υλοποιήθηκαν στην κανονική λειτουργία της ελικοειδούς κεραιάς με εξαιρετικά μικρό μέγεθος, πιο συγκεκριμένα στα 0,05λ στα 25 MHz. Αυτού

του είδους κεραίες, κυκλικής πόλωσης, διευκολύνουν την ταυτόχρονη λήψη κατακόρυφα και οριζόντια πολωμένων σημάτων[3].

Για την επίτευξη των πιο πάνω εισάχθηκε βαθμίδα ενίσχυσης χαμηλού θορύβου (LNA) σε κάθε ενεργή ελικοειδή κεραία όπου και βελτιστοποιήθηκε για την καλύτερη απόδοση στο εύρος λειτουργίας του συστήματος με την εξάλειψη των παρασιτικών θορύβων του ενισχυτή JFET, ο οποίος αποτελεί το πρώτο στάδιο του LNA. Επιπλέον, η εξαιρετικά υψηλή αντίσταση εισόδου των LNA διασφαλίζει την απομόνωση των δύο ελικοειδών κεραιών από την αμοιβαία σύζευξη[4], εξασφαλίζοντας ισορροπημένη απολαβή και φάση κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Τέλος, ο διαμορφωτής ακτινοβολίας της φασικής στοιχειοκεραίας, σχεδιάστηκε έτσι ώστε η διαφορά φάσης των δύο ελικοειδών κεραιών να είναι ανάλογη με το μήκος κύματος της απόστασης μεταξύ τους σε κάθε λειτουργική συχνότητα, με τρόπο που να μεγιστοποιείται ο λόγος μπρος-πίσω. Με την ενσωμάτωση του διαμορφωτή ακτινοβολίας στο σύστημα, η απόσταση μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών μειώθηκε σε $\lambda/8$ από $\lambda/4$, δηλαδή στην μισή απόσταση σε σχέση με την παραδοσιακή φασική στοιχειοκεραία δύο στοιχείων $\lambda/4$ με τροφοδοσία διαφοράς φάσης 90° .

Συνοψίζοντας όσο αφορά το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας, στην Ενότητα 2, αναλύουμε τον σχεδιασμό, τα αποτελέσματα δοκιμών και την αξιολόγηση της Ελικοειδούς Κεραίας Κανονικής Λειτουργίας. Στην Ενότητα 3, αναλύουμε την ανάπτυξη της φασικής ελικοειδής στοιχειοκεραίας καθώς και το σχεδιασμό του διαμορφωτή δέσμης, όπου και παρέχουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών. Τέλος, στην Ενότητα 4, παραθέτουμε τα τελικά αποτελέσματα δοκιμών του συστήματος.

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Οι ελικοειδής κεραίες κανονικής λειτουργίας χαρακτηρίζονται από την ελικοειδή δομή τους, η οποία αποτελείται από μία ή περισσότερες στροφές κατά μήκος του άξονα της κεραίας[3]. Τέτοιου είδους κεραίες εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα όταν διεγείρονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας ελικοειδούς

κεραίας κανονικής λειτουργίας εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της γωνίας κλίσης, της διαμέτρου και του μήκους της έλικας.

Οι πρώτες έρευνες στον τομέα των ελικοειδούς κεραιών κανονικής λειτουργίας επικεντρώθηκαν στην κατανόηση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς των δομών τους. Σημαντικές συνεισφορές περιλαμβάνουν το έργο των J. D. Kraus και R. J. Marhefka[3], οι οποίοι ανέπτυξαν θεωρητικά μοντέλα για την ανάλυση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας των κεραιών ελικοειδούς λειτουργίας[3]. Αυτά τα θεωρητικά πλαίσια έθεσαν τις βάσεις για περαιτέρω προηγμένες εξελίξεις στον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των ελικοειδούς κεραιών.

1.1.1 Ελικοειδής κεραιές.

Η ιστορία των ελικοειδών κεραιών κανονικής λειτουργίας χρονολογείται από τις αρχές του 20ού αιώνα, με τον πρωτοποριακό έργο ερευνητών όπως ο John D. Kraus και ο Nathan Cohen. Το βιβλίο του Kraus "Antennas", που δημοσιεύτηκε το 1950, παρείχε μια σφαιρική επισκόπηση ελικοειδών κεραιών κανονικής λειτουργίας και των εφαρμογών τους. Κατά το πέρασμα του χρόνου, οι προηγμένες τεχνικές κατασκευής, οι τεχνικές σχεδιασμού και οι διάφορες μεθοδολογίες συνείσφεραν στην ανάπτυξη υψηλών επιδόσεων ελικοειδών κεραιών.

Οι πρόσφατες προηγμένες εξελίξεις στον τομέα των ελικοειδών κεραιών κανονικής λειτουργίας έχουν επικεντρωθεί στη βελτίωση της απόδοσής τους, του εύρους ζώνης και της αποδοτικότητάς τους. Μέσα από αυτές τις εξελίξεις έχουν εισαχθεί νέα υλικά, όπως μετα-υλικά και σύνθετες δομές, που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραιών αυτών. Επιπλέον, οι προηγμένες τεχνικές προσομοίωσης και βελτιστοποίησης έχουν επιτρέψει τον σχεδιασμό ελικοειδών κεραιών κανονικής λειτουργίας με εξατομικευμένα διαγράμματα ακτινοβολίας[5].

Επιπλέον, η ανάπτυξη άλλων τεχνολογιών, όπως οι φασματικές συμβολές και τα μετα-υλικά, έχει επεκτείνει τις δυνατότητες και τις εφαρμογές των αυτών των κεραιών. Με αυτές τις προηγμένες εξελίξεις έχουν ανοίξει νέοι δρόμοι για την ανάπτυξη ελικοειδών κεραιών κανονικής λειτουργίας σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των επικοινωνιών μέσω δορυφόρων, της ραδιοαστρονομίας, της απομακρυσμένης ανίχνευσης και των ασύρματων δικτύων.

Συνεχίζοντας, οι ελικοειδείς κεραίες κανονικής λειτουργίας έχουν εφαρμογές σε μια ευρεία γκάμα συστημάτων λόγω του συμπαγούς μεγέθους τους, του πανκατεύθυντικού διαγράμματος ακτινοβολίας τους και της κυκλικής πόλωσης[6]. Ορισμένες κοινές εφαρμογές περιλαμβάνουν, επικοινωνία μέσω δορυφόρων για τη μετάδοση και λήψη σημάτων προς και από γήινους σταθμούς, Ραδιοαστρονομία για την παρατήρηση ουράνιων αντικειμένων και τη μελέτη κοσμικών φαινομένων, συστήματα RFID για την παρακολούθηση και αναγνώριση αντικειμένων, διαχείριση αποθεμάτων και παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων κλπ..

1.1.2 Οι φασματικές συμβολές

Οι φασματικές συμβολές αποτελούν σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία των κεραιών, προσφέροντας ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε διάφορες εφαρμογές. Οι φασματικές συμβολές αποτελούνται από πολλαπλά στοιχεία (κεραίες) που ελέγχονται ατομικά για να παράγουν τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας. Ρυθμίζοντας τη φάση και την ένταση των σημάτων που τροφοδοτούν κάθε στοιχείο, οι φασματικές συμβολές μπορούν να κατευθύνουν τη δέσμη ηλεκτρονικά χωρίς να απαιτείται η φυσική μετακίνηση της κεραίας[7]. Με αυτό τον τρόπο επιτράπηκε ταχεία μετακίνηση της δέσμης ακτινοβολίας η δυνατότητα διαρρύθμισης του επιθυμητού διαγράμματος της δέσμης ακτινοβολίας, καθιστώντας έτσι τις φασματικές συμβολές κατάλληλες για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών.

Η βασική αρχή πίσω από τις φασματικές συμβολές βασίζεται στη κυματική αντίθεση. Ρυθμίζοντας τη φάση και την ένταση των σημάτων, μπορεί να επιτευχθεί είτε υπέρθεση είτε καταστροφική αντίθεση, με αποτέλεσμα την ικανότητα προσαρμογής του διαγράμματος ακτινοβολίας. Η κατεύθυνση της δέσμης καθορίζεται από την σχέση φάσης μεταξύ των γειτονικών στοιχείων, ενώ η ένταση καθορίζει το πλάτος της δέσμης και τα επίπεδα των πλευρικών λοβών[8].

Η ιστορία των φασματικών συμβολών χρονολογείται από τις αρχές του 20ού αιώνα, με τις πρώτες εξελίξεις σε συστήματα ραντάρ κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Σημαντικές συνεισφορές περιλαμβάνουν το έργο ερευνητών όπως ο John R. Carson, ο οποίος πρότεινε την έννοια των φασματικών συμβολών για εφαρμογές ραντάρ. Κατά το πέρασμα των ετών, η εξέλιξη των ημιαγωγών, όπως οι μετασχηματιστές φάσης και οι ενισχυτές, επέτρεψαν την κατασκευή συμπαγούς γεωμετρίας και μικρού βάρους

φασματικών στοιχειοκεραίων. Επιπλέον, οι προηγμένες τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος έχουν διευκολύνει την προσαρμοστικότητα του σχηματισμού της δέσμης ακτινοβολίας, την κατεύθυνση της δέσμης ακτινοβολίας και την ακύρωση παρεμβολών σε σύγχρονα συστήματα φασματικών συμβολών.

Συνεχίζοντας, οι πρόσφατες προηγμένες εξελίξεις στις φασματικές συμβολές έχουν επικεντρωθεί στη βελτίωση της απόδοσής τους και της ενσωμάτωσής τους με άλλες τεχνολογίες. Οι έρευνες έχουν εξετάσει νέες αρχιτεκτονικές κεραιών, όπως τα ενεργά ηλεκτρονικά συστήματα σάρωσης συχνότητας (AESAs) και τα ψηφιακά συστήματα διαμόρφωσης δέσμης, τα οποία προσφέρουν βελτιωμένη ευελιξία στην προσαρμοστικότητά της δέσμης ακτινοβολίας, υψηλότερες ικανότητες χειρισμού ισχύος και μειωμένα επίπεδα πλευρικών λοβών[9].

Επιπλέον, οι προηγμένες εξελίξεις στα υλικά, όπως τα μετα-υλικά και τα προσαρμόσιμα διηλεκτρικά, έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη επαναπροσδιορισμών φασματικών συμβολών με δυναμικά χαρακτηριστικά διαμόρφωσης δέσμης ακτινοβολίας. Αυτές οι προηγμένες εξελίξεις έχουν επεκτείνει τις εφαρμογές των φασματικών συμβολών πέρα από τα παραδοσιακά συστήματα ραντάρ και επικοινωνίας όπως τα ασύρματα δίκτυα, οι επικοινωνίες δορυφόρων και η αυτόνομη οδήγηση, συστήματα ραντάρ για τον έλεγχο της αεροπορικής κυκλοφορίας, την παρακολούθηση του καιρού, την επιτήρηση και τη στρατιωτική άμυνα. Ακόμη βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα επικοινωνιών όπου οι φασματικές συμβολές χρησιμοποιούνται σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, σε τερματικά επικοινωνίας μέσω δορυφόρου και κινητές βάσεις για την παροχή υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και σύνδεσης. Τέλος, οι φασματικές συμβολές εφαρμόζονται σε συστήματα αεροδιαστημικής και άμυνας όπου μέσω αεροσκαφών, διαστημόπλοιων και πυραύλων αξιοποιούνται για την παρακολούθηση στόχων, την πλοήγηση και ηλεκτρονικού πολέμου.

1.1.3 Βασικές αρχές ενεργών κεραιών

Οι ενεργές κεραιές είναι κεραιές που αξιοποιούν ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως ενισχυτές, ταλαντωτές και διακόπτες, στη δομή της κεραιάς. Αυτά τα εξαρτήματα παρέχουν ενεργό έλεγχο των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας της κεραιάς, επιτρέποντας τη παραμετροποίηση της δέσμης ακτινοβολίας, τον ηλεκτρονικό της έλεγχο και την προσαρμογή του διαγράμματος ακτινοβολίας. Με την ενσωμάτωση ενεργών

ηλεκτρονικών, οι ενεργές κεραίες μπορούν να ξεπεράσουν τους περιορισμούς που παρουσιάζουν οι παθητικές κεραίες, όπως το χαμηλό κέρδος, το στενό εύρος ζώνης και υψηλό θόρυβο[11].

Η βασική αρχή πίσω από τις ενεργές κεραίες βασίζεται στο δίδυμο κεραίας-κυκλώματος, όπου η κεραία και τα σχετικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα συνεργάζονται για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων. Οι ενεργές κεραίες χρησιμοποιούν μηχανισμούς ελέγχου ανάδρασης για να προσαρμόσουν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους σε πραγματικό χρόνο βάση των συνθηκών του περιβάλλοντος, της ποιότητας του σήματος και των απαιτήσεων του χρήστη [12].

Η ιστορία των ενεργών κεραίων μπορεί να εντοπιστεί στα μέσα του 20ού αιώνα, με πρώιμες εξελίξεις σε ολοκληρωμένα κυκλώματα μικροκυμάτων (MICs) και μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα μικροκυμάτων (MMICs). Σημαντικές συνεισφορές περιλαμβάνουν το έργο ερευνητών όπως ο Arthur A. Collins, ο οποίος ξεκίνησε την ανάπτυξη ενεργών κεραίων για συστήματα ραντάρ και επικοινωνίας[10].

Οι προηγμένες στον τομέα ημιαγωγών συσκευές, όπως οι συσκευές πυριτίου-γερμανίου (SiGe) και νιτριδίου του γαλλίου (GaN), έχουν επιτρέψει την ενσωμάτωση ενεργών στοιχείων, όπως ενισχυτές χαμηλού θορύβου (LNAs) και ενισχυτές ισχύος (PAs), στη δομή των κεραίων[13]. Επιπλέον, οι προηγμένες στον τομέα τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων έχουν βελτιώσει την ικανότητα ακύρωσης παρεμβολών.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στις ενεργές κεραίες έχουν επικεντρωθεί στη βελτίωση της απόδοσής τους, της αποδοτικότητάς τους και της ενσωμάτωσής τους με άλλες τεχνολογίες. Οι έρευνες έχουν εστιάσει σε νέες αρχιτεκτονικές κεραίων, οι οποίες προσφέρουν βελτιωμένη ευελιξία στο σχηματισμό της δέσμης ακτινοβολίας, αυξημένες ικανότητες χειρισμού ισχύος και μειωμένα επίπεδα πλευρικών λοβών.

Επιπλέον, οι προηγμένες εξελίξεις στην τεχνολογία υλικών, , έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη επαναπροσδιορίσιμων ενεργών κεραίων με δυναμικά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Έτσι οι εφαρμογές των ενεργών κεραίων επεκτάθηκαν πέρα από τα παραδοσιακά συστήματα ραντάρ και επικοινωνίας και πλέον συμπεριλαμβάνουν πεδία όπως τα ασύρματα δίκτυα, η επικοινωνία με δορυφόρους και οι συσκευές Internet of Things (IoT)[14].

Οι ενεργές κεραίες βρίσκουν εφαρμογές σε μια ευρεία γκάμα συστημάτων λόγω της ευελιξίας, της προσαρμοστικότητας και της απόδοσής τους. Ορισμένες κοινές εφαρμογές περιλαμβάνουν συστήματα ραντάρ όπου οι ενεργές κεραίες χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση στόχων, σε συστήματα επικοινωνιών όπως τερματικά επικοινωνίας μέσω δορυφόρου και κινητούς σταθμούς βάσης για την παροχή υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και συνδεσιμότητας. Επιπλέον, οι ενεργές κεραίες βρίσκουν εφαρμογή σε ραντάρ αυτοκινήτων για την αποφυγή συγκρούσεων, τον έλεγχο ταχύτητας και την αυτόνομη οδήγηση. Τέλος, οι ενεργές κεραίες χρησιμοποιούνται σε συσκευές IoT, όπως έξυπνοι αισθητήρες και φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, για ασύρματη συνδεσιμότητα και μετάδοση δεδομένων[14].

Κλείνοντας, οι ενεργές κεραίες αποτελούν μια τεχνολογία με εφαρμογές που εκτείνονται σε πολλούς και διάφορους κλάδους. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στην τεχνολογία των ενεργών κεραιών αναμένεται να βελτιώσει περαιτέρω την απόδοσή τους, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες στις τεχνολογίες της εποχής όπως τα ραντάρ, τις τεχνολογίες επικοινωνίας και στους σύγχρονους αισθητήρες[15].

Τέλος, οι ελικοειδείς κεραίες κανονικής λειτουργίας έχουν εξελιχθεί σημαντικά, οδηγώντας την υιοθέτησή τους από ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα αναμένεται να βελτιώσει περαιτέρω την απόδοση, και τις δυνατότητες των ελικοειδούς κεραιών, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

2 Ζητήματα σχεδιασμού της ελικοειδούς κεραίας κανονικής λειτουργίας

Επιλέχθηκε μια ελικοειδής κεραία κανονικής λειτουργίας (NMHA) λόγω του ότι λειτουργεί ως κυκλικά πολωμένη πανκατευθυντική κεραία, προσφέρει το μικρότερο φυσικό μέγεθος σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο οδηγούμενο στοιχείο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη ζώνη HF [6]. Η ευαισθησία πόλωσης, της ελικοειδούς κεραίας βασίζεται στις διαστάσεις της σύμφωνα με την εξίσωση 1 παρακάτω [6]:

$$C_{\lambda} = \sqrt{2S_{\lambda}} \quad (1)$$

Όπου:

C_λ : η περιφέρεια της έλικας σε μήκος κύματος.

S_λ : η απόσταση μεταξύ των στροφών σε μήκος κύματος.

Ειδικότερα, ο αξονικός λόγος (AR) της ελικοειδούς κεραίας εξαρτάται αποκλειστικά από τις διαστάσεις της περιφέρειάς της και από την απόσταση μεταξύ των στροφών του πηνίου, δηλαδή τη γωνία κλίσης, όπως δίνεται από τον Kraus στην εξίσωση 2 παρακάτω:

$$\frac{|E_\theta|}{|E_\phi|} = \frac{S_\lambda}{2\pi A} = \frac{2S_\lambda}{\pi^2 D^2} = \frac{2S_\lambda}{C_\lambda^2} \quad (2)$$

Όπου:

A: η περιοχή κύκλου

D: η διάμετρος κύκλου

S: η απόσταση μεταξύ των στροφών της έλικας

λ : το μήκος κύματος

Η κατανομή του ρεύματος της κανονικής λειτουργίας της ελικοειδούς κεραίας κατά μήκος της έλικας παράγει δύο ορθογώνιες συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου: μια συνιστώσα παράλληλη προς τον άξονα της έλικας και μια άλλη συνιστώσα κάθετη στον άξονα. Αυτό αποδεικνύεται από την Εξίσωση 2, η οποία εκφράζει τις συνιστώσες του μακρινού πεδίου E_ϕ και E_θ της έλικας. Επομένως, οι τρεις ειδικές περιπτώσεις που αφορούν την ευαισθησία της πόλωσης της NMHA δίνονται ως εξής [29]:

Όταν $E_\phi = 0$ έχουμε Γραμμική κάθετη πόλωση.

Όταν $E_\theta = 0$ έχουμε Γραμμική οριζόντια πόλωση.

Όταν $E_\phi = E_\theta$ έχουμε Κυκλική πόλωση.

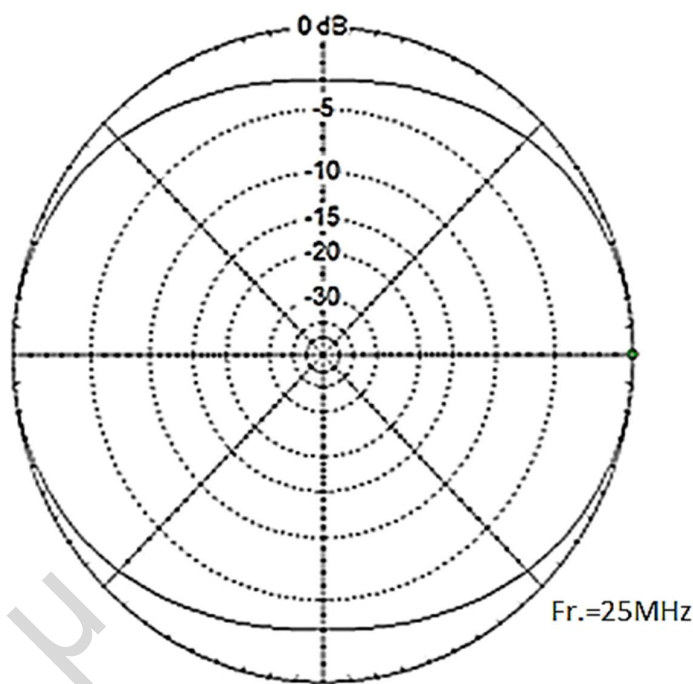
Συνεχίζοντας, η ελικοειδής κεραία λειτουργεί σύμφωνα με τις αρχές της κεραίας πηνίου. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός της ενσωματώνει μια ελικοειδή δομή, η οποία επηρεάζει τη σύνθετη αντίστασή της. Για παράδειγμα, η δομή της σπείρας εισάγει αυτεπαγωγή στο σύστημα της κεραίας, με ανάλογο αποτέλεσμα στη συμπεριφορά της ακτινοβολίας της κεραίας. Από αυτή την άποψη, η ΝΜΗΑ εμφανίζει συνήθως στενό εύρος ζώνης λόγω της επαγωγικής της φύσης. Για να αυξηθεί το στενό εύρος ζώνης της ελικοειδούς κεραίας, απαιτούνται πρόσθετες βελτιώσεις. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως θα δούμε πιο κάτω στην ενότητα 2.1.

Επίσης, θα διερευνήσουμε το κέρδος της ελικοειδούς κεραίας σε σύγκριση με αυτό ενός δίπολου μισού κύματος το οποίο μέχρι αυτό το σημείο είναι άγνωστο. Το δίπολο μισού κύματος, χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία ως κεραία αναφοράς και μας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά απόδοσης της φασικής στοιχειοκεραίας. Έτσι για την διερεύνηση των πιο πάνω ζητημάτων, επιλέχθηκαν διαστάσεις για τις δύο ελικοειδείς κεραίες της φασικής στοιχειοκεραίας χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 1 και 2.



Διάγραμμα 1: Η υπό δοκιμή ελικοειδής κεραία κανονικής λειτουργίας.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Wheeler, η περίμετρος των ελικοειδών κεραιών που απαιτείται για την επίτευξη κυκλικού διαγράμματος ακτινοβολίας πόλωσης υπολογίστηκε σε 15 cm. Επιπλέον, και οι δύο έλικες αποτελούνται από 5,5 στροφές από χάλκινο σύρμα διαμέτρου 2,5 mm, που στέκονται σε συνολικό ύψος 6 cm (0,05λ) στα 25 MHz. Το Διάγραμμα 1 απεικονίζει την υπό δοκιμή ελικοειδή κεραία όταν λειτουργεί ως αυτόνομη κεραία. Το διάγραμμα ακτινοβολίας κυκλικής πόλωσης (C.P.) της ελικοειδούς κεραίας που λειτουργεί σε κανονική λειτουργία προσομοιώθηκε με τη χρήση του λογισμικού μοντελοποίησης EZNEC, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2: Το διάγραμμα ακτινοβολίας της ελικοειδούς κεραίας.

Κατά την αρχική φάση του σχεδιασμού της ελικοειδούς κεραίας κανονικής λειτουργίας (NMHA), εστίασαμε στην αξιολόγηση του εύρους ζώνης της ως παθητικός ακτινοβολητής, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες αναντιστοιχίας που μειώνουν το

κέρδος της κεραίας. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε μη ανακλαστικό περιβάλλον σε κάθε επιθυμητή συχνότητα στο εύρος 20 MHz έως 30 MHz με τη χρήση του αναλυτή δικτύου Nano VNA-FV2[18]. Στη συνέχεια, οι προκύπτουσες τιμές σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιήθηκαν στις εξισώσεις 3 και 4 για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης (Γ) και της εξασθένησης αναντιστοιχίας φορτίου των ελικοειδών κεραιών, όπως απεικονίζεται στα Διάγραμμα τα 3 και 4 [24].

$$\Gamma = \frac{\sqrt{(R - z_0)^2 + x^2}}{\sqrt{(R + z_0)^2 + x^2}} \quad (3)$$

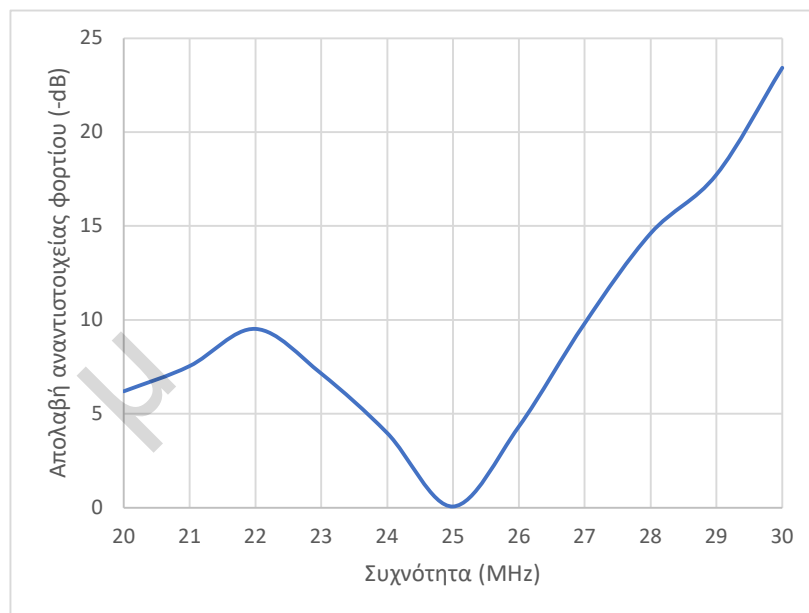
Όπου:

R: η αντίσταση φορτίου

Z₀: η χαρακτηριστική αντίσταση πηγής

X: η σύνθετη αντίσταση

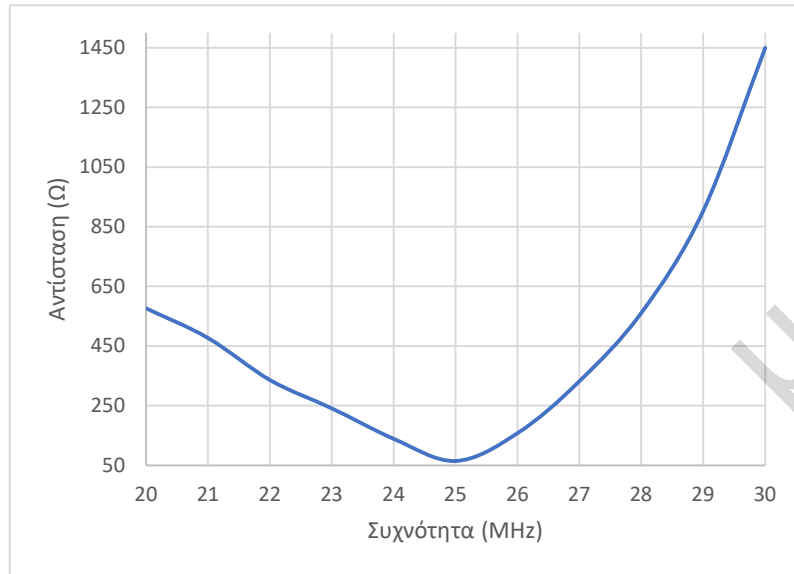
Η απώλεια αναντιστοιχίας = $-10 \text{ Log}(1 - \Gamma^2)$ (4)



Διάγραμμα 3 : Η εξασθένηση της αναντιστοιχίας φορτίου της ελικοειδούς κεραίας

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 3, η ελικοειδής κεραία παρουσιάζει ένα πολύ στενό εύρος ζώνης λειτουργίας, περίπου 1 MHz όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω των απωλειών αναντιστοιχίας. Συνεπαγόμενα, το κέρδος της κεραίας μειώνεται σημαντικά στα -24 dB στα 30 MHz. Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζεται το διάγραμμα υψηλής σύνθετης

αντίστασης της ελικοειδούς κεραίας, το οποίο και ευθύνεται για την εξασθένηση της αναντιστοιχίας φορτίου.



Διάγραμμα 4: Η μετρούμενη σύνθετη αντίσταση της ελικοειδής κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 20 έως 30 MHz.

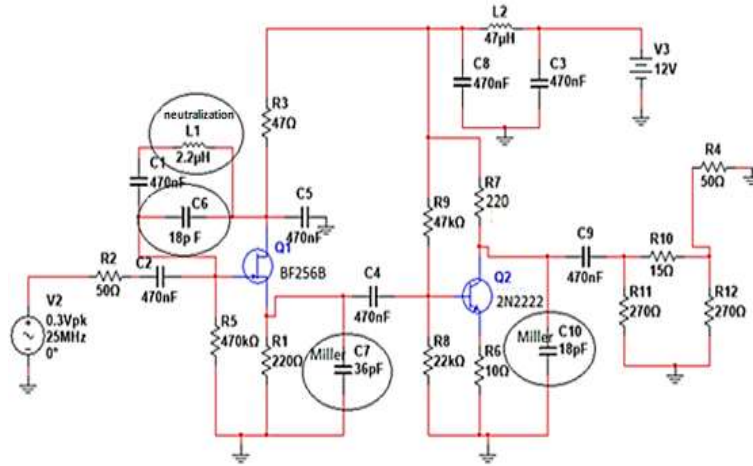
Έτσι λοιπόν καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μια παθητική ελικοειδής κεραία δεν είναι εφικτό να λειτουργήσει ευρυζωνικά, εκτός εάν το πρόβλημα αντιμετωπιστεί με την εφαρμογή ενός δικτύου προσαρμογής αντίστασης. Μια προσέγγιση για την λύση αυτού του προβλήματος, είναι η χρήση ενός παθητικού δικτύου προσαρμογής για την προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης της ελικοειδούς κεραίας στα 50 Ω όταν λειτουργεί εκτός της συχνότητας συντονισμού [29]. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση δεν είναι πρακτική για μια ευρυζωνική κεραία παρακολούθησης, λόγω της μειωμένης απόδοσης στο φάσμα παρακολούθησης. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η μετατροπή της παθητικής ελικοειδούς κεραίας σε ενεργή κεραία. Συνεπαγόμενο αυτού είναι η απαίτηση της χρήση ενός ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) υψηλής σύνθετης αντίστασης εισόδου για την προσαρμογή της ελικοειδούς κεραίας στο φορτίο 50 Ω.

Στην συνέχεια, στην ενότητα που ακολουθεί αναλύουμε τη μεθοδολογία σχεδιασμού και υλοποίησης του LNA υψηλής αντίστασης.

2.1 Σχεδιασμός και υλοποίηση LNA

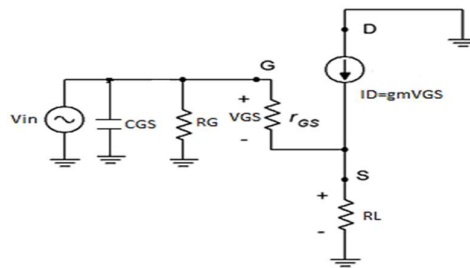
Για την πρώτη βαθμίδα ενίσχυσης του LNA χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής JFET (BF256B) σε συνδεσμολογία κοινού απαγωγού με επαγωγικό βρόχο αρνητικής ανάδρασης [25]. Για την δεύτερη και τελική βαθμίδα χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής BJT (2N2222) σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού [22], όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 5. Οι εσωτερικοί πυκνωτές C6, C7 και C10 περιλαμβάνονται στο σχηματικό διάγραμμα του Διάγραμμα τος 5 αποκλειστικά για σκοπούς προσομοίωσης με τη χρήση του λογισμικού Multisim [23]. Το μέσο κέρδος του cascade LNA μετρήθηκε στο εργαστήριο ως -1 dB στα 50 Ω, λαμβάνοντας υπόψη τις εσωτερικές χωρητικότητες και των δύο ενισχυτών των δύο βαθμίδων. Αυτό το αρνητικό κέρδος εξασφαλίζει σταθερότητα έναντι αυτοταλαντώσεων και ελαχιστοποιεί το φαινόμενο Miller στην είσοδο και την έξοδο της τελικής βαθμίδας [24]. Ενσωματώθηκε επίσης ένας εξασθενητής -1,5 dB στην έξοδο του LNA για την απομόνωση της χωρητικότητας Miller της τελικής βαθμίδας έτσι ώστε να μην επηρεάζει την αντίσταση του φορτίου, ιδιαίτερα την φάση του διαμορφωτή δέσμης τον οποίο θα δούμε στην επόμενη ενότητα. Ο εξασθενητής εξόδου έχει σχεδιαστεί με ένα δίκτυο αντιστάσεων “π” που αποτελείται από τις αντιστάσεις R10, R11 και R12, με ισοδύναμη αντίσταση Thevenin 47 Ω. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η αντίσταση εξόδου, που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το θεώρημα της επαλληλίας ως ισοδύναμο κύκλωμα της αντίστασης R7 παράλληλα με τον πυκνωτή C10, είναι περίπου 50 Ω σε όλες τις επιθυμητές συχνότητες λειτουργίας. Η πρώτη βαθμίδα του LNA έχει άμεσο αντίκτυπο στον λόγο σήματος προς θόρυβο των λαμβανόμενων σημάτων και ως εκ τούτου είναι συνετό να ενισχύει να λαμβανόμενα σήματα όσο το δυνατό λιγότερο. Για παράδειγμα, λόγω της υψηλής σύνθετης αντίστασης εισόδου του, ο ενισχυτής παρουσιάζει πολύ χαμηλό φορτίο στην ελικοειδή κεραία χωρίς να προκαλεί πτώση τάσης, αποτρέποντας κατά συνέπεια την εξασθένηση του σήματος στην είσοδο του LNA. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση των απωλειών, ιδίως όταν η κεραία λειτουργεί εκτός της συχνότητας συντονισμού της, όπου η σύνθετη αντίστασή της είναι πολύ υψηλή, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4. Αντίθετα, η ενσωμάτωση ενός παραδοσιακού ενισχυτή χαμηλής σύνθετης αντίστασης ως πρώτη βαθμίδα του LNA θα οδηγούσε σε υψηλή εξασθένηση του λαμβανόμενου σήματος λόγω του διαιρέτη τάσης που θα εμφανιζόταν μεταξύ της υψηλής σύνθετης αντίστασης της ελικοειδούς κεραίας και της χαμηλής σύνθετης

αντίστασης του ενισχυτή, υποβαθμίζοντας έτσι σημαντικά το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), ανεξάρτητα από το κέρδος των επόμενων σταδίων. Έτσι, η λεπτομερής ανάλυση του CDA JFET, μετά την αναβάθμισή του, αναλύεται περαιτέρω παρακάτω.



Διάγραμμα 5: Κύκλωμα ενισχυτή χαμηλού θορύβου δύο σταδίων και υψηλής αντίστασης εισόδου.

Σύμφωνα με τη θεωρία, η αντίσταση εισόδου ενός γραμμικού ενισχυτή κοινού συλλέκτη JFET είναι ιδανικά πολύ υψηλή (της τάξης των MΩ) [25]. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, η αντίσταση αυτή μειώνεται σε περίπου 300 Ω στα 25 MHz, η οποία είναι σχετικά χαμηλή λόγω της επίδρασης των εσωτερικών παρασιτικών χωρητικότητων του JFET, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6. Σύμφωνα με το θεώρημα της επαλληλίας, οι εσωτερικές χωρητικότητες πύλης-εκροής και πύλης-πηγής του JFET εμφανίζονται παράλληλα με την αντίσταση πύλης εισόδου R_G . Κατά συνέπεια, η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή μειώνεται σε υψηλές συχνότητες [25]. Για να μετριαστεί αυτό το πρόβλημα, οι παρασιτικές χωρητικότητες εισόδου πρέπει να εξουδετερωθούν με την ενσωμάτωση ενός πηνίου αρνητικής ανάδρασης, το οποίο να συνδέεται παράλληλα με την είσοδο του ενισχυτή.



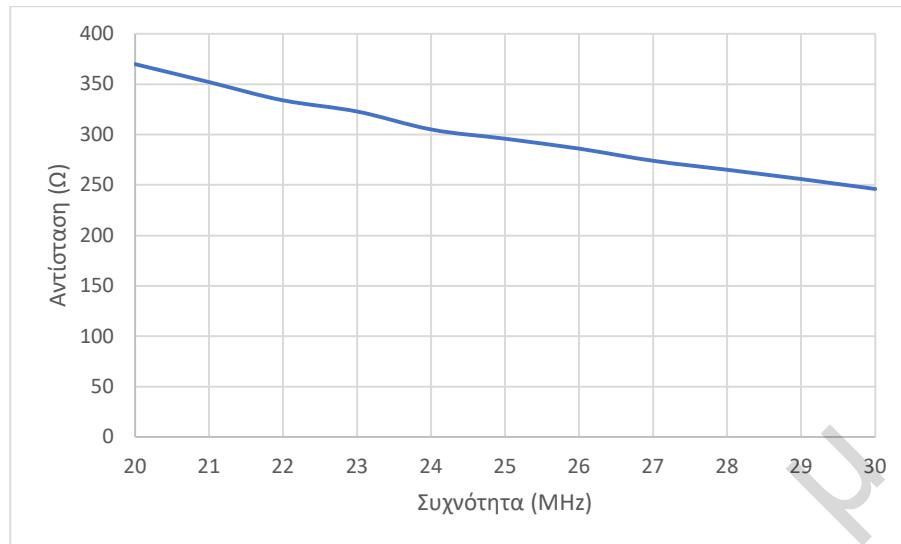
Διάγραμμα 6: Το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή κοινού απαγωγού.

Για να τεκμηριωθεί η προαναφερθείσα θεωρία, η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή κοινού απαγωγού (CDA) μετρήθηκε με τη χρήση διανυσματικού αναλυτή δικτύου χωρίς την εξουδετέρωση της εσωτερικής χωρητικότητας. Οι μετρούμενες τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα 1 παρακάτω.

Συχνότητα (MHz)	Αντίσταση (Ω)
20	7.3-j368
21	6.9-j392
22	6.3-j337
23	7.0-j322
24	6.9-j322
25	6.9-j294
26	6.0-j285
27	4.8-j274
28	5.5-j263
29	5.8-j255
30	4.8-j245

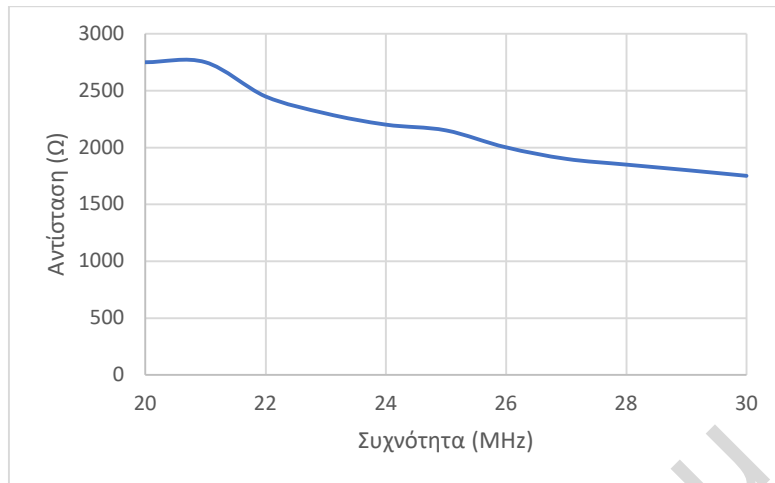
Πίνακας 1: Τιμές σύνθετης αντίστασης εισόδου του ενισχυτή κοινού απαγωγού.

Σύμφωνα με τον πίνακα 1, η αντίσταση εισόδου του CDA είναι εμφανώς μειωμένη λόγω της εσωτερικής υψηλής χωρητικής αντίστασης. Όπως αποδεικνύεται από το μέγεθος της σύνθετης αντίστασης εισόδου του CDA που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 7, η σύνθετη αντίσταση εισόδου του ενισχυτή JFET είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας λόγω της επίδρασης της εσωτερικής χωρητικής αντίστασης.



Διάγραμμα 7: Η σύνθετη αντίσταση εισόδου του ενισχυτή κοινού απαγωγού.

Από τον Πίνακα 1, μπορεί να υπολογιστεί ότι η συνολική τιμή της χωρητικότητας πύλης-πηγής του BF256B, που λειτουργεί ως ενισχυτής ακολουθίας πηγής, είναι περίπου 18 pF. Αυτή η τιμή έχει ληφθεί υπόψη στο Διάγραμμα 5 για σκοπούς προσομοίωσης ως πυκνωτής (C6). Για να εξαλειφθεί η χωρητική αντίσταση, εγκαταστάθηκε ένα πηνίο αρνητικής ανάδρασης (L1) 2,2 uH παράλληλα με τον εσωτερικό πυκνωτή C6. Αυτό το πηνίο αρνητικής ανάδρασης εξουδετερώνει αποτελεσματικά τις παρασιτικές χωρητικότητες της εισόδου του ενισχυτή δημιουργώντας ένα κύκλωμα υψηλής αντίστασης παράλληλα με την είσοδο του ενισχυτή. Αυτός ο ισχυρισμός επιβεβαιώθηκε περαιτέρω μέσω προσομοίωσης του λογισμικού Multisim, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8, όπου η αντίσταση εισόδου του CDA αυξήθηκε σημαντικά.



Διάγραμμα 8: Η σύνθετη αντίσταση εισόδου του ενισχυτή κοινής απαγωγής μετά την εξουδετέρωση των παρασιτικών χωρητικοτήτων εισόδου.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 8, η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή κοινού απαγωγού είναι της τάξης των ΚΩ. Ο πίνακας 2 απεικονίζει τις μετρήσεις αντίστασης της ελικοειδούς κεραίας που προέκυψαν από τις μετρήσεις του διανυσματικού αναλυτή. Αυτές οι μετρήσεις χρησιμεύουν ως είσοδος για την προσομοίωση της απόδοσης του ενισχυτή χαμηλού θορύβου JFET υψηλής αντίστασης με τη χρήση του λογισμικού Multisim.

Συχνότητα (MHz)	Είσοδος LNA (mV)	Ελικοειδής σύνθετη αντίσταση (Ω)	Έξοδος LNA (mV)	Κέρδος LNA (dB)
20	600	457-j351	777	2.24
21	600	222-j422	685	1.15
22	600	68-j329	566	-0.50
23	600	65-j232	519	-1.25
24	600	65-j123	508	-1.40
25	600	65-j0.96	544	-0.85
26	600	62+j145	631	0.43
27	600	61+j326	952	4.00
28	600	56+j559	4000	16.0
29	600	69+j900	2610	12.0
30	600	48+J1450	3150	14.0

Πίνακας 2: Δεδομένα προσομοίωσης του λογισμικού Multisim με βάση την πραγματική σύνθετη αντίσταση της ελικοειδούς κεραίας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης του λογισμικού Multisim που παρουσιάζονται στον πίνακα 2, είναι προφανές ότι η προαναφερθείσα τεχνική εξουδετέρωσης βελτίωσε σημαντικά το εύρος ζώνης της ελικοειδούς κεραίας όταν εγκαταστάθηκε στον ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) υψηλής αντίστασης. Η ενίσχυση αυτή επιτρέπει στην ελικοειδή κεραία να λειτουργεί αποτελεσματικά ως ενεργή κεραία σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Στην επόμενη ενότητα θα εξεταστεί η απόδοση της ενεργής ελικοειδής κεραίας σε πραγματικές συνθήκες.

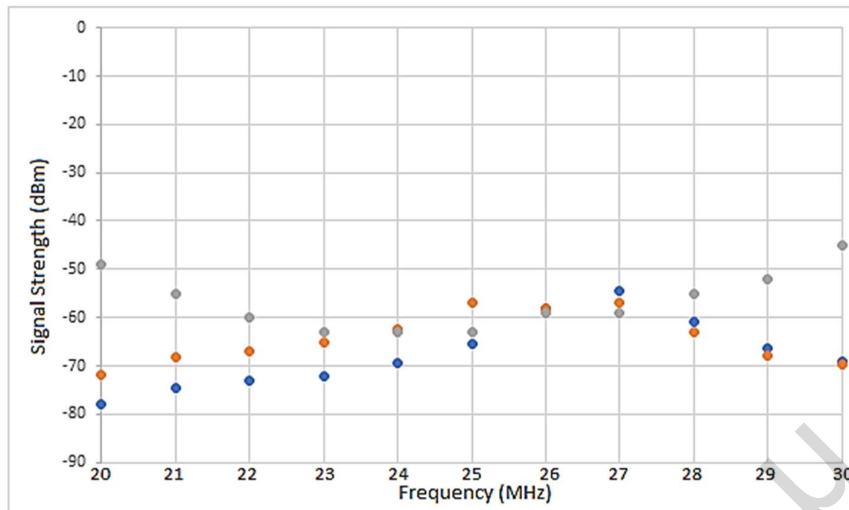
2.2 Δοκιμή της ενεργής ελικοειδούς κεραίας σε πραγματικές συνθήκες

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που περιγράφονται λεπτομερώς στον πίνακα 2, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της απόδοσης της ελικοειδούς κεραίας σε πραγματικές συνθήκες σε περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις. Η κεραία υποβλήθηκε σε δοκιμή με τη λήψη ενός μεταδιδόμενου σήματος που εκτείνεται

στο εύρος 20MHz έως 30MHz σε συγκεκριμένη απόσταση εντός της ζώνης του μακρινού πεδίου.

Αρχικά, η ελικοειδής κεραία αξιολογήθηκε στην παθητική της κατάσταση. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την κεραία στην ενεργή της κατάσταση χωρίς την αρνητική ανάδραση και, τέλος, ως ενεργή κεραία με αρνητική ανάδραση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών απεικονίζονται στο Διάγραμμα 9, με τις μπλε κουκκίδες να αντιπροσωπεύουν την ισχύ του σήματος της παθητικής ελικοειδούς κεραίας που είναι απευθείας συνδεδεμένη στον αναλυτή φάσματος, οι πορτοκαλί κουκκίδες να αντιπροσωπεύουν την ενεργή ελικοειδή κεραία χωρίς ανάδραση και οι γκριζες κουκκίδες τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή της εξουδετέρωσης της επαγωγικής ανατροφοδότησης.

Όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 9, η συχνότητα συντονισμού της ελικοειδούς κεραίας σε αυτό το πείραμα μετατοπίστηκε στα 27 MHz. Κατά συνέπεια, η υψηλή αντίσταση εισόδου του LNA δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ωστόσο, με την ενσωμάτωση ενός LNA υψηλής σύνθετης αντίστασης, επιβεβαιώθηκε η βελτίωση της απόδοσης της κεραίας σε όλο το κατώτερο και ανώτερο εύρος συχνοτήτων που δοκιμάστηκε. Αυτή η βελτίωση είναι ζωτικής σημασίας, διότι σε αυτές τις συχνότητες, η αντίσταση της κεραίας είναι πολύ υψηλή με αποτέλεσμα την υψηλή εξασθένηση των λαμβανόμενων σημάτων.



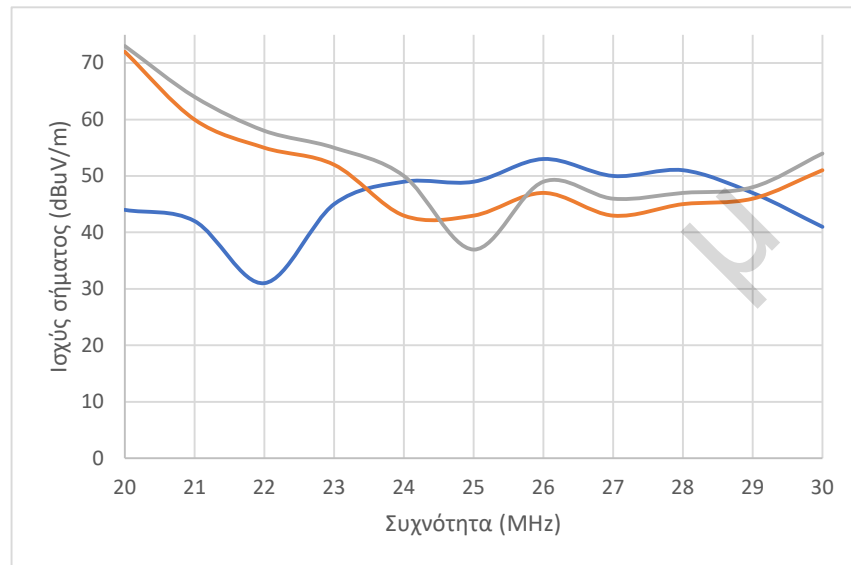
Διάγραμμα 9: Τα αποτελέσματα του αναλυτή φάσματος της ελικοειδούς κεραίας σε πραγματικές συνθήκες.

2.3 Βελτίωση των επιδόσεων της ενεργής ελικοειδούς κεραίας σε σχέση με το δίπολο μισού κύματος

Στην παρούσα ενότητα, διερευνάται η απόδοση της ενεργής ελικοειδούς κεραίας σε σύγκριση με ένα παθητικό δίπολο οριζόντιας πόλωσης μισού κύματος, στο πλαίσιο των κεραιών παρακολούθησης. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες σε μη ανακλαστικό περιβάλλον (μεγάλο υπαίθριο πεδίο). Για τη διεξαγωγή των δοκιμών, μετρήθηκε με ακρίβεια η σύνθετη αντίσταση του οριζόντιου δίπολου αναφοράς σε κάθε συχνότητα δοκιμής (20MHz-30 MHz) με τη χρήση φορητού διανυσματικού αναλυτή δικτύου. Αυτό εξασφάλισε ότι όλες οι απώλειες σύζευξης του δίπολου αναφοράς λαμβάνονταν υπόψη στις τελικές μετρήσεις της ισχύος σήματος του αναλυτή φάσματος, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 10.

Η ενεργή ελικοειδής κεραία δοκιμάστηκε τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια για να προσδιοριστεί ο αξονικός λόγος της, μια ζωτικής σημασίας παράμετρος σχεδιασμού της συστοιχίας. Η απόσταση μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης ορίστηκε στα 15 λ για να διασφαλιστούν σωστές μετρήσεις στο μακρινό πεδίο. Η κεραία εκπομπής που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή ήταν ένα οριζόντια πολωμένο δίπολο μισού κύματος. Οι τιμές ισχύος σήματος της υπό δοκιμή ελικοειδούς κεραίας απεικονίζονται επίσης στο Διάγραμμα 10. Η μπλε καμπύλη αντιπροσωπεύει την απόκριση του οριζόντια

πολωμένου δίπολου αναφοράς μισού κύματος. Η καφέ και η γκρι καμπύλη αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες κατακόρυφες και οριζόντιες αποκρίσεις της ενεργούς ΝΜΗΑ.



Διάγραμμα 10: Αποτελέσματα του αναλυτή φάσματος της ελικοειδούς κεραίας σε σχέση με το δίπολο μισού κύματος.

Με βάση το Διάγραμμα 10, η ελικοειδής κεραία παρουσιάζει μέσο αξονικό λόγο 2 dB. Λαμβάνοντας υπόψη το συμπαγές μέγεθος της κεραίας, η οποία έχει ύψος 6 cm και λειτουργεί στη ζώνη των 12 μέτρων, τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά.

2.4 Δοκιμή της ΝΜΗΑ σε σχέση με μια ενεργή κεραία διπλής πόλωσης (HE016) της Rohde & Schwarz.

Η ενεργή ελικοειδής κεραία επικυρώθηκε έναντι μιας ενεργής κεραίας διπλής πόλωσης (HE016), σε μια τοποθεσία επικύρωσης όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 11, χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό ευρυζωνικό δέκτη HF EM510 της Rohde & Schwarz (R&S), όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 12 [21,22].



Διάγραμμα 11: Η κεραία HE016 υπό δοκιμή

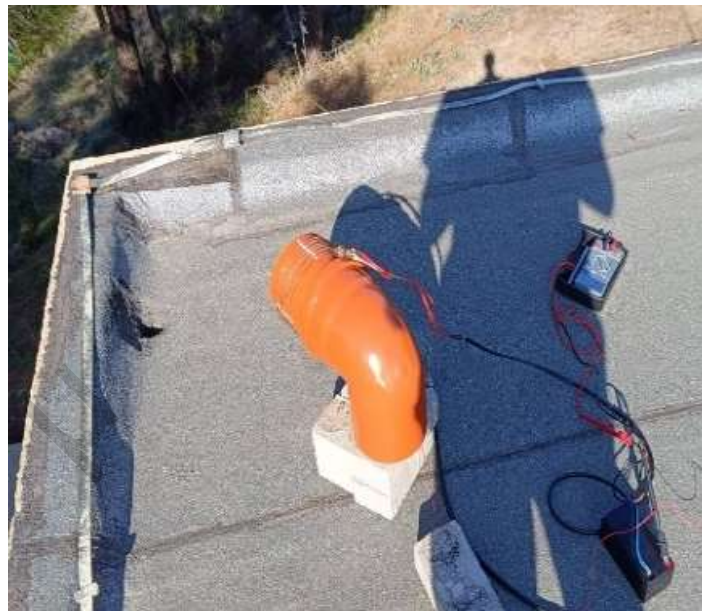


Διάγραμμα 12: Ο ψηφιακός δέκτης HF EM510.

Η ελικοειδής κεραία στην τοποθεσία επικύρωσης, που δοκιμάστηκε με κάθετη και οριζόντια πόλωση, φαίνεται στο Διάγραμμα 12 και 13 αντίστοιχα.

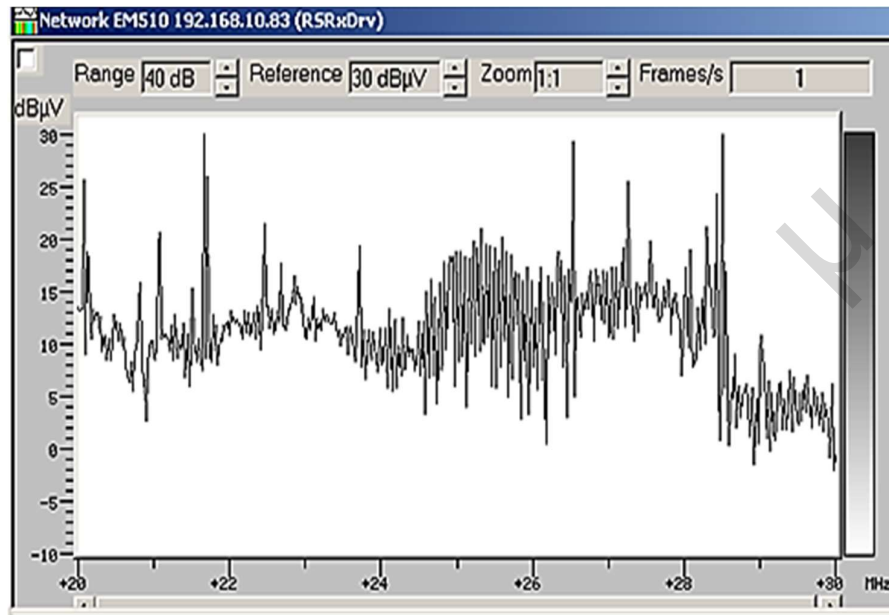


Διάγραμμα 13: Κάθετα πολωμένη ελικοειδής κεραία υπό δοκιμή

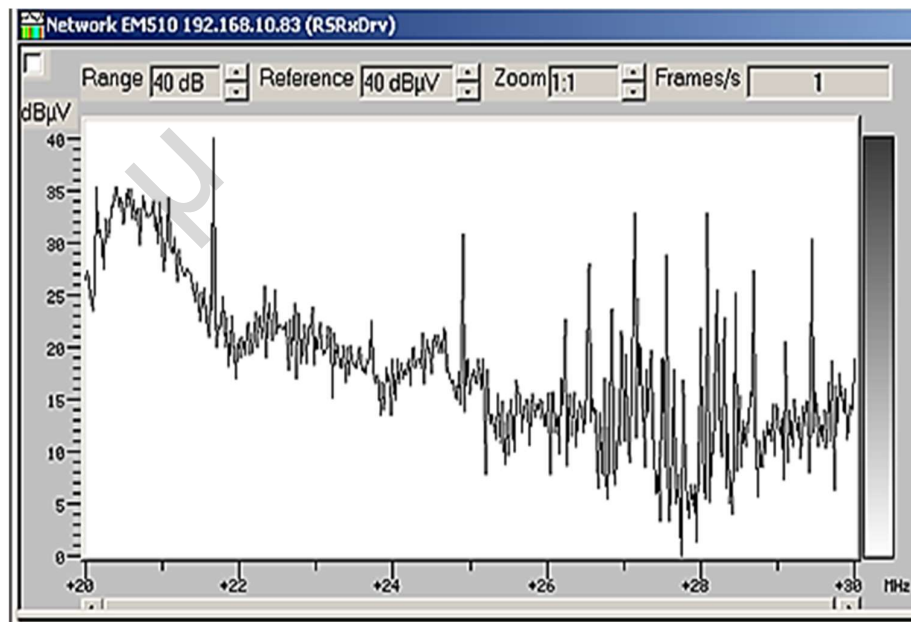


Διάγραμμα 14: Οριζόντια πολωμένη ελικοειδής κεραία υπό δοκιμή

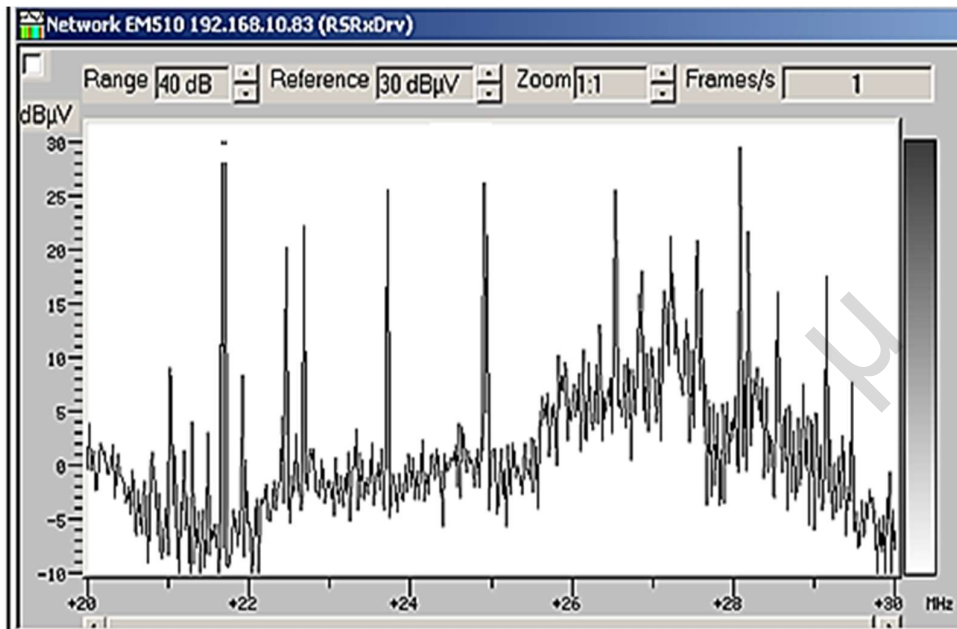
Παρόλο που τα σήματα που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής κυμάνθηκαν κατά περισσότερο από +10dB, οι στιγμιαίες μετρήσεις της ελικοειδούς κεραίας έναντι της ενεργής κεραίας (HE016) παρουσιάζονται στα παρακάτω στιγμιότυπα οθόνης.



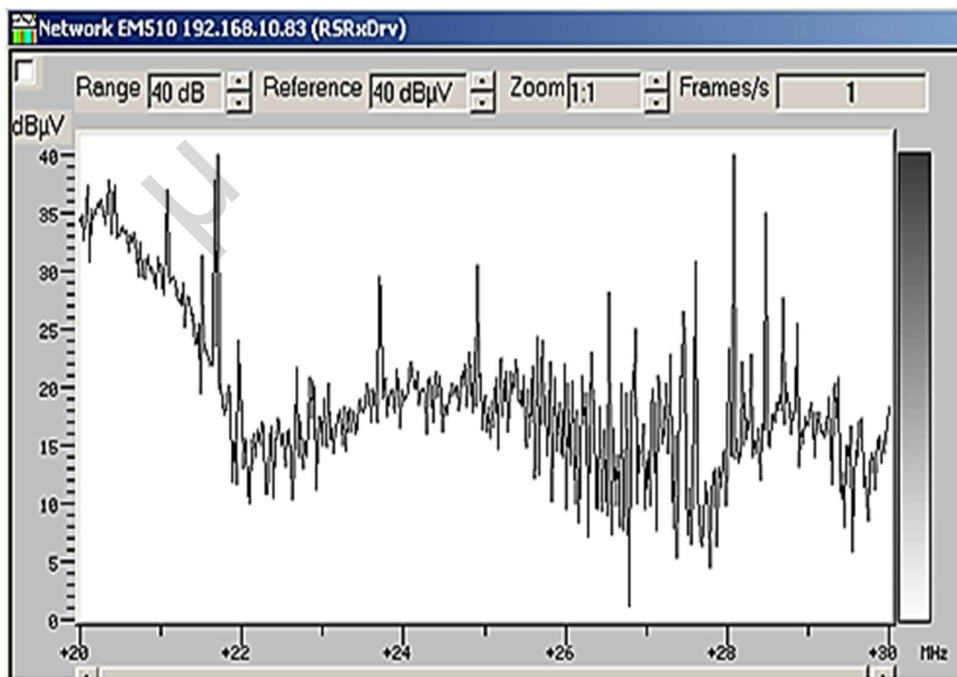
Διάγραμμα 15: Φάσμα κάθετα πολωμένης HE016



Διάγραμμα 16: Φάσμα κάθετα πολωμένης ελικοειδής κεραίας



Διάγραμμα 17: Φάσμα οριζόντιας πολωμένης HE016

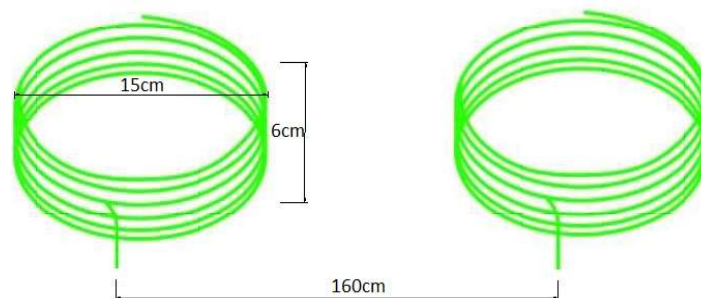


Διάγραμμα 18: Φάσμα οριζόντιας πολωμένης ελικοειδής κεραίας.

Όπως φαίνεται από το μετρούμενο φάσμα της HE016 στο Διάγραμμα 15 σε σύγκριση με εκείνο του 16, όπου η ελικοειδής κεραία δοκιμάστηκε με κάθετη πόλωση, ελήφθη πλήθος σημάτων που δεν μπορούσαν να ανιχνευθούν από την κάθετα πολωμένη HE016. Αυτό επαληθεύει ότι η ελικοειδής κεραία είναι ικανή να λαμβάνει και κάθετα πολωμένα σήματα. Επιπλέον, παρά τις διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος, τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι το κέρδος της οριζόντια πολωμένης της HE016 στο Διάγραμμα 17 είναι παρόμοιο με το κέρδος της οριζόντια πολωμένης ελικοειδής κεραίας, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 18. Στην επόμενη ενότητα, εμβαθύνουμε λεπτομερέστερα στις αρχές σχεδίασης, υλοποίησης και αξιολόγησης της ελικοειδής φασικής στοιχειοκεραίας.

3 Αρχές σχεδιασμού της ελικοειδούς φασικής στοιχειοκεραίας

Η κατευθυντικότητα της συστοιχίας και ο λόγος μπρος-πίσω καθορίζονται από τη διαφορά πλάτους και φάσης μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών. Αυτή η διαφορά φάσης καθορίζεται από την απόσταση και τον προσανατολισμό των κεραιών, καθώς και από τη μετατόπιση φάσης που εισάγεται από τον διαμορφωτή δέσμης, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως διαχωριστής όσο και ως συνδυαστής [28]. Η απόσταση μεταξύ των ελικοειδών κεραιών καθορίζει την απαραίτητη διαφορά φάσης για την καθοδήγηση της δέσμης προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η απαιτούμενη μετατόπιση φάσης μεταξύ των δύο γειτονικών ελικοειδών κεραιών είναι ανάλογη του μήκους κύματος και της απόστασης μεταξύ τους. Δεδομένου ότι οι δύο ελικοειδείς κεραίες τοποθετούνται δίπλα-δίπλα σε απόσταση $\lambda/8$ μεταξύ τους, η οποία ισοδυναμεί με απόσταση 1,6 μέτρων στα 25 MHz, η ελικοειδής συστοιχία με τις διαστάσεις της απεικονίζεται στο Διάγραμμα 19.



Διάγραμμα 19: Η διάταξη των ελικοειδών κεραιών

Για τον προσδιορισμό της διαφοράς φάσης της συστοιχίας εφαρμόστηκε η εξίσωση 5 [24] πιο κάτω. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας που προκύπτει από την υπέρθεση των σημάτων από κάθε ελικοειδή κεραία εκφράζεται από την εξίσωση 6 παρακάτω [24].

$$\Psi = \frac{2\pi s_{\lambda} \sin \theta}{\lambda} - \Delta\Phi \quad (5)$$

Όπου:

Ψ : Η φάση της συστοιχίας σε δεδομένη κατεύθυνση

S_{λ} : Η απόσταση των κεραιών

Θ : Η γωνία ακτινοβολίας

$\Delta\Phi$: διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κεραιών

λ : Το μήκος κύματος

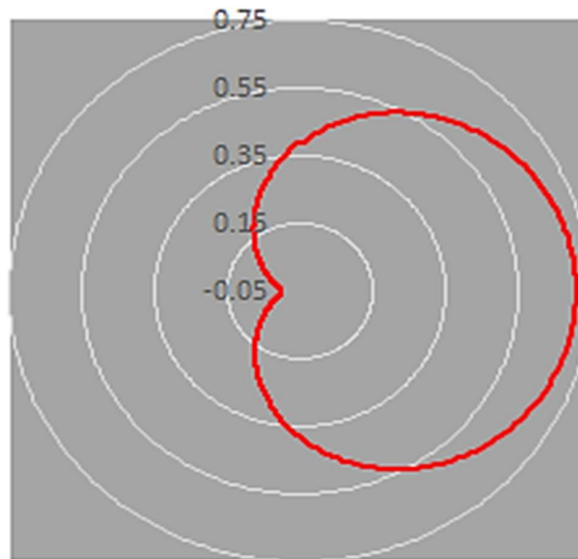
$$ARRAY FACTOR = \frac{\sin(\frac{N\Psi}{2})}{2\sin(\frac{\Psi}{2})} \quad (6)$$

Όπου:

N : Ο αριθμός κεραιών

Ψ : Η φάση της συστοιχίας σε δεδομένη κατεύθυνση

Χρησιμοποιώντας προσομοίωση λογισμικού με βάση τις εξισώσεις 5 και 6 με $\Delta\Phi=135^{\circ}$ και $S_{\lambda} = \lambda/8$, το διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας δύο ελικοειδών κεραιών παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 20.

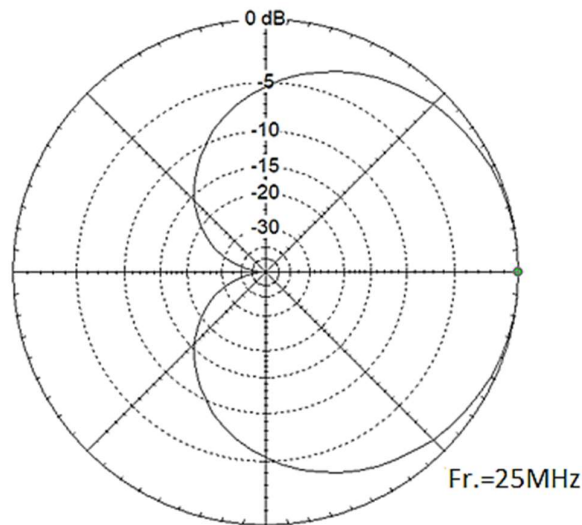


Διάγραμμα 20: Διάγραμμα ακτινοβολίας δύο ελικοειδών κεραιών τοποθετημένων σε απόσταση $\lambda/8$ μεταξύ τους και με διαφορά φάσης 135° .

Η απόσταση μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών καθορίζει τον παράγοντα της φασικής στοιχειοκεραίας, ο οποίος με την σειρά του καθορίζει το συνδυασμένο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας. Ο παράγοντας της της φασικής στοιχειοκεραίας μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μια μαθηματική έκφραση που περιγράφει το μιγαδικό άθροισμα φάσης των μεμονωμένων διαγραμμάτων ακτινοβολίας κάθε ελικοειδούς κεραίας της φασικής στοιχειοκεραίας και λαμβάνει υπόψη το πλάτος και τη μετατόπιση φάσης του κάθε στοιχείου για την δημιουργία του τελικού διαγράμματος ακτινοβολίας. Ακολούθως, το κέρδος της συστοιχίας υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση 7 όπως φαίνεται πιο κάτω [29].

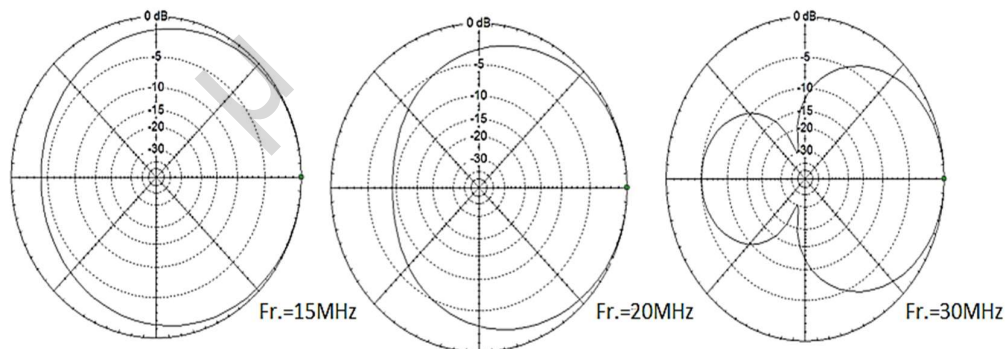
$$\text{Gain} = [(\cos 45 + \cos 135)^2 + (\sin 45 + \sin 135)^2]^{0.5} = 1,41 \sim 1,5 \text{ dB (7)}$$

Από την εξίσωση 7 προκύπτει ότι το κέρδος της συστοιχίας είναι 1,5 dB στα 25 MHz με λόγο μπρος-πίσω 23 dB. Εναλλακτικά, μέσω της προσομοίωσης με τη χρήση του λογισμικού EZNEC και μέσω του προκύπτοντος καρδιοειδούς διαγράμματος ακτινοβολίας, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 21, ο λόγος μπρος-πίσω φαίνεται να υπερβαίνει τα 30 dB.



Διάγραμμα 21: Το διάγραμμα ακτινοβολίας ελικοειδούς συστοιχίας στα 25MHz με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης EZNEC

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό EZNEC, προσομοιώθηκαν επίσης τα διαγράμματα ακτινοβολίας της φασικής στοιχειοκεραίας όταν τροφοδοτείται από μετατόπιση φάσης 135° σε απόσταση $\lambda/8$ στα 25MHz, στα 15MHz, 20MHz και 30MHz με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο πιο κάτω Διάγραμμα.



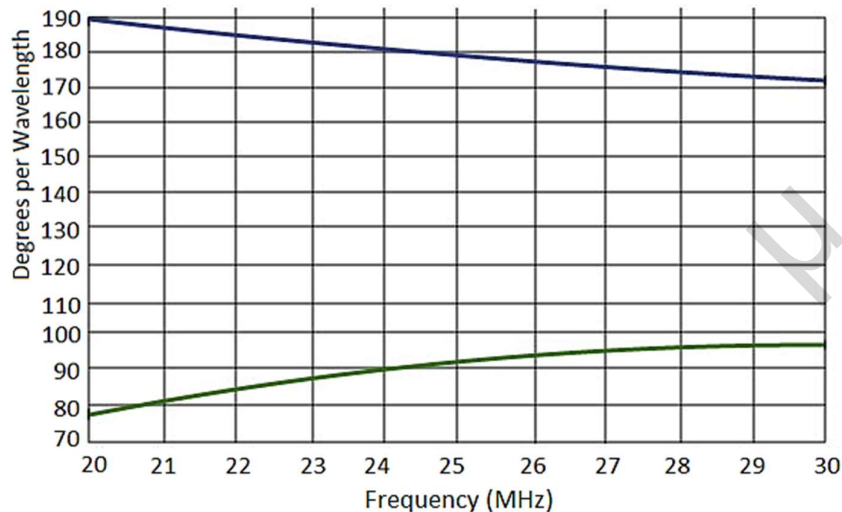
Διάγραμμα 22: Προσομοίωση λογισμικού EZNEC στα 15 MHz, στα 20 MHz και στα 30 MHz

Όταν οι κεραιές λειτουργούν εκτός συχνότητας, αποτυγχάνουν να επιτύχουν σωστή φασματοποίηση προς την επιθυμητή κατεύθυνση, γεγονός που αποδεικνύεται και από την παράμετρο Ψ της εξίσωσης 5, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος κύματος της απόστασης (S_L) μεταξύ τους και αντιστρόφως ανάλογα με την διαφορά φάσης $\Delta\Phi$. Κατά συνέπεια, η απόκλιση αυτή προκαλεί παραμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας από την ιδανική μορφή του, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 22, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του λόγου μπρος-πίσω σε μόλις 4 dB στα 15 MHz. Η απόκλιση αυτή μπορεί να εξηγηθεί παρατηρώντας το Διάγραμμα 22 όπου το διάγραμμα ακτινοβολίας αλλάζει από την αρχική του μορφή. Κατά συνέπεια, ο λόγος μπρος-πίσω σε αυτή την περίπτωση γίνεται 9 dB στα 20 MHz. Επιπλέον, ο λόγος μπρος-πίσω μειώνεται στα 5 dB στα 30 MHz για τον ίδιο λόγο. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, ο διαμορφωτής δέσμης θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να τροφοδοτεί τις κεραιές με διαφορά φάσης $\Delta\Phi$ που μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους (S_L). Αυτή η ρύθμιση εξασφαλίζει τη διατήρηση μιας σταθερής μετατόπισης φάσης 180° προς την οπίσθια κατεύθυνση της συστοιχίας σε όλες τις επιθυμητές συχνότητες. Περαιτέρω ανάλυση αυτής της προσέγγισης παρέχεται στην ενότητα 3.1.

3.1 Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του διαμορφωτή δέσμης

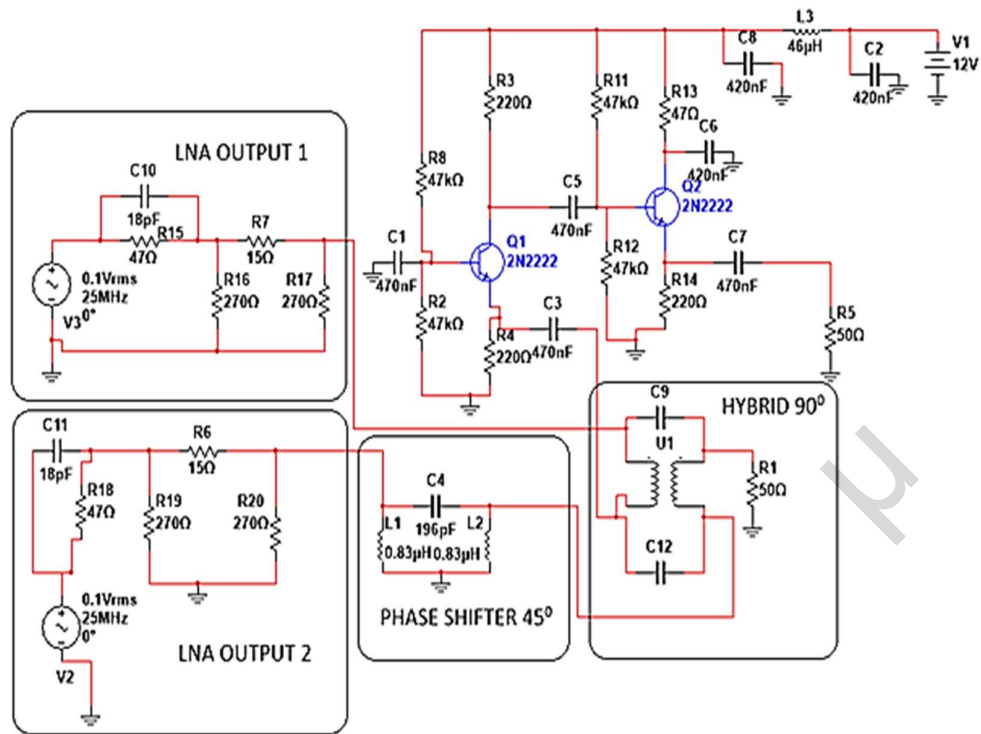
Ο διαμορφωτής δέσμης είναι ζωτικής σημασίας για τη συνολική απόδοση της φασικής στοιχειοκεραίας, καθώς ελέγχει τόσο την διαφορά φάσης αλλά και την διαφορά πλάτους κάθε ελικοειδούς κεραιάς σε σχέση με την καθυστέρηση φάσης λόγω της απόστασης μεταξύ των κεραιών, όταν λειτουργούν συλλογικά ως συστοιχία. Ο διαμορφωτής δέσμης λειτουργεί ως κύκλωμα διαχωρισμού και συνδυασμού, αποτελούμενο από ένα κλιμακωτό δίκτυο μετατόπισης φάσης και ένα ενεργό κύκλωμα. Η μετατόπιση φάσης μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών, όπως απεικονίστηκε προηγουμένως στην εξίσωση 5, καθορίζει το $\Delta\Phi$. Επιπλέον, η καθυστέρηση φάσης που προκαλείται από την απόσταση μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών (S_L) είναι μια μεταβλητή που εξαρτάται από την απόστασή τους σε μήκη κύματος. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις όπου η συστοιχία διατηρεί σταθερή τιμή $\Delta\Phi$ (όπως με μια συστοιχία ενός τετάρτου μήκους κύματος που χρησιμοποιεί σταθερή υβριδική τροφοδοσία 90 μοιρών), η διαφορά φάσης (Ψ) που περιγράφεται στην Εξίσωση 5 μεταβάλλεται μόνο

σε κάθε συχνότητα λειτουργίας λόγω αλλαγών στο S_{λ} . Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών σε κάθε συχνότητα λειτουργίας απεικονίζεται στο Διάγραμμα 23 παρακάτω.



Διάγραμμα 23: Η σχέση φάσης μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών

Η μπλε καμπύλη στην κορυφή αντιπροσωπεύει τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών όταν η συστοιχία ακτινοβολεί προς τα πίσω. Στα 25 MHz, η διαφορά φάσης 180° μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών οδηγεί σε θεωρητικά άπειρο λόγο μπρος-πίσω. Όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 23, το υψηλότερο σφάλμα φάσης εμφανίζεται στην αρχή και στο τέλος του εύρους συχνοτήτων λειτουργίας, περίπου στο $+5\%$. Αντίθετα, το πράσινο γράφημα στο κάτω μέρος αντιπροσωπεύει τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών όταν η φασική στοιχειοκεραία ακτινοβολεί προς τα εμπρός. Το μέγιστο κέρδος $1,89$ dB εμφανίζεται όταν η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών είναι $78,8^\circ$ στα 20 MHz. Για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα φάσης στην οπίσθια κατεύθυνση, η σχέση φάσης (Ψ) πρέπει να είναι σταθερή σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας. Ως εκ τούτου, υλοποιήθηκε ένα κύκλωμα αντιστάθμισης για την επίτευξη της επιθυμητής γραμμικότητας. Το κυκλωματικό διάγραμμα του διαμορφωτή δέσμης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 24. Η σύνθετη αντίσταση εξόδου των δύο LNA, συμπεριλαμβανομένων των κυκλωμάτων εξασθένησης π που συνδέονται στις εισόδους του διαμορφωτή δέσμης, μοντελοποιείται μόνο για σκοπούς προσομοίωσης.



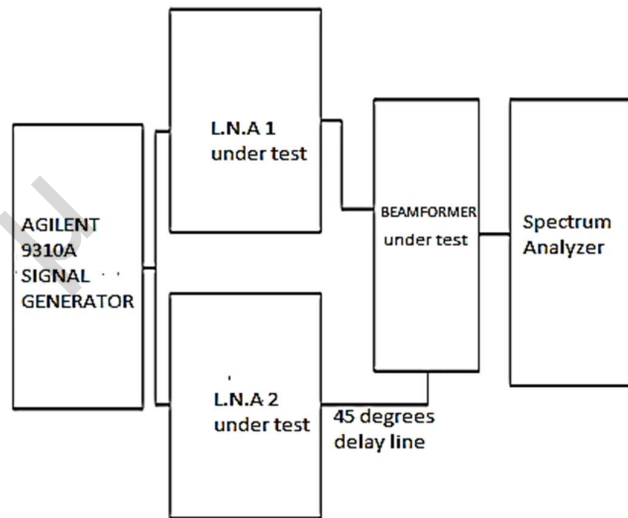
Διάγραμμα 24: Το κυκλωματικό διάγραμμα του διαμορφωτή δέσμης.

Η φιλοσοφία σχεδιασμού του κυκλώματος του διαμορφωτή δέσμης βασίζεται στην διατήρηση σταθερής διαφοράς φάσης 180° (προς τα πίσω) μεταξύ των ελικοειδών κεραιών σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας. Αυτή η ιδιότητα είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της κεραίας και την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων φάσης, ιδιαίτερα στα άκρα του εύρους συχνοτήτων. Με την εφαρμογή ενός κυκλώματος αντιστάθμισης, ο στόχος είναι να διατηρηθεί μια σταθερή σχέση φάσης (Ψ) μεταξύ των κεραιών, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση της συστοιχίας και εξασφαλίζοντας αξιόπιστη λειτουργία σε όλο το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων. Για τον σκοπό αυτό, ένας υπερβατικός μεταβλητής φάσης 45° , ενσωματώθηκε σε σειρά με το σταθερό υβρίδιο 90° , σε μία από τις δύο εισόδους του διαμορφωτή δέσμης [30]. Αυτή η διάταξη αποσκοπεί στην καθιέρωση μιας σταθερής διαφοράς φάσης 180° μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας. Το υβρίδιο PSCQ-2-51W της Mini Circuits χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή σταθερής μετατόπισης φάσης 90° στο δίκτυο [31]. Επιπλέον, η τοπολογία ενισχυτή κοινής βάσης επιλέχθηκε για τη χαμηλή αντίσταση εισόδου της, η οποία ταιριάζει με την αντίσταση εξόδου 50Ω του υβριδικού. Κατά συνέπεια, η τοπολογία κοινής βάσης παρέχει κέρδος τάσης, ενώ ο

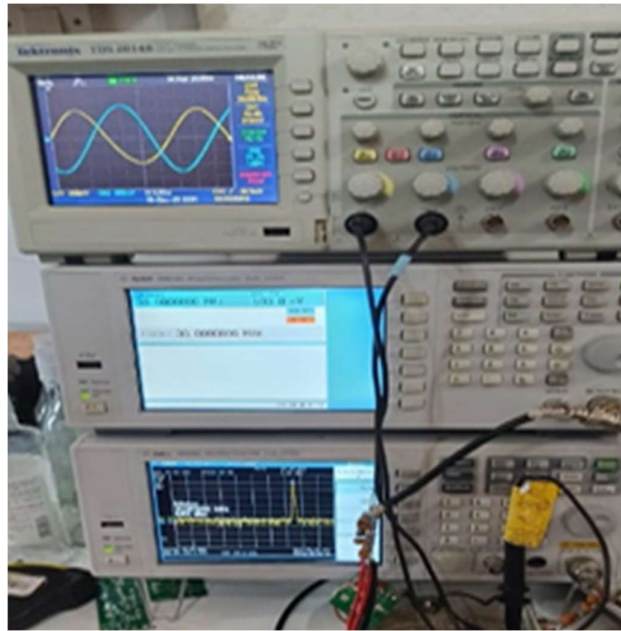
κοινός συλλέκτης αντισταθμίζει το κέρδος ρεύματος του ενισχυτή δύο σταδίων [32]. Η χαμηλή αντίσταση εξόδου του ενισχυτή κοινού συλλέκτη, ταιριάζει αποτελεσματικά με τη θύρα εισόδου 50Ω (R_5) του δέκτη.

3.2 Αξιολόγηση της απόδοσης του διαμορφωτή δέσμης 2.1

Για να αξιολογηθεί η απόδοση του διαμορφωτή δέσμης ως αυτόνομη μονάδα, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις αντικαθιστώντας τις ελικοειδείς κεραίες με τη γεννήτρια σήματος AGILENT N9310A. Δεδομένου ότι οι δύο ελικοειδείς κεραίες είναι τοποθετημένες πλάι πλάι σε απόσταση $\lambda/8$ μεταξύ τους, η καθυστέρηση φάσης μεταξύ τους στις θύρες εισόδου του διαμορφωτή δέσμης επιτεύχθηκε με τη χρήση μιας γραμμής καθυστέρησης 50Ω , 45° . Οι δύο LNA είναι αναπόσπαστα μέρη των ενεργών ελικοειδών κεραιών και ως εκ τούτου συμπεριλήφθηκαν στη δοκιμή για τον εντοπισμό τυχόν ανισοροπιών φάσης και πλάτους μεταξύ τους κατά την αλληλεπίδραση με τον διαμορφωτή δέσμης, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 25 (διάταξη δοκιμής).

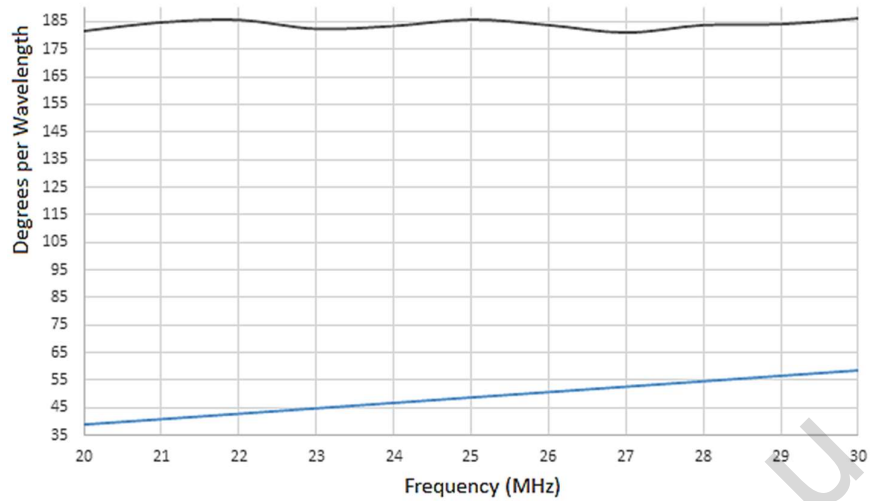


Διάγραμμα 25: Διάταξη δοκιμής

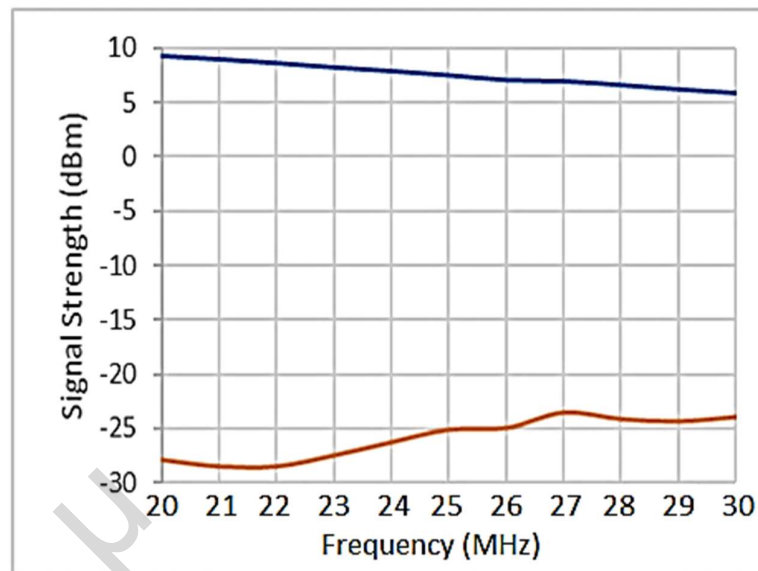


Διάγραμμα 26: Όργανα μέτρησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής

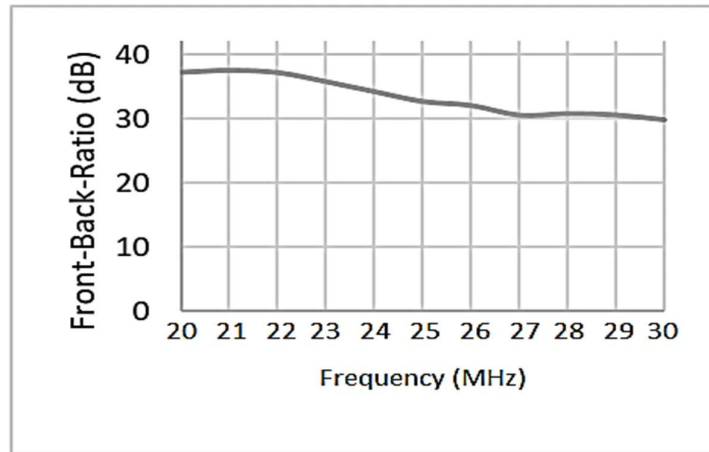
Μετά από πολυάριθμες δοκιμές, η βέλτιστη απόκριση του λόγου εμπρός-πίσω επιτεύχθηκε στα 23 MHz, αποκλίνοντας από τον αρχικό στόχο των 25 MHz. Όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 27 παρακάτω, η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο μοντελοποιημένων ελικοειδών κεραιών (μπλε γράφημα στο κάτω μέρος) που λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων 20 MHz έως 30 MHz, όταν η διαφορά φάσης είναι σταθερή, παρουσιάζει θετική κλίση προς τα εμπρός. Το πρόβλημα αυτό προκύπτει λόγω του σφάλματος φάσης που προκαλείται από την απόσταση μεταξύ των δύο ελικοειδών κεραιών σε συνάρτηση με το μήκος κύματος. Αντίθετα, η διαφορά φάσης στην οπίσθια κατεύθυνση της συστοιχίας (γκρίζο γράφημα στο πάνω μέρος) παρουσιάζει σχεδόν γραμμική συμπεριφορά, με σφάλμα φάσης περίπου +2,5% λόγω της γραμμικότητας που αποδίδεται στην ενσωμάτωση ενός προοδευτικού υπερβατικού δικτύου φάσης στον διαμορφωτή δέσμης. Στο Διάγραμμα 28 απεικονίζεται η απόκριση πλάτους της συστοιχίας όταν η προσομοίωση της φασικής στοιχειοκεραίας ακτινοβολεί προς τα μπρος (μπλε γράφημα) και προς τα πίσω (πορτοκαλί γράφημα). Επιπλέον, στο Διάγραμμα 29 απεικονίζεται ο λόγος μπρος-πίσω υπό ιδανικές συνθήκες για τον εξεταζόμενο διαμορφωτή δέσμης. Ο λόγος αυτός παρουσιάζει ελάχιστη τιμή 30dB στα 30 MHz και μέγιστη τιμή 37dB στα 20 MHz.



Διάγραμμα 27: Η διαφορά φάσης των δύο ελικοειδών κεραιών υπό ιδανικές συνθήκες.



Διάγραμμα 28: Το πλάτος της φασικής στοιχειοκεραίας προς τα εμπρός(μπλε) και προς τα πίσω(πορτοκαλί)



Διάγραμμα 29: Λόγος μπρος-πίσω της φασικής στοιχειοκεραίας σε ιδανικές συνθήκες.

Η μέση απόκριση του λόγου μπρος-πίσω μεταξύ 20-30 MHz είναι 33 dB. Παρά τις μικρές ανισοροπίες πλάτους μεταξύ των δύο LNA όσον αφορά τις θύρες εισόδου του διαμορφωτή δέσμης, ο λόγος μπρος-πίσω που επιτυγχάνεται υπό ιδανικές εργαστηριακές συνθήκες μπορεί να θεωρηθεί πολύ ικανοποιητικός[33]. Οι επόμενες ενότητες θα επικεντρωθούν στην αξιολόγηση της απόδοσης της ελικοειδούς φασικής στοιχειοκεραίας σε δοκιμές υπό πραγματικές συνθήκες.

3.3 Τελική αξιολόγηση της ελικοειδούς φασικής συστοιχίας

Για να επικυρωθεί η απόδοση της ελικοειδούς φασικής στοιχειοκεραίας, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες. Ως κεραία εκπομπής χρησιμοποιήθηκε ένα κάθετα πολωμένο μονόπολο, το οποίο εγκαταστάθηκε σε απόσταση 15λ από την ελικοειδή φασική στοιχειοκεραία. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε σήμα εκπομπής από μια γεννήτρια συχνοτήτων AGILENT N9310A και ενισχύθηκε από έναν ενισχυτή HF 2 W. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι η ελικοειδής φασική στοιχειοκεραία υποβλήθηκε σε δοκιμές τόσο σε κάθετη πόλωση, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 30, όσο και σε οριζόντια πόλωση, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 31. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν από τις δοκιμές καταγράφηκαν μετρήσεις της ισχύος σήματος των σημάτων HF στον αέρα με τη χρήση αναλυτή φάσματος (Tiny SA Ultra), όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 32. Μέσω πολλαπλών δοκιμών, η βέλτιστη απόδοση της συστοιχίας παρατηρήθηκε όταν οι δύο ελικοειδής κεραίες τοποθετήθηκαν

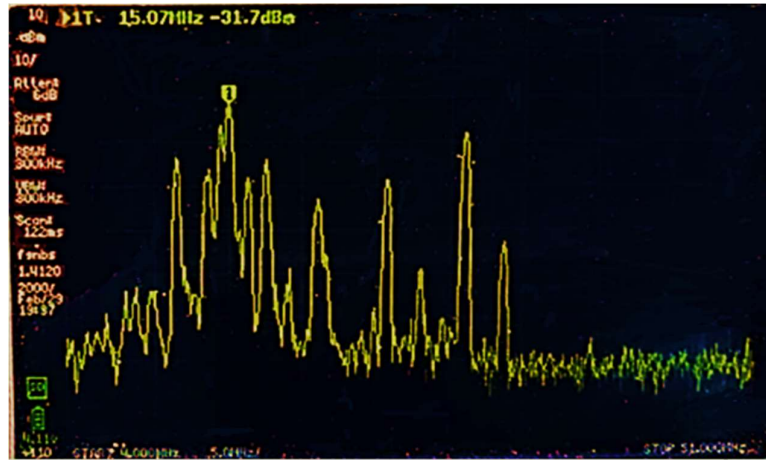
σε απόσταση 1,87 m μεταξύ τους. Αν και η ελικοειδής φασική συστοιχία σχεδιάστηκε αρχικά για να λειτουργεί στην περιοχή 20-30 MHz, οι τελικές δοκιμές απόδοσης πραγματοποιήθηκαν από τα 15 MHz για να εκτιμηθεί το εύρος ζώνης λειτουργίας της σε χαμηλότερες συχνότητες, όπου οι διαστάσεις της κεραίας παίζουν κρίσιμο ρόλο.



Διάγραμμα 30: Ελικώδης φασική στοιχειοκεραία υπό δοκιμή με κάθετη πόλωση

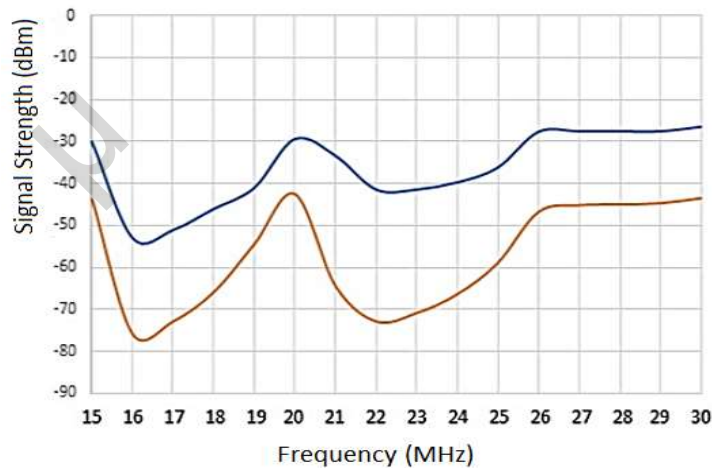


Διάγραμμα 31: : Ελικώδης φασική στοιχειοκεραία υπό δοκιμή με οριζόντια πόλωση

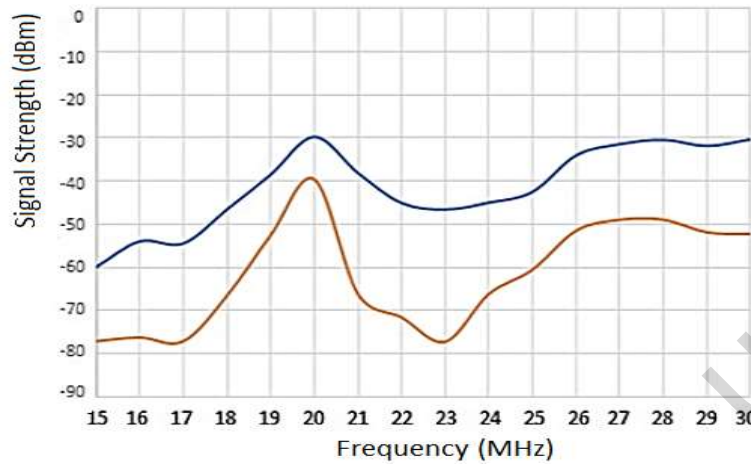


Διάγραμμα 32: Παρακολούθηση σημάτων HF από την ελικοειδής φασική στοιχειοκεραία στον αέρα με τη χρήση του Tiny SA Ultra

Το Διάγραμμα 33 απεικονίζει μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη φασική στοιχειοκεραία σε κάθετα πολωμένη διάταξη. Το μπλε γράφημα στην κορυφή αντιπροσωπεύει μετρήσεις για εμπρόσθια ακτινοβολία, ενώ το πορτοκαλί γράφημα στο κάτω μέρος απεικονίζει μετρήσεις για οπίσθια ακτινοβολία. Το Διάγραμμα 34 δείχνει αντίστοιχες μετρήσεις της φασική στοιχειοκεραίας που δοκιμάστηκε σε οριζόντια πολωμένη διάταξη. Όπως απεικονίζεται στα Διαγράμματα, ο αξονικός λόγος της φασική στοιχειοκεραίας αποκλίνει από τη μονάδα μόνο κάτω από τα 15 MHz.

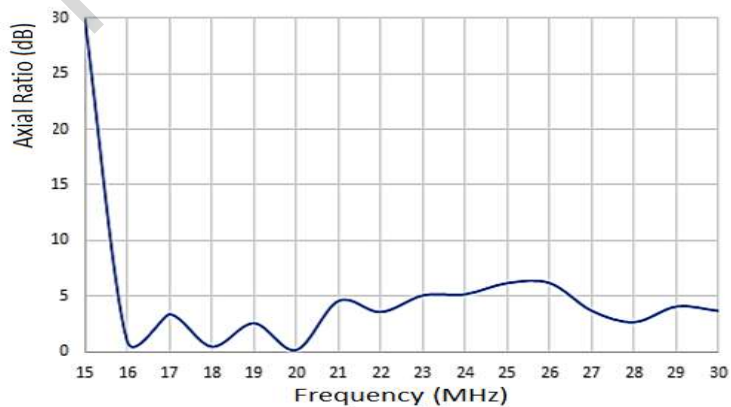


Διάγραμμα 33: Μετρήσεις πλάτους της Φασική στοιχειοκεραία δοκιμασμένη σε κάθετη διάταξη.



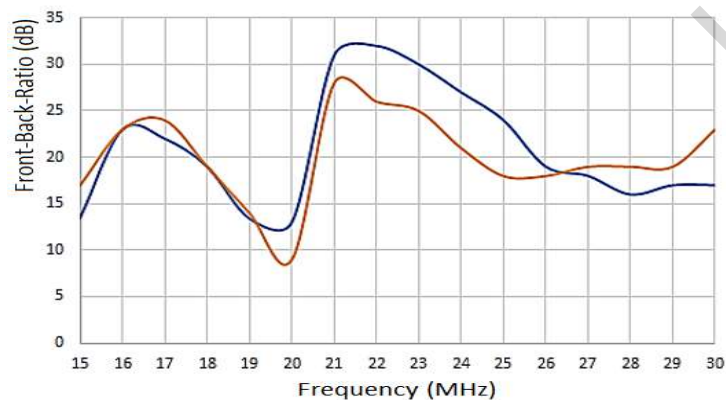
Διάγραμμα 34: Μετρήσεις πλάτους της Φασική στοιχειοκεραία δοκιμασμένη σε κάθετη διάταξη.

Οι μετρούμενες τιμές της διαφοράς πλάτους μεταξύ των δύο πολώσεων, παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 35 για τον προσδιορισμό του αξονικού λόγου της συστοιχίας. Όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 35, ο αξονικός λόγος παρουσιάζει μέγιστη απόκλιση από τη μονάδα περίπου 6 dB στα 26 MHz εντός των μεσαίων συχνοτήτων. Επιπλέον, στα 16 MHz, 18 MHz και 20 MHz, ο αξονικός λόγος προσεγγίζει ιδανικά τα 0 dB. Η χειρίστη απόδοση παρατηρήθηκε στα 15 MHz, όπου ο αξονικός λόγος έφτασε τα 30 dB, υποδεικνύοντας ότι η ελικοειδής συστοιχία συμπεριφέρθηκε ως γραμμικά πολωμένη κεραία, όπως αναμενόταν.



Διάγραμμα 35: Η απόκριση του αξονικού λόγου της φασικής στοιχειοκεραίας

Ο λόγος μπρος-πίσω της ελικοειδούς φασικής στοιχειοκεραίας σε κάθετη και οριζόντια πόλωση μεταξύ 15 MHz και 30 MHz προσδιορίστηκε από τις τιμές των μετρήσεων, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 36. Τα μπλε και πορτοκαλί διαγράμματα αντιστοιχούν σε μετρήσεις κάθετης και οριζόντιας πόλωσης, αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 36, τα δύο διαγράμματα βρίσκονται σε ισορροπία. Για την κάθετη πόλωση, η απόκριση του λόγου μπρος-πίσω ήταν 33 dB στα 21 MHz και 22 MHz. Στα 20 MHz, η απόκριση του λόγου μπρος-πίσω ήταν 13 dB για την κάθετη πόλωση και 8 dB για την οριζόντια πόλωση.



Διάγραμμα 36: Η απόκριση του λόγου μπρος-πίσω της φασικής στοιχειοκεραίας.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι όλες οι τελικές δοκιμές της συστοιχίας πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό χώρο σε περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις. Ωστόσο, ορισμένες από τις μετρήσεις μας επηρεάστηκαν από εισερχόμενα σήματα στον αέρα. Παρ' όλα αυτά, η απόκριση του λόγου μπρος-πίσω της ελικοειδούς φασικής στοιχειοκεραίας είναι πολύ ικανοποιητική, ιδίως αν ληφθεί υπόψη το εξαιρετικά συμπαγές μέγεθός της.

4 Συμπερασματικές παρατηρήσεις

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μιας συμπαγούς γεωμετρίας ευρείας ζώνης κυκλικά πολωμένης φασικής στοιχειοκεραίας ικανής να παρέχει βέλτιστη απόδοση σε όλο το φάσμα HF, όπου οι διαστάσεις της κεραίας αποτελούν περιοριστικό παράγοντα. Οι κατευθυντικές κεραίες παρακολούθησης HF μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές για τον εμπλουτισμό των υφιστάμενων

μοντέλων φασματικής κάλυψης HF με αξιμουθιακές παραμέτρους [34]. Εξετάστηκαν βασικά ζητήματα σχεδιασμού, όπως η χρήση ενισχυτών χαμηλού θορύβου (LNA) με υψηλή αντίσταση εισόδου και η βελτιστοποίηση του διαμορφωτή δέσμης. Μέσω ολοκληρωμένων δοκιμών και αξιολόγησης, συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων σύνθετης αντίστασης, μελετών προσομοίωσης και αξιολόγησης επιδόσεων σε πραγματικές συνθήκες, καταδείχθηκε η σημασία της προτεινόμενης φασικής στοιχειοκεραίας. Παρά το μικρό μέγεθος της φασικής στοιχειοκεραίας, επιτυγχάνει έναν εντυπωσιακό μέσο αξονικό λόγο 2 dB, υποδεικνύοντας αξιοσημείωτη απόδοση. Οι ενεργές ελικοειδείς κεραίες, σε συνδυασμό με ένα LNA υψηλής αντίστασης εισόδου και αρνητικής ανατροφοδότησης, παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, αναδεικνύοντας την καταλληλότητά τους σε εφαρμογές ευρυζωνικής παρακολούθησης. Επιπλέον, μεγιστοποιήθηκε ο λόγος μπρος-πίσω και επεκτάθηκε πέρα από το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων (20 MHz έως 30 MHz), μέχρι και τα 15 MHz. Ο μέσος λόγος μπρος-πίσω αυτής της ελικοειδούς φασικής στοιχειοκεραίας μετρήθηκε στα 21 dB όταν λειτουργεί με κάθετη πόλωση και στα 20 dB με οριζόντια πόλωση μεταξύ 15 MHz και 30 MHz. Δεδομένου του συμπαγούς μεγέθους της φασικής στοιχειοκεραίας, ο σχεδιασμός αυτός αποδεικνύεται πλεονεκτικός για συχνότητες όπου οι διαστάσεις μιας κεραίας παρακολούθησης είναι κρίσιμες. Μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε διαμόρφωση τετραγωνικής ή κυκλικής φασικής στοιχειοκεραίας, παρέχοντας αυξημένο κέρδος και ανώτερη απόκριση λόγου μπρος-πίσω σε περιορισμένους χώρους, όπου η εγκατάσταση μιας αντίστοιχης παθητικής κατευθυντικής φασικής στοιχειοκεραίας κυκλικής πόλωσης θα ήταν ανέφικτη. Μελλοντικές έρευνες μπορούν να επικεντρωθούν στην περαιτέρω βελτιστοποίηση του συστήματος για συγκεκριμένα επιχειρησιακά σενάρια και στην επέκταση των δυνατοτήτων του για την αντιμετώπιση των αναδυόμενων προκλήσεων στην παρακολούθηση του φάσματος HF και τον μετριασμό των παρεμβολών στις ζώνες των 30 και 60 μέτρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. Q. Dinh, N. Michishita, Y. Yamada, and K. Nakatani, “Electrical characteristics of a very small normal mode helical antenna mounted on a wheel in the TPMS application, ” in 2009.
- [2] Robert. C. Hansen, Microwave Scanning Antennas: Array Theory and Practice: Vol. II, Peninsula Publishing, 1985.
- [3] John D. Kraus, Antennas, 2ed, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1988.
- [4] J.L Allen and B.L. Diamond, “Mutual Coupling in Array Antenna,” Technical Report EDS-66- 443, Lincoln Lab., MIT, October 4, 1966.
- [5] Antennas In Practice Em Fundamentals And Antenna Selection Alan Robert Clarkandr’E P C Fourie Version 1.4, December 23, 2002
- [6] Constantine A. Balanis ,Antenna Theory Analysis and Design, 3ed, Arizona State University, Tempe, AZ
- [7] Robert Mailloux, Phased array antenna handbook, Norwood, MA: Artech House 2018
- [8] Steyskal H. and Herd J.S., “Mutual coupling compensation in small array antennas,” IEEE Trans. Antennas Propagat., P-38, no. 12, pp. 1971-1975, 1990.
- [9] Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare David L. Adamy
- [10] Constantine A. Balanis, Modern Antenna Handbook, 1938
- [11] A New Approach to Active Antenna Design Ernst h. Nordholt and Nurk Nan Willigen, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. ap-28, no. 6, November 1980
- [12] Igor Shirokov, Elena Shirokova, Active Antenna, Electronics Engineering Department Sevastopol State University Sevastopol, Russia, 2018
- [13] Ldmos Technology For Rf Power Amplifiers S. J. C. H. Theeuwen And J. H. Qureshi Ampleon, Halfgeleiderweg 8, 6534 Av, Nijmegen, The Netherlands

- [14] Jordi Salazar, Santiago Silvestre, Internet of thing, Czech Technical University of Prague Faculty of electrical engineering,2017
- [15] Jagadeesh V.K, Santhosh Kumar S, Design of Normal mode Helical Antenna using Neural Networks, Dept. of Electronics and Communication Engineering, 2011
- [16] Helical antenna - abhinav. (n.d).
https://astro.abhinav.ac.in/Literature/Antennae/Kraus_Helix_Idea.pdf
- [17] EZNEC antenna software by W7EL.
- [18] Nanovna. NanoRFE. (2023, October 5). <https://nanorfe.com/nanovna-v2.html>
- [19] Brown, M. Reflection coefficient calculator. 3ROAM. 2023, February 7.
- [20] Frenzel, L. Back to basics: Impedance Matching (Part 3), Electronic Design.
- [21] BF256B.rev2 - n-channel JFET RF amplifier - onsemi. (n.d.-a).
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bf256b-d.pdf>
- [22] P2N2222A amplifier transistors - onsemi. (n.d.-c).
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/p2n2222a-d.pdf>
- [23] Multisim Live Online Circuit Simulator (no date) NI Multisim Live. Available at:
- [24] RF amplifier stability factors and stabilization techniques - technical articles All About Circuits.
- [25] Engdahl, S. (2012) Electronic devices. Detroit: Greenhaven Press.
- [26] Rohde & Schwarz GmbH & Co KG. (n.d.). R&S®HE016 active antenna system. Rohde & Schwarz. https://www.rohde-schwarz.com/us/products/aerospace-defense-security/omnidirectional-mobile-and-semi-mobile/rs-he016-active-antenna-system_63493-9365.html
- [27] EM510 HF digital wideband receiver - AB4OJ. (n.d.-a).
https://www.ab4oj.com/dl/rs/EM510_dat_en.pdf
- [28] Mailloux, R.J. (2018) Phased array antenna handbook. Norwood, MA: Artech House.
- [29] Addition of vectors by means of components - physics (2021) YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=xS-gdFgZel0> (Accessed: 06 April 2024).

- [30] High-pass low-pass phase shifters.
<https://www.microwaves101.com/encyclopedias/high-pass-low-pass-phase-shifters>
- [31] Plug-in power splitter/combiner PSCQ-2-51W+ - mini-circuits. (n.d.-e).
<https://www.minicircuits.com/pdfs/PSCQ-2-51W+.pdf>
- [32] The cascade amplifier: Bipolar junction transistors: Electronics textbook All About Circuits. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-4/cascode-amplifier/> (Accessed: 16 April 2024).
- [33] Rohde & Schwarz GmbH & Co KG (no date) Monitoring antennas, Monitoring antennas | Rohde & Schwarz. Available at: https://www.rohde-schwarz.com/products/aerospace-defense-security/monitoring-antennas_229505.html
- [34] Mostafa, G.; Tsolaki, E.; Haralambous, H. HF Spectral Occupancy Time Series Models Over the Eastern Mediterranean Region. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2016, 59, 240–248.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν

Όνομα	Κωδικός
Γεννήτρια συχνοτήτων	Agilent N9310A
Φασματογράφοι	(1)Agilent N9320A (2)TinySA Ultra
Διανυσματικός αναλυτής Δικτύου	Nano VNA-FV2
Ψηφιακός δέκτης HF EM510	Rohde & Schwarz HF EM510
Κεραία διπλής πόλωσης (HE016)	Rohde & Schwarz HE016
Παλμογράφος	Tektronix TDS2014B
Τροφοδοτικά εργαστηρίου	