

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ  
ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ NEC



Του φοιτητή  
Μπαγντασαριάν Φίλιππου  
Αρ. Μητρώου: ele515094

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια  
Ιωαννίδου Μελίνα

Ιανουάριος 2026

Τίτλος Π.Ε.: Ανάλυση και σχεδίαση γραμμικών κεραιών με το λογισμικό Nec  
Κωδικός Π.Ε. 20242

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Μπαγκντασαριάν Φίλιππος

Όνοματεπώνυμο εισηγήτριας: Δρ Μελίνα Ιωαννίδου

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 13/03/2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 30/01/2026

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών του ΔΙ.ΠΑ.Ε. Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μπαγκντασαριάν Φίλιππου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Στους γονείς μου και στους φίλους μου

## Πρόλογος

Οι κεραιές αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, καθώς επιτρέπουν τη μετάδοση και λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον χώρο. Ανάμεσα στους διάφορους τύπους κεραιών, οι γραμμικές κεραιές έχουν διαχρονικά κεντρίσει το ενδιαφέρον ερευνητών και μηχανικών λόγω της απλότητας, της αποδοτικότητας και της ευελιξίας τους σε ποικίλες εφαρμογές, από την επίγεια ραδιοεπικοινωνία έως τις δορυφορικές και στρατιωτικές τεχνολογίες.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και τη σχεδίαση γραμμικών κεραιών με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης 4nec2, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των ρευμάτων στιγμιαίων στοιχείων (NEC – Numerical Electromagnetics Code). Για κάθε τύπο κεραιάς που εξετάζεται –το δίπολο μισού μήκους κύματος, η διάταξη Broadside, η διάταξη Endfire, η διάταξη Phased Array, η κεραιά LPDA (Log-Periodic Dipole Array) και η ελικοειδής κεραιά (Axial Mode) – ακολουθείται συγκεκριμένη μεθοδολογία: ιστορική αναδρομή, παρουσίαση της διάταξης, ανάλυση της ακτινοβολίας, εφαρμογές, μαθηματικό μοντέλο, προσομοίωση με NEC και τελική σύγκριση θεωρητικών και προσομοιωμένων αποτελεσμάτων.

Μέσω αυτής της συστηματικής προσέγγισης, επιδιώκεται όχι μόνο η κατανόηση της θεωρητικής βάσης των γραμμικών κεραιών, αλλά και η πρακτική εξοικείωση με τις τεχνικές μοντελοποίησης και αξιολόγησης της απόδοσής τους, συμβάλλοντας έτσι στην εμπάθυνση της γνώσης στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και των ραδιοεπικοινωνιών.

## Περίληψη

Μπαγντασαριάν Φίλιππος: Ανάλυση και σχεδίαση γραμμικών κεραιών με το λογισμικό Nec  
(Με την επίβλεψη της Καθηγήτριας κας. Ιωαννίδη Μελίνας)

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και τη σχεδίαση γραμμικών κεραιών με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης κεραιών 4nec2, το οποίο βασίζεται στον αλγόριθμο NEC (Numerical Electromagnetics Code). Στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση της λειτουργίας διαφόρων τύπων κεραιών, καθώς και η μελέτη βασικών χαρακτηριστικών τους, όπως το διάγραμμα ακτινοβολίας, η κατευθυντικότητα, η απολαβή και η προσαρμογή. Αρχικά, μελετάται η διπολική κεραία μισού μήκους κύματος, η οποία χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη σύγκριση με πιο σύνθετες διατάξεις. Στη συνέχεια, αναλύονται στοιχειοκεραίες γραμμικής διάταξης, όπως οι κεραιές Broadside και End-fire, με ιδιαίτερη προσοχή στον ρόλο της γεωμετρίας και της φασικής τροφοδοσίας στη διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας. Αναφορά γίνεται επίσης στις κεραιές Phased Array, όπου η κατεύθυνση του λοβού μπορεί να μεταβάλλεται μέσω της ρύθμισης των φάσεων τροφοδοσίας. Επιπλέον, γίνεται προσομοίωση για την ευρυζωνική κεραία Log-Periodic Dipole Array (LPDA), καθώς και για την ελικοειδή κεραία σε λειτουργία Axial Mode. Γράφεται κώδικας για την γεωμετρική περιγραφή των κεραιών, ο οποίος είναι μοναδικός για το λογισμικό 4nec2. Με τον κώδικα επίσης γίνεται η περιγραφή άλλων χαρακτηριστικών των κεραιών όπως η συχνότητα λειτουργίας και το μήκος των διπόλων. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία των κεραιών και να πραγματοποιηθεί συντονισμός, χρησιμοποιείται το εργαλείο optimizer, καθώς και κατάλληλα φίλτρα. Τέλος, γίνεται σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών αποτελεσμάτων και των προσομοιώσεων των κεραιών, διαπιστώνοντας πολύ καλή συμφωνία.

Λέξεις Κλειδιά: Γραμμικές κεραιές, Στοιχειοκεραίες, LPDA, Ελικοειδής κεραία, Προσομοίωση κεραιών (4nec2)

## **Abstract**

Bagntasarian Filippos: Study and analysis of electric vehicle chargers.

(Under the supervision of Professor Melina Ioannidi)

This dissertation focuses on the analysis and design of linear antennas using the antenna simulation software 4nec2, which is based on the NEC (Numerical Electromagnetics Code) algorithm. The objective of this work is to understand the operation of different types of antennas and to study their basic characteristics, such as radiation pattern, directivity, gain, and impedance matching. Initially, the half-wave dipole antenna is studied and used as a reference for comparison with more complex antenna configurations. Subsequently, linear antenna arrays such as Broadside and End-fire antennas are analyzed, with particular attention given to the role of geometry and phase excitation in shaping the radiation pattern. Reference is also made to phased array antennas, where the direction of the main lobe can be varied by adjusting the phase of the feeding signals. In addition, simulations are performed for the broadband Log-Periodic Dipole Array (LPDA) antenna, as well as for the helical antenna operating in axial mode. Code is written for the geometric description of the antennas, which is specific to the 4nec2 software. The code is also used to define other antenna parameters, such as operating frequency and dipole length. In order to optimize antenna performance and achieve proper tuning, the optimizer tool and appropriate filters are used. Finally, a comparison between the theoretical results and the simulation results is carried out, showing very good agreement.

Key words: Linear antennas, Antenna arrays. LPDA, Helical antennas. Antenna simulation (4nec2)

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να απευθύνω ένα ολόψυχο ευχαριστώ σε όσους στάθηκαν δίπλα μου σε αυτή την προσπάθεια και με βοήθησαν να τη φέρω σε πέρας.

Πρώτα απ' όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα μου, Καθηγήτρια κ. Ιωαννίδα Μελίνα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για την υποστήριξη, υπομονή, κατανόηση και ενθάρρυνση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της συγκεκριμένης διατριβής. Επί της ευκαιρίας θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους υπολοίπους καθηγητές και καθηγήτριές μου στο τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών για όλα όσα έμαθα κοντά τους.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τους γονείς μου αλλά και τους φίλους μου Γλυκερία και Δημήτρη για τις πολύτιμες συμβουλές τους, αλλά και την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες .....	7
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	8
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή.....	11
1.1. Γενικά .....	11
1.2. Εισαγωγή στις κεραίες και στη μελέτη των χαρακτηριστικών τους .....	11
1.3. Δομή της εργασίας.....	12
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Δίπολο Μισού Μήκους Κύματος.....	13
2.1 Εισαγωγή .....	13
2.2. Μαθηματική ανάλυση κεραίας.....	15
2.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2: απεικονίσεις της προσομοίωσης και περιγραφή του κώδικα.....	16
2.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.....	18
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Στοιχειοκεραίες .....	22
3.1 Εισαγωγή στις Στοιχειοκεραίες.....	22
3.2. Κεραίες Broadside .....	22
3.2.1. Περιγραφή κεραίας Broadside.....	22
3.2.2. Μαθηματικοί υπολογισμοί.....	24
3.2.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2.....	25
3.2.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.....	26
3.3. Κεραίες End-fire.....	30
3.3.1. Περιγραφή κεραίας End-fire.....	30
3.3.2. Μαθηματική ανάλυση κεραίας.....	32
3.3.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2 - Απεικονίσεις της προσομοίωσης.....	32
3.3.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.....	33
3.4. Κεραίες Phased Array .....	36
3.4.1. Περιγραφή κεραίας Phased Array.....	36
3.4.2. Μαθηματική ανάλυση κεραίας.....	38
3.4.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2 - Απεικονίσεις της προσομοίωσης.....	40
3.4.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.....	41
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Κεραία LPDA .....	44
4.1. Περιγραφή κεραίας LPDA .....	44
4.2. Μαθηματική ανάλυση κεραίας LPDA .....	46
4.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2 - Απεικονίσεις της προσομοίωσης.....	50

4.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα. ....	51
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> : Ελικοειδής κεραία σε Axial Mode.....	54
5.1. Περιγραφή ελικοειδούς κεραίας Axial Mode.....	54
5.2. Μαθηματική ανάλυση ελικοειδούς κεραίας Axial Mode.....	56
5.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2 - Απεικονίσεις της προσομοίωσης.....	57
5.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα. ....	58
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> : Συμπεράσματα και προτάσεις.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Σύγκριση Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Δίπολο) .....	20
Πίνακας 3.1: Σύγκριση Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία Broadside).....	29
Πίνακας 3.2: Σύγκριση Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία End-fire).....	36
Πίνακας 3.3: Κεραία Phased Array - Φάσεις για Κατεύθυνση 30°.....	39
Πίνακας 3.4: Κεραία Phased Array - Φάσεις για Κατεύθυνση 72°.....	39
Πίνακας 3.5: Σύγκριση Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία Phased Array) για κατεύθυνση 30 και 72 μοιρών.....	43
Πίνακας 4.1: Κεραία LPDA – Μήκη διπόλων και γεωμετρική θέση.....	49
Πίνακας 4.2: Σύγκριση Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία LPDA).....	53
Πίνακας 5.1 Σύγκριση Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία LPDA).....	62

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Δίπολο $\lambda/2$ .....	12
Σχήμα 2.2 Δίπολο $\lambda/2$ .....	13
Σχήμα 2.3 Κεραία ραδιοφώνου – Εφαρμογή διπόλου $\lambda/2$ .....	14
Σχήμα 2.4 Κώδικας 4nec2.....	16
Σχήμα 2.5 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων.....	17
Σχήμα 2.6 Παράθυρο Optimizer .....	18
Σχήμα 2.7 Παράθυρο Optimizer μετά τη βελτιστοποίηση.....	18
Σχήμα 2.8. Κώδικας μετά το Optimizer.....	19
Σχήμα 2.9 Αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση του κώδικα.....	19
Σχήμα 2.10 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz.....	20
Σχήμα 3.1: Διάταξη κεραιών τύπου Broadside .....	22
Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Broadside .....	23
Σχήμα 3.3 Εφαρμογή κεραίας τύπου Broadside.....	24
Σχήμα 3.4 Κώδικας 4nec2.....	25
Σχήμα 3.5 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων.....	26
Σχήμα 3.6 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz .....	26
Σχήμα 3.7 Παράθυρο Optimizer.....	27
Σχήμα 3.8 Αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση του κώδικα.....	27
Σχήμα 3.9 Κέρδος κεραίας Broadside στην συχνότητα συντονισμού.....	28
Σχήμα 3.10 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz.....	28

Σχήμα 3.11 Τρισδιάστατη μορφή σήματος Broadside.....	29
Σχήμα 3.12 Διάταξη κεραιών τύπου End-fire.....	30
Σχήμα 3.13. Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς End-fire.....	31
Σχήμα 3.14 Εφαρμογή κεραιάς τύπου End-fire .....	31
Σχήμα 3.15 Κώδικας 4nec2.....	33
Σχήμα 3.16 Παράθυρο optimizer.....	34
Σχήμα 3.17 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων.....	34
Σχήμα 3.18 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz πριν τον συντονισμό.....	35
Σχήμα 3.19 Τρισδιάστατη μορφή σήματος End-fire.....	35
Σχήμα 3.20 Διάταξη κεραιών τύπου Phased Array.....	37
Σχήμα 3.21 Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς Phased Array.....	37
Σχήμα 3.22 Εφαρμογή κεραιάς τύπου Phased Array .....	38
Σχήμα 3.23 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων.....	40
Σχήμα 3.24 Κώδικας 4nec2.....	40
Σχήμα 3.25 Αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση του κώδικα.....	41
Σχήμα 3.26 Κέρδος κεραιάς Phased Array στην συχνότητα συντονισμού.....	42
Σχήμα 3.27 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz πριν τον συντονισμό και μετά.....	42
Σχήμα 4.1: Διάταξη κεραιών τύπου LPDA.....	45
Σχήμα 4.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραιών τύπου LPDA.....	45
Σχήμα 4.3 Εφαρμογές κεραιάς τύπου LPDA.....	46
Σχήμα 4.4 Συντελεστής θέσης και συντελεστής κλίμακας.....	47
Σχήμα 4.5 Κώδικας 4nec2.....	50
Σχήμα 4.6 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων στα 680 MHz και 2.5 GHz.....	51
Σχήμα 4.7 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 680 MHz και στα 2.5 GHz στον συντονισμό.....	51
Σχήμα 4.8 Κέρδος κεραιάς LPDA στην συχνότητα συντονισμού στα 680 MHz και στα 2.5 GHz.....	52
Σχήμα 4.9 Τρισδιάστατες μορφές LPDA με ενεργά δίπολα για τα 680 MHz και για τα 2.5 GHz.....	52
Σχήμα 5.1: Διάταξη ελικοειδών κεραιών Axial mode.....	55
Σχήμα 5.2 Διάγραμμα ακτινοβολίας ελικοειδών κεραιών Axial mode.....	55
Σχήμα 5.3 Εφαρμογές ελικοειδούς κεραιάς Axial mode.....	55
Σχήμα 5.4 Κώδικας 4nec2 γεωμετρίας ελικοειδούς κεραιάς .....	57
Σχήμα 5.5 Κώδικας 4nec2 ανακλαστήρα κεραιάς.....	58
Σχήμα 5.6 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων.....	59
Σχήμα 5.7 Παράθυρο φίλτρων.....	59
Σχήμα 5.8 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων στα 2.4 GHz.....	60
Σχήμα 5.9 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 2.4 GHz στον συντονισμό.....	60
Σχήμα 5.10 Κέρδος ελικοειδούς κεραιάς Axial Mode στην συχνότητα συντονισμού στα 2.4 GHz.....	61
Σχήμα 5.11 Τρισδιάστατη μορφή ελικοειδούς κεραιάς Axial Mode.....	61

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

## 1.1. Γενικά

Η εργασία ξεκινάει, αρχικά με τη μελέτη, και στη συνέχεια τη σχεδίαση γραμμικών κεραιών αρχίζοντας από απλά δίπολα και στην συνέχεια άλλες γραμμικές κεραιές όπως η Broadside, η Endfire, η Phased Array, η LPDA (Log-Periodic Dipole Array) και η ελικοειδής κεραία (Axial Mode). Θα πραγματοποιηθεί απεικόνιση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας των κεραιών και των χαρακτηριστικών τους ως στοιχεία κυκλώματος όπως ο συντελεστής ανάκλασης και η αντίσταση εισόδου, θα χρησιμοποιηθεί και η δυνατότητα βελτιστοποίησης (optimization) που παρέχει το πρόγραμμα 4nec2. Όσον αφορά τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα αυτή ήταν: χρήσιμα στοιχεία από βιβλία, καθώς και άρθρα και έρευνες στο διαδίκτυο πάνω στο αντικείμενο των γραμμικών κεραιών. Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας, διεξήχθη προσομοίωση των γραμμικών κεραιών που προαναφέρθηκαν μέσω του λογισμικού 4nec2. Το 4nec2 είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο και αποτελεί ένα εύχρηστο και αξιόπιστο λογισμικό για την ανάλυση και τη σχεδίαση κεραιών.

## 1.2. Εισαγωγή στις κεραιές και στη μελέτη των χαρακτηριστικών τους.

Οι κεραιές αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο κάθε συστήματος ασύρματης επικοινωνίας, καθώς ευθύνονται για την εκπομπή και λήψη όπως και την μετατροπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα. Η αποδοτικότητα μιας κεραιάς εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η κατευθυντικότητα, το κέρδος, το εύρος ζώνης και η αντίσταση εισόδου. Η μελέτη των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας μιας κεραιάς είναι σημαντική για την κατανόηση της συμπεριφοράς της, ενώ η σωστή σχεδίαση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος επικοινωνίας [1].

Οι γραμμικές κεραιές αποτελούν μια κατηγορία κεραιών στις οποίες τα στοιχεία τοποθετούνται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής. Αυτού του είδους οι κεραιές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές όπου απαιτείται έλεγχος της κατευθυντικότητας και διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας μέσω φασικής εκπομπής ή γεωμετρικής διάταξης των στοιχείων. Χαρακτηρίζονται από την ευκολία στην ανάλυση και υλοποίηση, αλλά και από την ικανότητα δημιουργίας πολύπλοκων σχημάτων ακτινοβολίας μέσω τεχνικών σύνθεσης διατάξεων [2].

Μεταξύ των γραμμικών κεραιών, το απλό δίπολο είναι το πιο βασικό στοιχείο, το οποίο χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για άλλες διατάξεις. Οι στοιχειοκεραίες θεωρούνται από τις πιο αποδοτικές μεθόδους σχεδίασης, επειδή μας επιτρέπουν την επίτευξη ενισχυμένων χαρακτηριστικών ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, οι στοιχειοκεραίες Broadside και Endfire χρησιμοποιούν πολλαπλά στοιχεία για να δημιουργήσουν διαγράμματα ακτινοβολίας αντίστοιχα κάθετα και παράλληλα προς τον άξονα τους. Οι Phased Arrays επιτυγχάνουν κατευθυντικότητα μεταβάλλοντας τις σχετικές φάσεις των σημάτων στα στοιχεία τους. Η Log-Periodic Dipole Array (LPDA) κεραία προσφέρει ευρεία ζώνη συχνοτήτων, ενώ η ελικοειδής κεραία σε λειτουργία Axial Mode είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε κυκλικά πολωμένα σήματα και χρησιμοποιείται συχνά σε δορυφορικές εφαρμογές [1, 3, 4].

Το 4nec2 αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα εργαλεία για τη σχεδίαση και προσομοίωση κεραιών, βασισμένο στον αλγόριθμο NEC (Numerical Electromagnetics Code). Παρέχει στον

χρήστη τη δυνατότητα μοντελοποίησης κεραιών, υπολογισμού του διαγράμματος ακτινοβολίας, του συντελεστή ανάκλασης, της αντίστασης εισόδου και άλλων χαρακτηριστικών. Επιπλέον, έχει ενσωματωμένα εργαλεία για την εύρεση ιδανικών διαστάσεων ή φασικών ρυθμίσεων [5, 6].

### 1.3. Δομή της εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως θέμα την ανάλυση και τη σχεδίαση γραμμικών κεραιών με το λογισμικό 4nec2. Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται ο σκοπός και η μεθοδολογία ενώ αναφέρονται κάποια συμπεράσματα από βιβλιογραφικές πηγές. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται καταρχήν μία εισαγωγή πάνω στις κεραιές μισού μήκους κύματος καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, την ακτινοβολία και τις εφαρμογές τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η μαθηματική ανάλυση και προσομοίωση της κεραιάς καθώς και η επεξήγηση των εντολών που χρησιμοποιήθηκαν ενώ στο τέλος θα λάβει χώρα η σύγκριση του Μαθηματικού Μοντέλου και της προσομοίωσης της συγκεκριμένης κεραιάς σε 4nec2 καθώς και οι απεικονίσεις της προσομοίωσης μαζί με την περιγραφή του κώδικα και των αποτελεσμάτων.

Το τρίτο κεφάλαιο ανήκει αποκλειστικά στις στοιχειοκεραίες. Μετά την εισαγωγή ακολουθεί η περιγραφή των χαρακτηριστικών τους ως προς τη διάταξη, την ακτινοβολία και τις εφαρμογές τους. Στη συνέχεια, διεξάγεται η μαθηματική ανάλυση και προσομοίωση των κεραιών ενώ στο τέλος λαμβάνει χώρα η σύγκριση του Μαθηματικού Μοντέλου και της προσομοίωσης των συγκεκριμένων κεραιών σε 4nec2 καθώς και οι απεικονίσεις της προσομοίωσης μαζί με την περιγραφή του κώδικα και των αποτελεσμάτων.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στην κεραιά LPDA. Μετά την εισαγωγή ακολουθεί η περιγραφή των χαρακτηριστικών της ως προς τη διάταξη, την ακτινοβολία και τις εφαρμογές της. Στη συνέχεια, διεξάγεται η μαθηματική ανάλυση και προσομοίωση της κεραιάς ενώ στο τέλος λαμβάνει χώρα η σύγκριση του Μαθηματικού Μοντέλου και της προσομοίωσης της συγκεκριμένης κεραιάς σε 4nec2 καθώς και οι απεικονίσεις της προσομοίωσης μαζί με την περιγραφή του κώδικα και των αποτελεσμάτων.

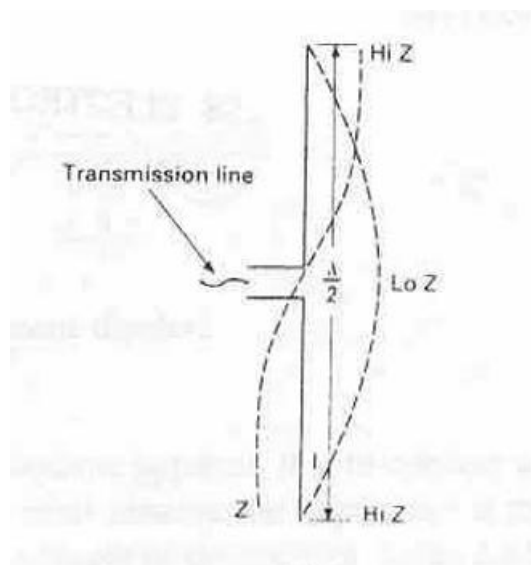
Το πέμπτο κεφάλαιο ανήκει στην ελικοειδή κεραιά. Καταρχήν στην εισαγωγή περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της ως προς την διάταξη, την ακτινοβολία και τις εφαρμογές της. Στη συνέχεια, διεξάγεται η μαθηματική ανάλυση και προσομοίωση της κεραιάς ενώ στο τέλος λαμβάνει χώρα η σύγκριση του Μαθηματικού Μοντέλου και της προσομοίωσης της συγκεκριμένης κεραιάς σε 4nec2 καθώς και οι απεικονίσεις της προσομοίωσης μαζί με την περιγραφή του κώδικα και των αποτελεσμάτων. Η εργασία κλείνει με τα συμπεράσματα, τις προτάσεις και τα παραρτήματα.

## Κεφάλαιο 2º: Δίπολο Μισού Μήκους Κύματος

### 2.1 Εισαγωγή

Μία από τις πιο απλές κεραιές που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι η διπολική κεραιά. Αποτελείται από δύο ίσα σε μήκος αγώγιμα στοιχεία τα οποία ακτινοβολούν ραδιοκύματα όταν οδηγούνται από ηλεκτρικό σήμα [7]. Όταν ο αγωγός έρθει σε διέγερση με ηλεκτρικό ρεύμα, τότε ακτινοβολεί ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, ενώ όταν δέχεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, παράγει ρεύμα. Όταν η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια RF συχνοτήτων διοχετεύεται σε μη προσαρμοσμένη γραμμή μεταφοράς δημιουργούνται στάσιμα κύματα, αποτέλεσμα των οποίων είναι η απώλεια ενέργειας και η εκπομπή της στον περιβάλλοντα χώρο της γραμμής μεταφοράς. Άρα, είναι σαφές ότι η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί φαινόμενο το οποίο είναι ανεπιθύμητο κατά τη μετάδοση της ενέργειας [8].

Στοιχειώδες δίπολο ή δίπολο του Hertz ονομάζεται η στοιχειώδης εκείνη κεραιά η οποία αποτελείται από ένα στοιχειώδη κυλινδρικό αγωγό που έχει αμελητέα διατομή και ο οποίος διαρρέεται από σταθερό σε όλο το μήκος του ρεύμα, το οποίο όμως είναι χρονικά μεταβαλλόμενο [9]. Πρόκειται για έναν αγωγό διαρρέομενο από εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας, του οποίου το φυσικό μήκος είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα του ρεύματος που τον διαρρέει [8]. Με άλλα λόγια, αν συμβολιστεί το φυσικό μήκος του αγωγού με  $L$  και το μήκος κύματος με  $\lambda$ , τότε το δίπολο μπορεί να θεωρηθεί στοιχειώδες αν ισχύει η ανισότητα  $L \ll \lambda$ . Η βασική του χρήση είναι να βοηθά στη θεωρητική μελέτη των κεραιών καθώς αποτελεί το πρότυπο βάσει του οποίου γίνεται η σύγκριση και ο ορισμός των χαρακτηριστικών όλων των κεραιών που χρησιμοποιούνται στην πράξη [10].

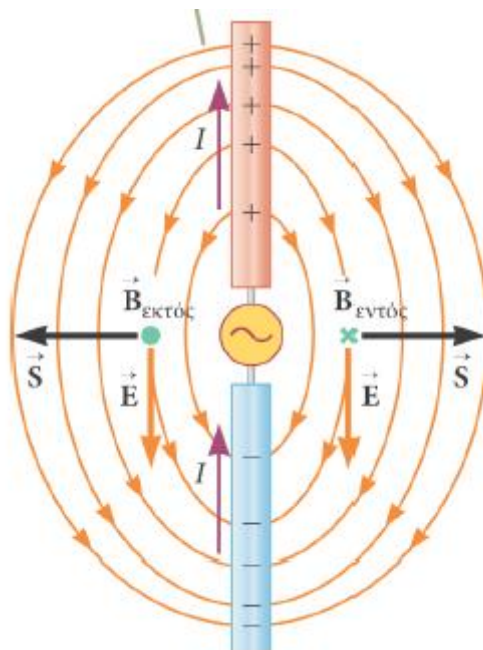


Σχήμα 2.1 Δίπολο  $\lambda/2$  [1]

Η κεραιά  $\lambda/2$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, είναι από τους πιο βασικούς και γνωστούς τύπους κεραιών στη ραδιοεπικοινωνία. Η απλότητά της, η αποδοτικότητά της και η ευκολία κατασκευής την καθιστούν ιδανική για εφαρμογές στις χαμηλές και μεσαίες ραδιοσυχνότητες [1]. Η κεραιά αποτελείται από δύο αγώγιμα στοιχεία, το καθένα με μήκος ίσο με το ένα

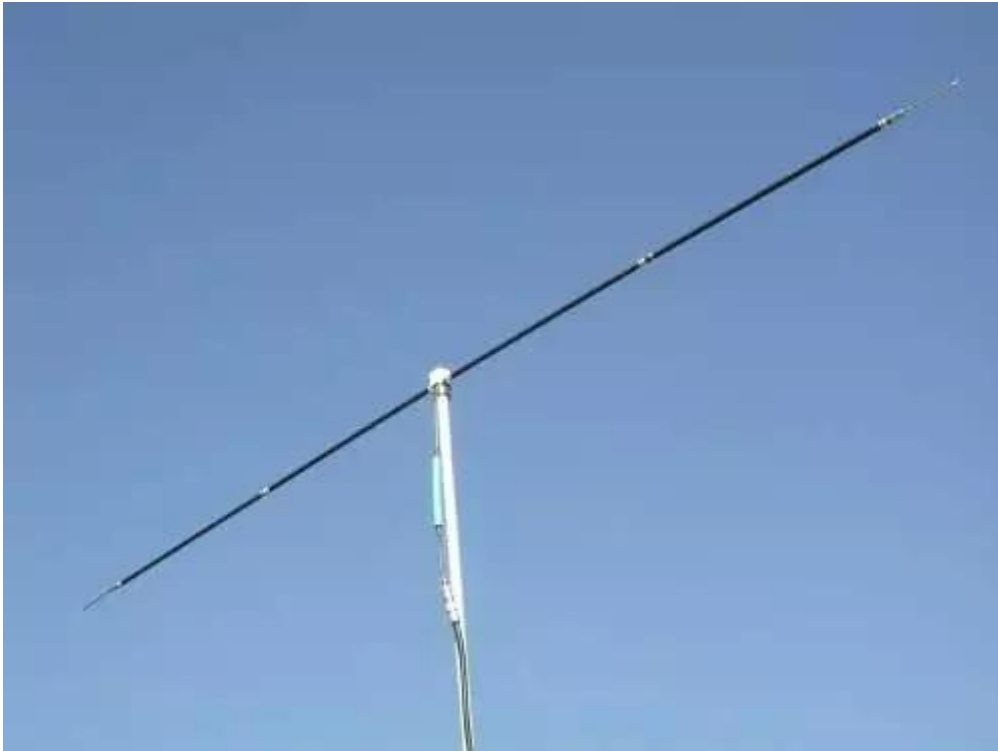
τέταρτο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος, με αποτέλεσμα το συνολικό της μήκος να είναι περίπου ίσο με το μισό μήκος κύματος.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, η κεραία  $\lambda/2$  έχει χαρακτηριστικά ακτινοβολίας που μοιάζουν με αυτά ενός ιδανικού δίπολου. Το πεδίο ακτινοβολίας της είναι μέγιστο κάθετα στον άξονά της και μηδενικό κατά μήκος του. Η τιμή της σύνθετης αντίστασης της κεραίας στον ελεύθερο χώρο είναι  $73\Omega$ , για με ομοαξονικό καλώδιο χαρακτηριστικής αντίστασης  $75\Omega$  ή  $50\Omega$  με τη χρήση κατάλληλων προσαρμογέων. Όσον αφορά το λόγο στάσιμων κυμάτων (SWR), όταν η κεραία είναι σωστά συντονισμένη, το SWR πλησιάζει την ιδανική τιμή 1, διασφαλίζοντας ελάχιστες απώλειες ισχύος [11].



Σχήμα 2.2 Δίπολο  $\lambda/2$  [11]

Οι κεραίες μισού μήκους κύματος χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές όπως το ερασιτεχνικό ραδιόφωνο (HAM radio), οι ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές εκπομπές, καθώς και σε στρατιωτικά και ερευνητικά ραδιοσυστήματα (Σχήμα 2.3). Χρησιμοποιούνται επίσης ως κεραίες λήψης και εκπομπής σημάτων Wi-Fi και ασύρματων τηλεπικοινωνιών είναι επίσης γνωστή, λόγω της σταθερότητας και της απόδοσης τους. Η ευκολία κατασκευής τις καθιστούν ιδανικές για εφαρμογές όπου απαιτείται αξιόπιστη και οικονομική κεραία [12].



Σχήμα 2.3 Κεραία ραδιοφώνου – Εφαρμογή διπόλου  $\lambda/2$  [12].

## 2.2. Μαθηματική ανάλυση κεραίας

Για να σχεδιαστεί κατάλληλα ένα δίπολο μισού μήκους κύματος πρέπει να γίνει ο υπολογισμός κάποιων βασικών χαρακτηριστικών του. Σε αυτά τα χαρακτηριστικά θα επικεντρωθούμε και στις υπόλοιπες κεραίες για να δούμε άμα εκπέμπουν κατάλληλα και βρίσκονται σε συντονισμό. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι το  $SWR$  (σχέση στάσιμων κυμάτων),  $\Gamma$  (Συντελεστής ανάκλασης) και  $RL$  (απώλειες επιστροφής). Το μήκος κύματος  $\lambda$  σε  $f$  (συχνότητα) στα 400 MHz, και με σταθερά  $c$  (ταχύτητα του φωτός) στα  $3 \times 10^8$  m/s υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$\lambda = c/f = 0.75m \quad (2.1)$$

Το μήκος του διπόλου υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$L = \lambda/2 = 0.375m \quad (2.2)$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{71.8 - 75}{71.8 + 75} = -0.021 \quad (2.3)$$

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = 1.027 \quad (2.4)$$

$$RL = -20 \log 0.021 = -33.55dB \quad (2.5)$$

### 2.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2: απεικονίσεις της προσομοίωσης και περιγραφή του κώδικα.

Η προσομοίωση των κεραιών πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον 4nec2 (Numerical Electromagnetic Code). Ο κώδικας στο περιβάλλον 4nec2 είναι ένας αριθμητικός κώδικας ο οποίος αναπτύχθηκε για την ανάλυση και τον σχεδιασμό κεραιών και άλλων ηλεκτρομαγνητικών δομών.

Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την δομή της κεραίας είναι οι εξής:

**CM:** (Σχόλιο) Χρησιμοποιείται για την πρόσθεση σχολίων στο αρχείο. Για να γραφεί ένα σχόλιο στο 4nec2 δεν χρειάζεται παρά μόνο να γραφτεί η εντολή CM στην αρχή της γραμμής. Με κάθε νέα γραμμή άμα θέλουμε να συνεχίσει το σχόλιο η να γράψουμε νέο σχόλιο πρέπει να γράψουμε CM.

**CE:** (Τέλος σχολίων) Σηματοδοτεί το τέλος των σχολίων. Από εδώ και μετά γράφουμε τις εντολές η τις μεταβλητές με τις οποίες σχεδιάζουμε την κεραία.

**SY:** (Συμβολική Μεταβλητή) Χρησιμοποιείται για τον ορισμό μεταβλητών. Με SY όμως δεν χρειάζεται να ορίσουμε απλώς ένα γράμμα ως μεταβλητή αλλά και να ορίσουμε κάποια μαθηματική πράξη, καθώς το 4nec2 μπορεί να κάνει υπολογισμούς ώστε να μεταβάλλεται η κεραία άμεσα με το την αλλαγή κάποιας μεταβλητής στο optimizer.

**GW:** (Γεωμετρία Καλωδίου) Αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εντολή καθώς ορίζει ένα καλώδιο με αρχή και τέλος στους άξονες X, Y, Z, διάμετρο και αριθμό τμημάτων του καλωδίου. Η διαδικασία δήλωσης ενός καλωδίου γίνεται ως εξής:

GW Tag Seg x1 y1 z1 x2 y2 z2 r

Το **tag** δηλώνει τον αριθμό ταυτοποίησης του καλωδίου, δηλαδή καλώδιο 1,2,3,.. Το **seg** είναι ο αριθμός τμημάτων του καλωδίου. Μπορούμε να χωρίσουμε ένα καλώδιο σε ένα ή περισσότερα τμήματα. Τα **(x1,y1,z1), (x2,y2,z2)** είναι οι συντεταγμένες του καλωδίου των αρχικών και τελικών σημείων του καλωδίου και της θέσης τους πάνω στους άξονες **X,Y,Z**. Όλες οι διαστάσεις είναι αυτόματα ορισμένες σε μέτρα. Τέλος το **r** είναι η ακτίνα της διατομής του καλωδίου και είναι ορισμένο επίσης σε μέτρα αυτόματα από το 4nec2.

**GE:** (Τέλος Γεωμετρίας) Το GE ορίζει την ολοκλήρωση της ενότητας ορισμού γεωμετρίας και συμπεριλαμβάνει τον τύπο γείωσης εφόσον αυτό έχει δηλωθεί. Το **GE 0** δηλώνει ότι η κεραία βρίσκεται σε ελεύθερο χώρο, δηλαδή χωρίς έδαφος γύρω της, σε ιδανικό πεδίο. Το **GE 1** δείχνει ότι υπάρχει έδαφος και αυτό συμπεριλαμβάνει την επίδρασή του, αναλόγως με τα χαρακτηριστικά τα οποία εμείς έχουμε ορίσει. Το **GE -1** ορίζει το τέλειο έδαφος και θεωρεί ότι τα ρεύματα μηδενίζονται στο σημείο επαφής με το έδαφος που αυτό αντιστοιχεί σε τέλειο αγωγό επίπεδο γείωσης που κανένα ρεύμα δεν διεισδύει.

**GN:** (Γείωση) Εφόσον χρησιμοποιηθεί μοντέλο εδάφους ( $GE \neq 0$ ), πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή GN για να ορίσουμε τον τύπο εδάφους. Το 4Nec2 έχει διάφορες επιλογές. Το **GN -1** δηλώνει πάλι ελεύθερο χώρο, τυπικά χρησιμοποιείται μόνο αν δεν δόθηκε ήδη GE 0. Το GN 1 επιλέγει τέλειο αγωγό έδαφος (ιδανικός αγωγός, χωρίς απώλειες). Αυτοί είναι οι δύο τύποι εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν για την απλότητα τους για την μοντελοποίηση και ανάλυση των κεραιών.

**EX:** (Διέγερση/ πηγή) Ορίζει τον τύπο, την τάση, την φάση και την θέση της πηγής πάνω στο καλώδιο. Η πιο συνήθης μορφή που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις για την τροφοδοσία της κεραίας είναι:

EX 0 Tag Seg 0 V 0 0

Το 4nec2 επιτρέπει πολλαπλές πηγές σε μια προσομοίωση, οπότε μπορούν να διεγερθούν ταυτόχρονα πολλαπλά δίπολα όπως θα δούμε στην συνέχεια. Το **Tag** ορίζει τον αριθμό του καλωδίου στο οποίο θέλουμε να τοποθετήσουμε την πηγή ενώ το **Seg** ορίζει το τμήμα του καλωδίου. Για παράδειγμα, αν χωρίσουμε ένα καλώδιο σε 11 τμήματα και άμα δώσουμε στο Seg την τιμή 6, τότε η πηγή θα τοποθετηθεί στο κέντρο του καλωδίου. Στην συνέχεια το V είναι η τάση που έχουμε ορίσει στην πηγή, η οποία είναι επίσης το πραγματικό μέρος της πηγής και το 0 είναι το φανταστικό μέρος της, το οποίο συνήθως επιλέγουμε να είναι 0.

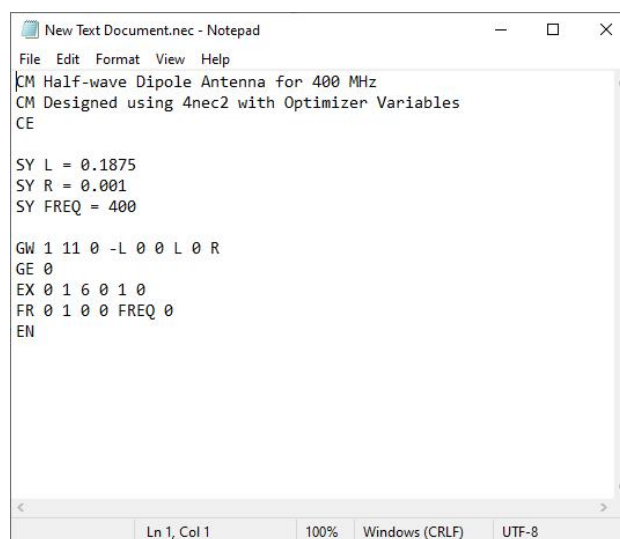
**FR:** (Συχνότητα) Ορίζει την συχνότητα λειτουργίας, το βήμα και τον αριθμό των βημάτων σάρωσης και εμφανίζεται ως εξής:

FR IRPT NFRQ 0 0 Fstart Fstep

Το **IRPT** ορίζει τον τύπο σάρωσης, η οποία μπορεί να είναι γραμμική ή λογαριθμική. Στη συνέχεια, το **NFRQ** είναι ο αριθμός βημάτων για την σάρωση της κεραίας, το **Fstart** είναι η συχνότητα λειτουργίας που θέτουμε για την κεραία μας και τέλος υπάρχει το **Fstep**, το οποίο είναι το βήμα σάρωσης της συχνότητας. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να δηλωθούν και στην συνέχεια για αυτό μπορούμε να τα ορίσουμε όλα ως 0 εκτός από το Fstart.

**EN:** (Ολοκλήρωση του κώδικα) Το EN είναι η τελευταία εντολή του κώδικα και ορίζει την ολοκλήρωσή του [13].

Στο σχήμα 2.4 σχεδιάζεται με βάση τις παραπάνω εντολές η κεραία μισού μήκους κύματος. Στον κώδικα θέσαμε τη μεταβλητή  $L$  με τιμή αντίστοιχη με το μισό μήκος της κεραίας. Το  $R$  είναι το πάχος του αγωγού, που συνήθως δηλώνεται ως 0.001, εκτός αν χρειάζεται διαφορετικό πάχος για την κεραία το οποίο έχουμε υπολογίσει, ενώ το  $FREQ$  είναι η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας.



```
New Text Document.nec - Notepad
File Edit Format View Help
CM Half-wave Dipole Antenna for 400 MHz
CM Designed using 4nec2 with Optimizer Variables
CE

SY L = 0.1875
SY R = 0.001
SY FREQ = 400

GW 1 11 0 -L 0 0 L 0 R
GE 0
EX 0 1 6 0 1 0
FR 0 1 0 0 FREQ 0
EN

Ln 1, Col 1    100%    Windows (CRLF)    UTF-8
```

Σχήμα 2.4 Κώδικας 4nec2.

## 2.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.

Στο σχήμα 2.5 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα, βλέπουμε όμως ότι οι τιμές της σύνθετης αντίστασης και της τιμής SWR δεν συμπίπτουν με τα αποτελέσματα που γνωρίζουμε από τη θεωρία.

The screenshot shows the 'Main [V5.9.3] (F2)' window with the following data:

Filename	new text documen	Frequency	400	Mhz
		Wavelength	0.75	mtr
Voltage	3.35 + j0 V	Current	29.8 - j17 mA	
Impedance	84.9 + j48.3	Series comp.	8.238	pF
Parallel form	112 // j198	Parallel comp.	2.014	pF
S.W.R.73	1.86	Input power	100	mW
Efficiency	100 %	Structure loss	0	uW
Radiat-eff.	%	Network loss	0	uW
RDF [dB]		Radiat-power	100	mW

Environment:  Loads  Polar

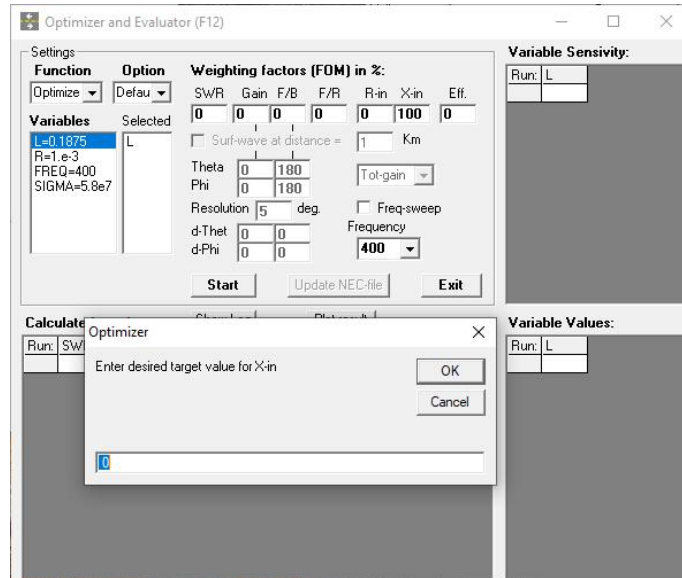
Environment: FREE SPACE

Comment: Half-wave Dipole Antenna for 400 MHz  
Designed using 4nec2 with Optimizer Variables

Seg's/patches	11	start	stop	count	step	
Pattern lines	36381	Theta	-180	180	181	2
Freq/Eval steps	201	Phi	0	0	1	0

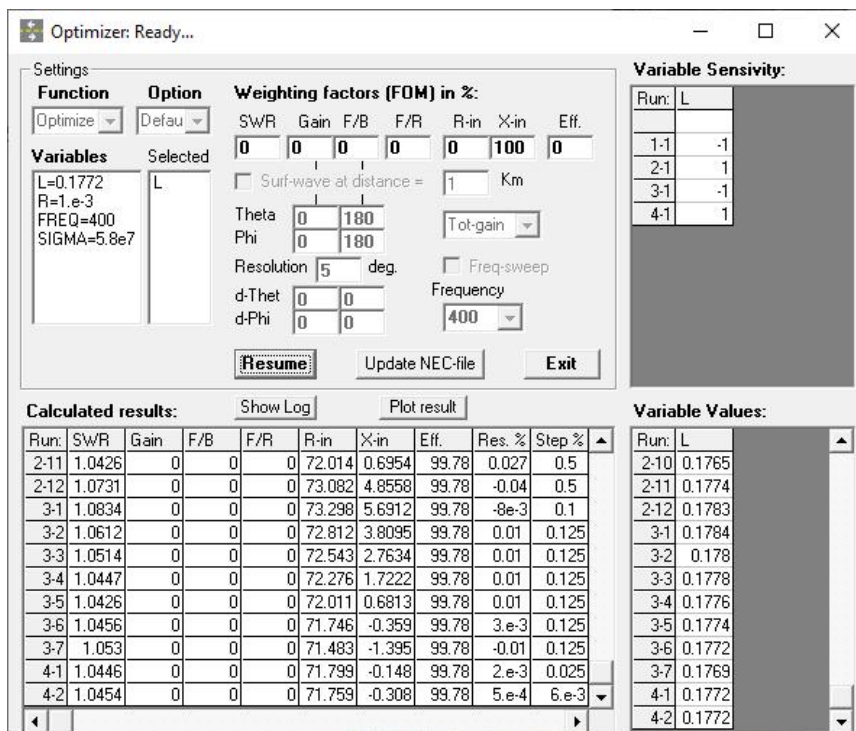
Σχήμα 2.5 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων.

Για να διορθωθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει να λάβουν χώρα κάποιες δοκιμές αλλάζοντας το μήκος του διπόλου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας διαδικασία βελτιστοποίησης. Μέσω του εργαλείου «Optimizer» μπορούμε να επιλέξουμε ποιες μεταβλητές θέλουμε να αλλάξουμε και το αποτέλεσμα που θέλουμε να πετύχουμε. Για να εκτελέσουμε το Optimizer, πηγαίνουμε από το παράθυρο Main στο Calculate και πατώντας το μας εμφανίζει τις επιλογές NEC output data, L/Pi/T Matching και Start Optimizer. Για την κεραία αυτή επιλέγουμε το L για να μεταβάλλουμε το μήκος της έτσι ώστε να μηδενίσουμε το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου δηλ. να φέρουμε την μεταβλητή X-in στο 0 ή όσο πιο κοντά γίνεται σε αυτό. Θέτουμε το X-in στο 0 καθώς και την συχνότητα που θέλουμε να συντονιστεί η κεραία, δηλαδή στα 400MHz (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6 Παράθυρο Optimizer

Στο σχήμα 2.7 βλέπουμε τις τιμές του  $L$  που το πρόγραμμα δοκίμασε για να συντονίσει την κεραία στην τιμή πιο κοντά στο 0. Βλέπουμε ότι η τελευταία τιμή για το X-in είναι 0.006, που πρακτικά είναι 0.



Σχήμα 2.7 Παράθυρο Optimizer μετά τη βελτιστοποίηση.

Πατώντας το Update NEC file που βλέπουμε στο παράθυρο του Optimizer δημιουργούμε ένα νέο αρχείο NEC που περιλαμβάνει τη νέα υπολογισμένη τιμή για το  $L = 0.177166$  (Σχήμα 2.8).

```

new text document optimized.nec - Notepad
File Edit Format View Help
CM Half-wave Dipole Antenna for 400 MHz
CM Designed using 4nec2 with Optimizer Variables
CE

SY L=0.177166
SY R = 0.001
SY FREQ = 400

GW 1 11 0 -L 0 0 L 0 R
GE 0
EX 0 1 6 0 1 0
FR 0 1 0 0 FREQ 0
EN
Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

```

Σχήμα 2.8. Κώδικας μετά το Optimizer.

Στη συνέχεια, τρέχουμε τον νέο κώδικα και λαμβάνουμε τα αποτελέσματα, τα οποία εμφανίζονται στο Σχήμα 2.9. Η νέα αυτή τιμή έχει φέρει την αντίσταση εισόδου στα επιθυμητά αποτελέσματα για ένα δίπολο μισού μήκους κύματος στα 400MHz όπως και το  $SWR = 1.02$  που είναι σχεδόν ιδανικό.

Main [V5.9.3] (F2)

File Edit Settings Calculate Window Show Run Help

Filename: new text documen Frequency: 400 Mhz  
Wavelength: 0.75 mtr

Voltage: 2.68 + j 0 V Current: 4.e4 + j 233 uA

Impedance: 71.6 - j 0.45 Series comp.: 2.e-4 uH  
Parallel form: 71.6 // - j 1.e4 Parallel comp.: 4.56 uH

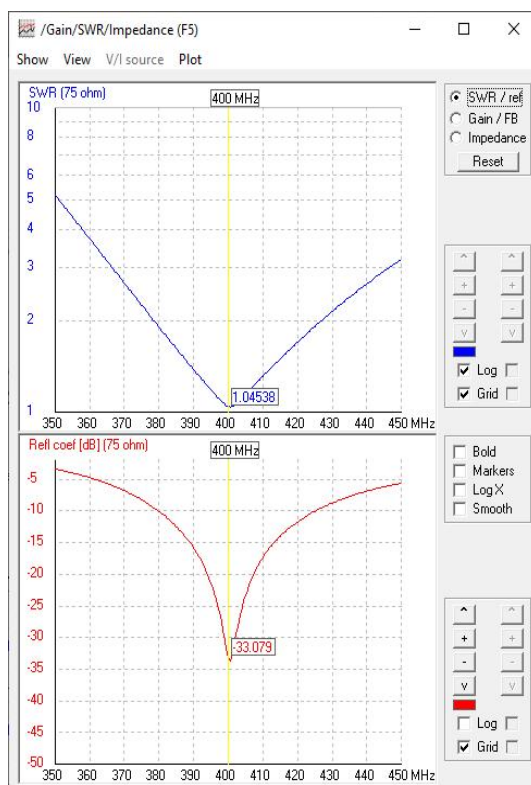
S.W.R.73: 1.02 Input power: 100 mW  
Efficiency: 100 % Structure loss: 0 uW  
Radiat-eff.: % Network loss: 0 uW  
RDF [dB]: Radiat-power: 100 mW

Environment:  Loads  Polar  
FREE SPACE

Comment:  
Half-wave Dipole Antenna for 400 MHz  
Designed using 4nec2 with Optimizer Variables

Seg's/patches: 11 start stop count step  
Pattern lines: 0  
Freq/Eval steps: 1

Σχήμα 2.9 Αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση του κώδικα



Σχήμα 2.10 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz.

Στο σχήμα 2.10 σχεδιάζονται οι τιμές του SWR και του συντελεστή ανάκλασης που με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς είναι σχεδόν ισότιμες.

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Δίπολο)

	Pre optimized	Optimized	Θεωρία
$Z_{in}$	$84.9 + 48.3j$	$71.8 - 0.31j$	$73 + 0j$
$F_{συντ}$	400MHz	400MHz	400MHz
SWR	2.42	1.05	1.027
RL	-7.6	-33.55	-33.079

Σύμφωνα με τον πίνακα 2.1 υπάρχει μικρή απόκλιση μεταξύ των τιμών της προσομοίωσης και της θεωρίας, η οποία θεωρείται ότι είναι αμελητέα. Πιο συγκεκριμένα όσο αφορά την αντίσταση εισόδου, η τιμή της προσομοίωσης ( $71.8 - 0.31j$ ) είναι ελάχιστα μικρότερη σε σχέση με την θεωρία ( $73 + 0j$ ), αντίστοιχα το SWR της προσομοίωσης (1.05) είναι λίγο μεγαλύτερο από αυτό της θεωρίας (1.027). Τέλος, ως προς το RL η θεωρητική τιμή είναι λίγο μικρότερη από αυτή της θεωρίας.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Στοιχειοκεραίες

### 3.1 Εισαγωγή στις Στοιχειοκεραίες

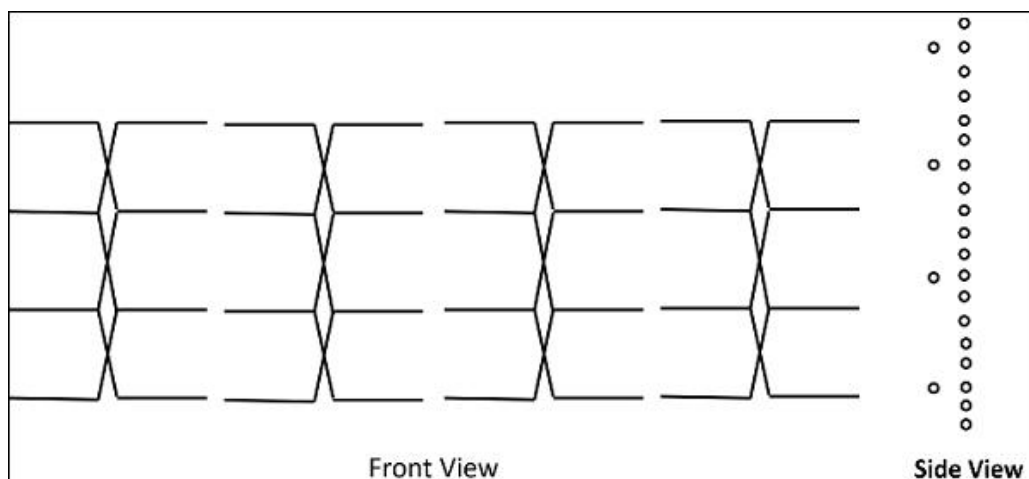
Η γρήγορη εξέλιξη των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή ανάγκη για αποδοτικές, κατευθυντικές και ευέλικτες κεραίες. Για αυτό το λόγο, οι στοιχειοκεραίες (antenna arrays) θεωρούνται κάποιες από τις πιο ισχυρές μεθόδους σχεδίασης, καθώς επιτρέπουν την επίτευξη ενισχυμένων χαρακτηριστικών ακτινοβολίας. Οι στοιχειοκεραίες αποτελούνται από πολλά στοιχεία, συνήθως δίπολα, τα οποία τοποθετούνται με συγκεκριμένη σειρά και θέση και τροφοδοτούνται κατάλληλα τόσο ως προς το πλάτος όσο και προς τη φάση. Μεταξύ των βασικότερων στοιχειοκεραιών συμπεριλαμβάνονται οι Broadside, End-fire και Phased array. Οι κεραίες αυτές επιδεικνύουν διαφορετική κατευθυντικότητα, εύρος και δυνατότητες προσαρμογής, ανάλογα με την γεωμετρία και τις αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων και την φάση διέγερσης.

### 3.2. Κεραίες Broadside

#### 3.2.1. Περιγραφή κεραίας Broadside

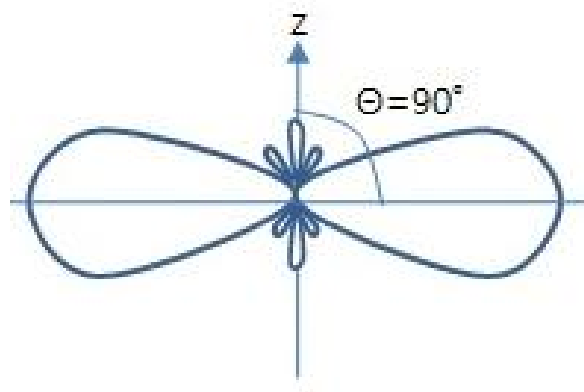
Οι κεραίες Broadside άρχισαν να αναπτύσσονται κατά την διάρκεια των πρώτων δεκαετιών του 20ού αιώνα, σε μια εποχή γρήγορης εξέλιξης της ασύρματης τεχνολογίας. Η κεραία Broadside εμφανίστηκε για πρώτη φορά στις αρχές του 20ού αιώνα, σε εφαρμογές ραδιοεπικοινωνιών και ραντάρ από τον Harold H. Beverage και τους συνεργάτες του, και ήταν από τους πρώτους που εφάρμοσαν συστηματικά πολυστοιχειακές διατάξεις για την αύξηση της κατευθυντικότητας και της αποδοτικότητας των εκπομπών. Η ανάγκη βελτίωσης της λήψης σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις οδήγησε στην ανάπτυξη τέτοιων διατάξεων. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη συνδυασμένη ακτινοβολία από πολλαπλά δίπολα, τοποθετημένα παράλληλα και συγχρονισμένα, ώστε να παράγουν κύρια λοβό ακτινοβολίας κάθετα στη διάταξη. Η θεωρητική της βάση στηρίζεται στην αρχή της υπέρθεσης και στη θεωρία κεραιών συντονισμένων διπόλων [1]. Το ακόλουθο διάγραμμα δείχνει την διάταξη κεραιών τύπου Broadside, σε πρόσοψη και πλάγια όψη, αντίστοιχα [14]. Η διάταξη των κεραιών αυτών είναι έντονα κατευθυντική σε ορθή γωνία με το επίπεδο της συστοιχίας [15].

Η ταχεία πρόοδος στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας έχει δημιουργήσει μεγάλη ζήτηση για αποτελεσματικές, κατευθυντικές και ευέλικτες κεραίες. Γι' αυτό το λόγο, οι στοιχειοκεραίες θεωρούνται από τις πιο δημοφιλείς επιλογές.

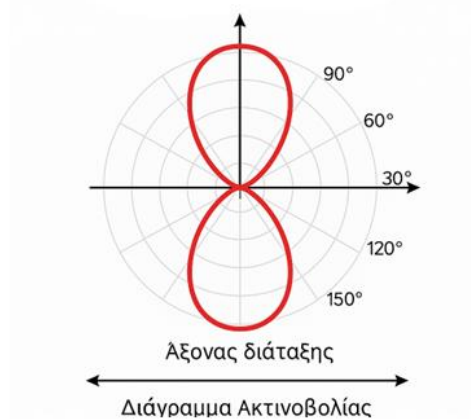


Σχήμα 3.1: Διάταξη κεραιών τύπου Broadside [15]

Από φυσικής άποψης, οι κεραίες Broadside βασίζονται στην υπερτιθέμενη ακτινοβολία κυμάτων από πολλαπλά στοιχεία που λειτουργούν συμφασικά (χωρίς χρονικές καθυστερήσεις) ( $\delta=0$ ). Το φαινόμενο αυτό βασίζεται στη θεωρία της επεμβολής και συμβολής κυμάτων, οδηγώντας σε ενίσχυση της εκπεμπόμενης ενέργειας προς μία κατεύθυνση κάθετη στη διάταξη της κεραίας ( $\theta=90^\circ$ ) [14]. Η ένταση του πεδίου και το διάγραμμα ακτινοβολίας εξαρτώνται άμεσα από το πλήθος, την απόσταση και το σχετικό φάσμα διέγερσης των στοιχείων. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Broadside είναι αμφίδρομο και σε ορθή γωνία με το επίπεδο. Το εύρος ακτινοβολίας είναι σχετικά στενό. Η ενίσχυση (gain) και κατευθυντικότητα αυξάνονται όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων N, παρουσιάζοντας χαμηλό αριθμό πλευρικών λοβών, θέτοντάς την κατάλληλη για εφαρμογές όπου απαιτείται ακτινοβολία σε οριζόντια κατεύθυνση.



Κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας

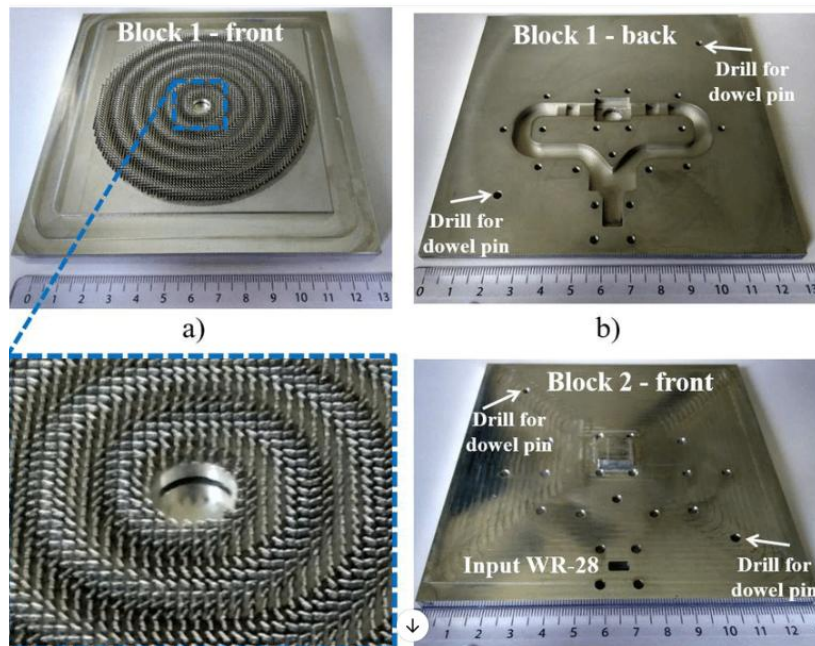


Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Broadside [15]

Τα σχήματα δείχνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Broadside. Η δέσμη είναι λίγο πιο φαρδιά και οι δευτερεύοντες λοβοί είναι πολύ μειωμένοι. Η περιοχή συχνοτήτων όπου λειτουργούν οι κεραίες Broadside διάταξης είναι περίπου 30 MHz έως 3 GHz, η οποία ανήκει στις ζώνες VHF και UHF [15].

Οι κεραίες Broadside χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικά ραντάρ, σε ραδιοφωνικές εκπομπές μεγάλων αποστάσεων και σε δορυφορικές επικοινωνίες. Παρακάτω παρουσιάζεται μια φωτογραφία κατασκευασμένης κεραίας τύπου Broadside με κυκλικά πολωμένο ακτινοβολούμενο κύμα (RHCP), χρησιμοποιώντας μετα-επιφάνειες (metasurfaces). Αυτή η

κεραία έχει κατασκευαστεί με 3D printing και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν κατευθυντική ακτινοβολία [16].



Σχήμα 3.3 Εφαρμογή κεραίας τύπου Broadside [16]

### 3.2.2. Μαθηματικοί υπολογισμοί

Το μήκος κύματος της κεραίας υπολογίζεται από τον τύπο  $\lambda = c/f = 0.75\text{m}$ . Την σχεδιάζουμε με συχνότητα συντονισμού στα 400MHz και  $N = 10$  στοιχεία. Για απόσταση μεταξύ των στοιχείων ορίζουμε  $d = \lambda/2 = 0.375\text{m}$  και  $L = 0.375\text{m}$ , σε αυτή την απόσταση και μήκος των στοιχείων για  $\theta = 90$  οι κεραίες Broadside αθροίζουν τα πλάτη τους και αυτό οδηγεί σε καλύτερη απόδοση της κεραίας αλλά λόγω των end effects μπορούμε να μειώσουμε το μήκος των διπόλων στο  $0.46L$  περίπου για καλύτερη απόδοση της κεραίας. Για να έχει η κεραία την μέγιστη απόδοση θέλουμε να έχουμε τον παράγοντα διάταξης.

$$AF(\theta) = \frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} = N \text{ όπου } \psi = k_0 d \cos\theta + \delta \quad (3.1)$$

Για να ισχύει πρέπει  $\psi = 2m\pi$ , για  $m$  ακέραιο αριθμό

Από την θεωρία γνωρίζουμε ότι από το κάθε δίπολο μισού μήκους κύματος έχει  $73+0j \Omega$  αντίσταση εισόδου. Για την κεραία αυτή θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή της θεωρίας καθώς θέλουμε η κεραία μας να συντονιστεί στην τιμή αυτή. Με αυτή την τιμή γνωστή μπορούμε στην συνέχεια να υπολογίσουμε τον συντελεστή ανάκλασης (Refl Coeff) της κεραίας και να συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Προσαρμόζουμε τον τύπο για  $75 \Omega$  ομοαξονικό καλώδιο. Το  $\Gamma = 2/148 = 0.01351$  και  $SWR = (1+0.0135)/(1-0.0135) = 1.03$ , τέλος μπορούμε να υπολογίσουμε και το  $RL = -20\log\Gamma = -37.38\text{dB}$ .

### 3.2.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2.

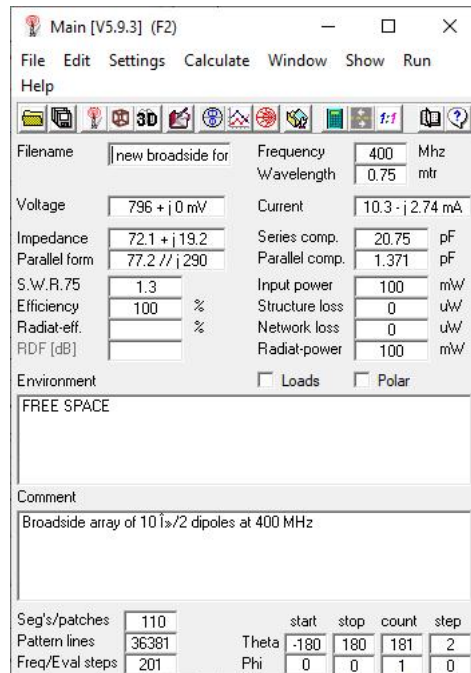
Τρέχουμε το πρόγραμμα για αρχή με τις υπολογισμένες τιμές και άμα χρειαστεί τρέχουμε το optimizer για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων.

```
new broadside for testing - Notepad
File Edit Format View Help
[M Broadside array of 10 lambda/2 dipoles at 400 MHz
CE
SY d = 0.375
SY l = 0.375
SY r = 0.002
GW 1 11 0.5*d -1/2 0 0.5*d 1/2 0 r
GW 2 11 1.5*d -1/2 0 1.5*d 1/2 0 r
GW 3 11 2.5*d -1/2 0 2.5*d 1/2 0 r
GW 4 11 3.5*d -1/2 0 3.5*d 1/2 0 r
GW 5 11 4.5*d -1/2 0 4.5*d 1/2 0 r
GW 6 11 5.5*d -1/2 0 5.5*d 1/2 0 r
GW 7 11 6.5*d -1/2 0 6.5*d 1/2 0 r
GW 8 11 7.5*d -1/2 0 7.5*d 1/2 0 r
GW 9 11 8.5*d -1/2 0 8.5*d 1/2 0 r
GW 10 11 9.5*d -1/2 0 9.5*d 1/2 0 r
GE 0
GN -1
EK
EX 0 1 6 0 1 0 0 0
EX 0 2 6 0 1 0 0 0
EX 0 3 6 0 1 0 0 0
EX 0 4 6 0 1 0 0 0
EX 0 5 6 0 1 0 0 0
EX 0 6 6 0 1 0 0 0
EX 0 7 6 0 1 0 0 0
EX 0 8 6 0 1 0 0 0
EX 0 9 6 0 1 0 0 0
EX 0 10 6 0 1 0 0 0
FR 0 0 0 0 400 0
EN
Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

Σχήμα 3.4 Κώδικας 4nec2.

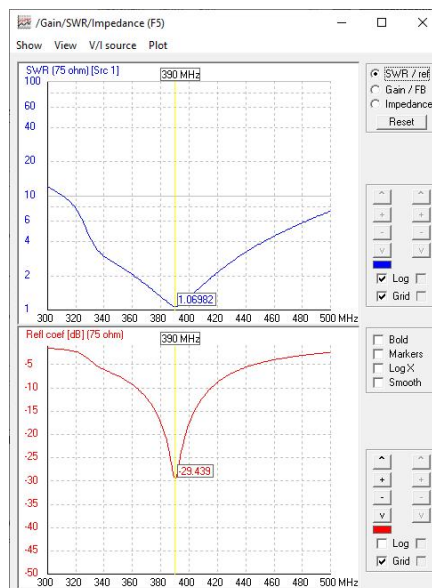
Στον κώδικα βάζουμε 10 δίπολα στην σειρά σε απόσταση 0.375μ μεταξύ των διπόλων στις θέσεις X1, X2. Για να ορίσουμε εύκολα τις θέσεις της διάταξης πάνω στον άξονα X κοιτώντας το σχήμα 3.4 βλέπουμε ότι αυτό το καταφέραμε όχι αθροίζοντας τις τιμές αλλά πολλαπλασιάζοντας με ακέραιους αριθμούς από το 1 έως το 10 για τις 10 θέσεις των διπόλων, αυτό επιλέχθηκε επειδή είναι ευκολότερη η διαδικασία χρήσης του optimizer αργότερα για τον συντονισμό της κεραίας. Το l ορίστηκε ως το μήκος του δίπολου και στον κώδικα χρησιμοποιήθηκε για να ορίσουμε τα μήκη των διπόλων πάνω στον άξονα Y. Σε κάθε δίπολο τοποθετούμε στο κέντρο μια πηγή για να μοιράζονται τα ρεύματα και για να προσομοιώσουμε με αυτό τον τρόπο την ίδια φάση και ένταση ρεύματος.

### 3.2.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.



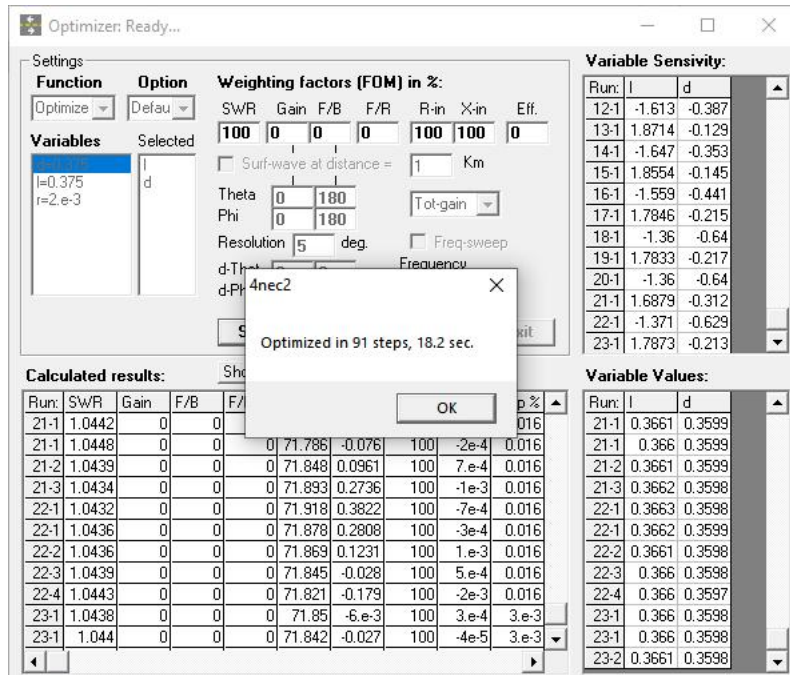
Σχήμα 3.5 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων.

Αφού πατήσουμε το Calculate μας δίνονται τα κύρια αποτελέσματα της κεραίας στο κεντρικό παράθυρο main. Επιλέγουμε ομοαξονικό καλώδιο 75 Ω για αυτή την κεραία διότι έχουμε δίπολα μισού μήκους κύματος, επειδή η κεραία αποτελείται από δίπολα μισού μήκους κύματος η τιμή της  $Z_{in}$  θα βρίσκεται στα 73 Ω περίπου. Βλέπουμε ότι το SWR της κεραίας είναι καλό αλλά θα μπορούσαμε να μειώσουμε το φανταστικό κομμάτι της αντίστασης όσο περισσότερο μπορούμε για ακόμα καλύτερη προσαρμογή.



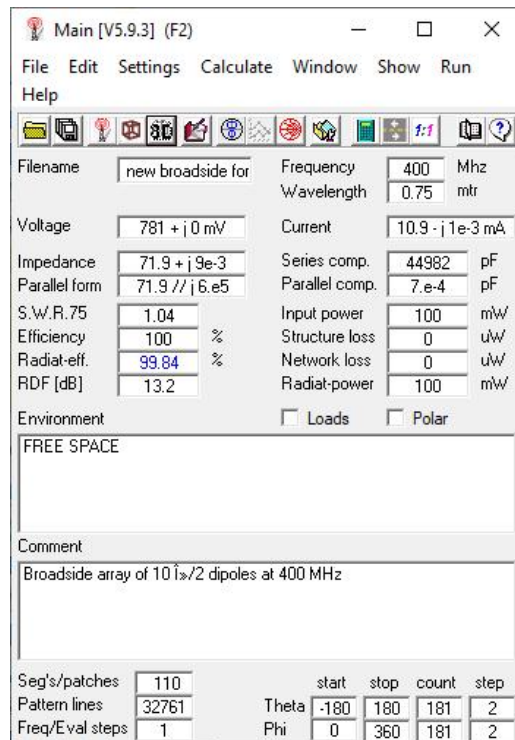
Σχήμα 3.6 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz πριν τον συντονισμό

Στο σχήμα 3.6 βλέπουμε ότι η κεραία είναι συντονισμένη στα 390MHz περίπου. Άρα χρησιμοποιούμε το optimizer για να την συντονίσουμε στην συχνότητα σχεδιασμού.

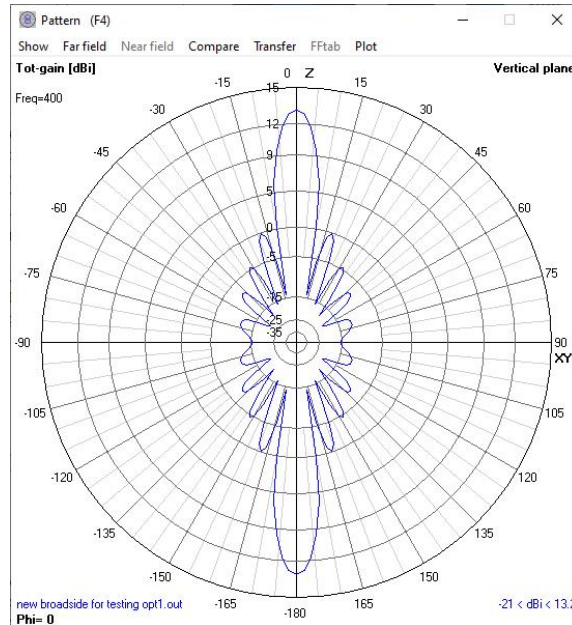


Σχήμα 3.7. Παράθυρο Optimizer

Μετά από 91 προσπάθειες το optimizer έφτασε σε μια τιμή που ήταν κοντά στα δεδομένα που ορίσαμε ότι θέλουμε να πετύχουμε. Βάλαμε  $R_{in} = 73\Omega$ ,  $X_{in} = 0\Omega$  και  $SWR = 1$ . Στη συνέχεια τρέχουμε τον κώδικα με το νέο μήκος δίπολων και την απόσταση μεταξύ τους και προκύπτουν οι εξής νέες υπολογισμένες τιμές των συμβολικών μεταβλητών (SY) 1 και d, όπου:  $l = 0.366056$  και  $d = 0.359764$

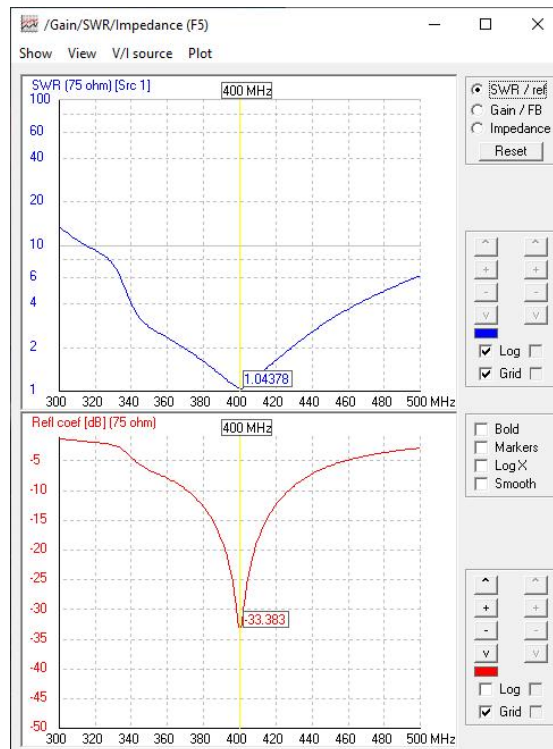


Σχήμα 3.8 Αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση του κώδικα

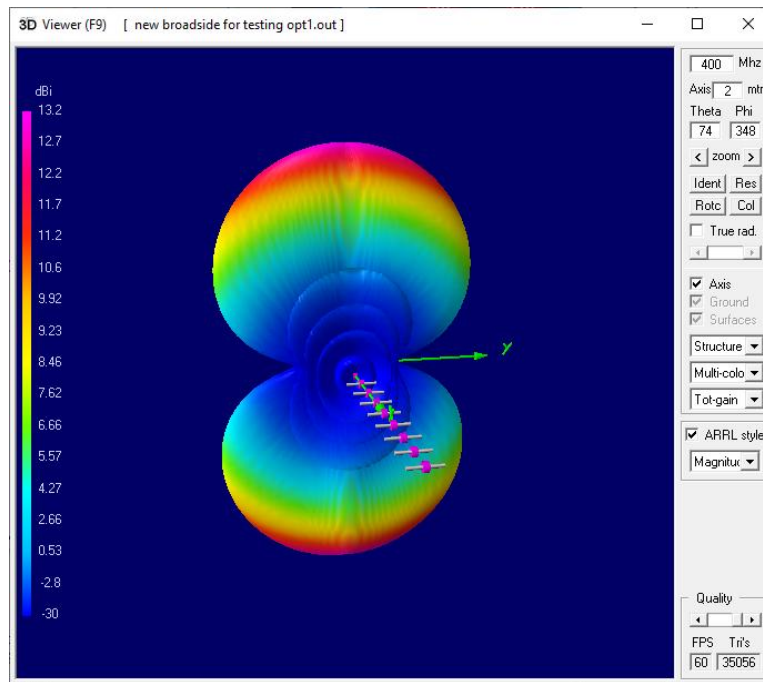


Σχήμα 3.9 Κέρδος κεραίας Broadside στην συχνότητα συντονισμού

Με την κεραία πλέον συντονισμένη βλέπουμε ότι η αντίσταση εισόδου της κεραίας έχει έρθει στα  $Z_{in} = 71.9 + 0.009j\text{Ohm}$  το  $SWR = 1.04$  και κέρδος  $13.2\text{dBi}$ . Λόγω της μικρής αλλαγής της απόστασης μεταξύ των στοιχείων από  $d = \lambda/2$  στα  $0.48\lambda$  της κεραίας και του μήκους των στοιχείων στα  $0.49\lambda$  έχουμε δύο νέους λοβούς γύρω στο σημείο εκπομπής αλλά το κέρδος μας ξεπερνάει το υπολογισμένο κέρδος της κεραίας κατά  $3.2\text{dB}$  που θα πει ότι ο σχεδιασμός της κεραίας αυτής μας δίνει καλύτερο αποτέλεσμα από αυτό που περιμέναμε.



Σχήμα 3.10 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz



Σχήμα 3.11 Τρισδιάστατη μορφή σήματος Broadside

Κοιτώντας την ακτινοβολία και κεραία στην τρισδιάστατη μορφή βλέπουμε καθαρά ότι η κεραία μας εκπέμπει ως διάταξη Broadside.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία Broadside)

	Pre optimized	Optimized	Θεωρία
$Z_{in}$	72.1 + 19j	71.9 + 0.009j	73 + 0j
$F_{συντ}$	390MHz	400MHz	400MHz
SWR	1.3	1.04	1.03
RL	-29.439	-33.383	--37.38

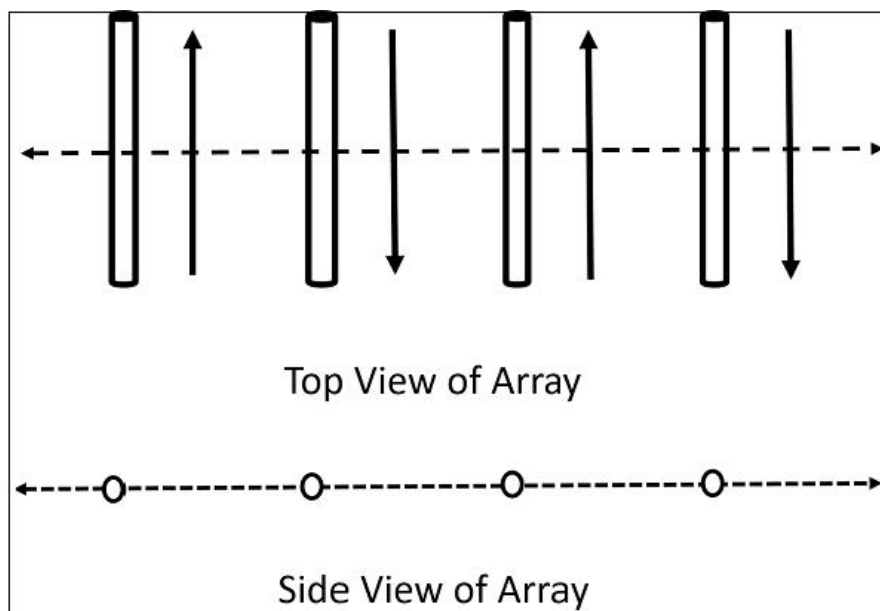
Στον πίνακα μπορούμε να δούμε ότι κάποιες από τις τιμές της θεωρίας είναι πολύ κοντά σε αυτές της προσομοίωσης. Βλέπουμε ότι έχει αλλάξει πλέον ο συντονισμός από τα 390MHz στα 400MHz και το SWR είναι ίσο με αυτό που βρήκαμε από τον θεωρητικό υπολογισμό. Η διαφορά του RL μεταξύ του optimized και της θεωρίας σε ποσοστό % είναι αμελητέο. Η διαφορά αυτή επηρεάζει ελάχιστα την κεραία μας οπότε και οι δύο τιμές είναι αποδεκτές. Η μόνη μεγάλη και πολύ σημαντική διαφορά είναι αυτή της αντίστασης εισόδου της κεραίας όπου μετά τον συντονισμό το φανταστικό κομμάτι είναι τυπικά 0 και πολύ κοντά σε αυτό το οποίο γνωρίζουμε ότι θέλουμε να έχουμε από την θεωρία.

### 3.3. Κεραίες End-fire

#### 3.3.1. Περιγραφή κεραίας End-fire

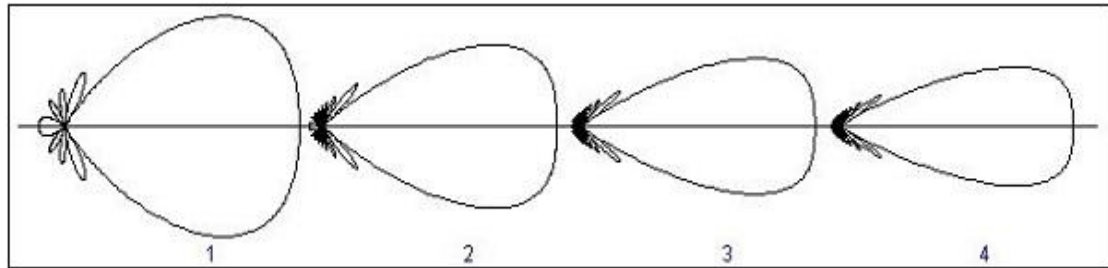
Οι κεραίες τύπου End-fire (Διαμήκους Εκπομπής Στοιχειοκεραία) αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα με σκοπό την ενίσχυση της κατευθυντικότητας των ραδιοκυμάτων προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η χρήση τους καθιερώθηκε κυρίως τη δεκαετία του 1940, κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, σε εφαρμογές όπως τα ραντάρ και τα συστήματα επικοινωνίας πεδίου. Η κεραία End-fire ανήκει στην κατηγορία των διατάξεων φάσεων συστοιχίας (phased arrays), καθώς αποτελείται από πολλά επιμέρους στοιχεία κεραίας (κυρίως δίπολα), τα οποία τροφοδοτούνται με κατάλληλη διαφορά φάσης μεταξύ τους. Αυτή η φασική καθυστέρηση οδηγεί τη δέσμη ακτινοβολίας (κύριο λοβό) να κατευθύνεται κατά μήκος του άξονα της διάταξης, δηλαδή προς το ένα άκρο της κεραίας [17].

Το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 3.12) δείχνει την διάταξη κεραιών τύπου End-fire, σε κάτοψη και πλάγια όψη αντίστοιχα. Η φυσική διάταξη των κεραιών τύπου End-fire είναι η ίδια με αυτή των κεραιών Broadside. Το μέγεθος των ρευμάτων σε κάθε στοιχείο είναι το ίδιο, αλλά υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ αυτών των ρευμάτων, κάτι που μπορεί να γίνει κατανοητό από το διάγραμμα [18].



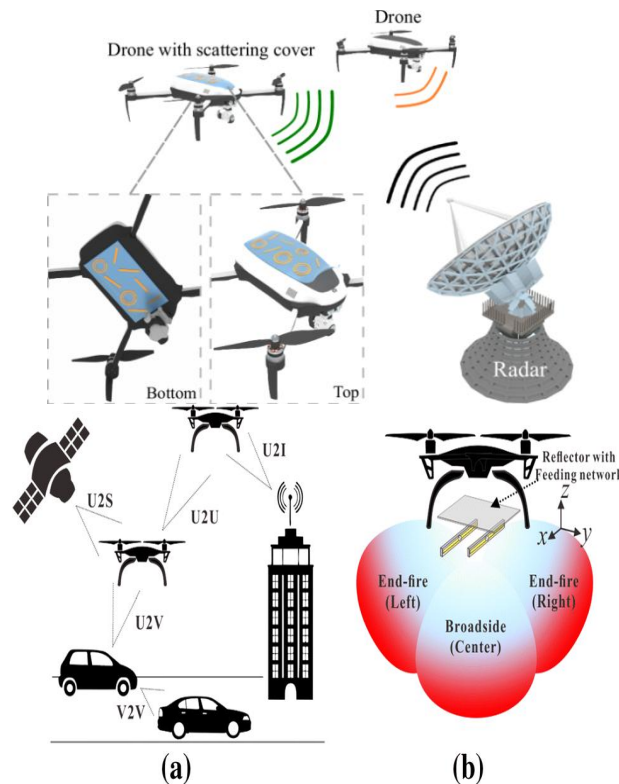
Σχήμα 3.12: Διάταξη κεραιών τύπου End-fire [18]

Το Σχήμα 3.13 εξηγεί το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας End-fire για πολλαπλές συστοιχίες. Επίσης, παρατηρούνται τα εξής: Υπάρχει καταρχήν ο κύριος λοβός ακτινοβολίας, που στην ουσία πρόκειται για την κατεύθυνση προς την οποία συγκεντρώνεται το μέγιστο της εκπεμπόμενης ισχύος. Στις End-fire κεραίες, ο κύριος λοβός ευθυγραμμίζεται με τον άξονα της κεραίας (δηλαδή στην προέκτασή της). Αυτό σημαίνει ότι η κεραία εκπέμπει ισχυρό σήμα σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, ιδανική για κατευθυνόμενη επικοινωνία ή εντοπισμό στόχων. Όσον αφορά τους πλευρικούς λοβούς στις καλά σχεδιασμένες κεραίες End-fire, δηλαδή τους μικρότερους «θόλους» ακτινοβολίας προς άλλες κατευθύνσεις που εμφανίζονται ανεπιθύμητα λόγω της αλληλεπίδρασης των στοιχείων, αυτοί είναι ή σχεδόν ανύπαρκτοι, γεγονός που βελτιώνει την κατευθυντικότητα και ακρίβεια της κεραίας.



Σχήμα 3.13. Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας End-fire [18]

Σε αντίθεση με την Broadside, η End-fire (ακροπυροδοτική) σχεδιάζεται ώστε να ακτινοβολεί κατά μήκος του άξονα διάταξης των στοιχείων, με κατάλληλη διαφορά φάσης μεταξύ των στοιχείων ώστε να ενισχύεται η ακτινοβολία κατά το μήκος του άξονα. Το σήμα της καλύπτει μικρή περιοχή, αλλά με μεγάλη ένταση – χρήσιμο σε εφαρμογές όπως ραντάρ ή στοχευμένες ζεύξεις επικοινωνίας. Αυτή η συμπεριφορά είναι κρίσιμη για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας και στόχευσης [18].



Σχήμα 3.14 Εφαρμογή κεραίας τύπου End-fire [20]

Η κεραία End-fire προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την κατευθυντικότητα και την απολαβή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ακτινοβολία σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, όπως σε point-to-point ζεύξεις, σε ραντάρ ή σε εφαρμογές τηλεμετρίας. Ο σχεδιασμός της επιτρέπει την αύξηση της απόδοσης χωρίς την ανάγκη μεγάλης επιφάνειας, γεγονός που την καθιστά ιδανική για πλήθος πρακτικών εφαρμογών. Οι κεραίες τύπου End-fire χρησιμοποιούνται ευρέως σε ραντάρ πυροβολικού & στρατιωτικά ραντάρ, συστήματα επικοινωνίας σε πυραύλους και drones, σε ανιχνευτικά ραντάρ κίνησης, συστήματα σόναρ σε 5G μεταδόσεις IoT συσκευών και σε δορυφορικές ζεύξεις για κινητές μονάδες (όπως στρατιωτικά οχήματα ή πλοία) [19]

### 3.3.2. Μαθηματική ανάλυση κεραίας

Η κεραία αυτή σχεδιάστηκε από 12 δίπολα ίδιου μήκους, τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις κατά μήκος του άξονα X. Η συχνότητα λειτουργίας είναι όμοια με την συχνότητα λειτουργίας της broadside, με μήκος κύματος ίσο με 0.75 μέτρα. Η απόσταση μεταξύ δύο στοιχείων ορίζεται στο ένα τέταρτο του μήκους κύματος, δηλαδή ίση με 0.1875 μέτρα. Το μήκος κάθε διπόλου είναι ίσο με το μισό του μήκους κύματος, δηλαδή 0.375 μέτρα.

Για να πετύχουμε την ενίσχυση και να κατευθύνουμε τη δέσμη προς την επιθυμητή κατεύθυνση, θέτουμε διαφορά φάσης στις πηγές μεταξύ των στοιχείων. Για την κεραία αυτή επιλέξαμε διαφορά φάσης 90 μοιρών. Το πρώτο στοιχείο έχει φάση μηδέν, για να βρούμε το δεύτερο πρέπει να υπολογίσουμε την διαφορά φάσης μεταξύ των στοιχείων. Για τον υπολογισμό 90 μοιρών κάνουμε την εξής πράξη και μετατροπή:

$$k_0 * d = 1.57 \text{ rad} \quad (3.2)$$

$$1.57 \text{ rad} \cong 90^\circ$$

$$\varphi_0 - \varphi_1 = 0 - 90 = -90 \quad (3.3)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -90 - 90 = -180 \quad (3.4)$$

Αυτός ο τρόπος διέγερσης ενισχύει την ακτινοβολία προς τη μία πλευρά του άξονα και εξασθενεί προς την αντίθετη

Η μέγιστη ακτινοβολία της διάταξης προκύπτει από το AF σαν την Broadside αλλά η ιδανική ενίσχυση σε dBi υπολογίζεται βάσει λογαριθμικής σχέσης που εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων και την κατευθυντικότητα της διάταξης. Για N ίσο με 12, η θεωρητική τιμή ενίσχυσης της End-fire κεραίας είναι περίπου ίση με 12dBi.

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου που παρουσιάζει κάθε στοιχείο είναι ίση με 73 Ω σε συντονισμό. Όμως, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων και της διαφοράς φάσης, η σύνθετη αντίσταση εισόδου της end-fire κεραίας μειώνεται. Σε διάταξη με 12 στοιχεία και d ίσο με λ/4, η εμπειρική τιμή κυμαίνεται γύρω στα 30 με 55 Ω, αναλόγως και της διαμέτρου των στοιχείων. Επειδή δεν γνωρίζουμε με ακρίβεια την τιμή της αντίστασης εισόδου θα χρησιμοποιήσουμε την εμπειρική τιμή των 45 Ω για τους υπολογισμούς.  $\Gamma = (-5/95) = -0.0562$ ,  $RL = 20 \log \Gamma = -25.58 \text{ dB}$  και  $SWR = 1.12$ .

### 3.3.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2 - Απεικονίσεις της προσομοίωσης.

Στον κώδικα της End-fire για να ορίσουμε διαφορά φάσης -90 μοιρών πρέπει να αλλάξουμε την φάση της πηγής τάσης μεταβάλλοντας το πραγματικό μέρος της και το φανταστικό. Δηλώνοντας το πραγματικό κομμάτι ως 1, όπου αντιστοιχεί στο cos(φ) και το φανταστικό 0, το οποίο αντιστοιχεί στο sin(φ) ορίζω με αυτό τον τρόπο την φάση σε 0, Για να ορίσω την φάση της πηγής ως -90 μοίρες Ο συνδυασμός φανταστικού και πραγματικού μέρους ορίζει πλήρως την φάση που επιλέγουμε. Το 4nec2 υπολογίζει την φάση της τάσης χρησιμοποιώντας την φόρμουλα του Euler επειδή μαθηματικά εκφράζεται η πηγή ως:

$$V = V_r + jV_i \quad (3.5)$$

Χρησιμοποιώντας την φόρμουλα του Euler:

$$e^{j\varphi} = \cos(\varphi) + j\sin(\varphi) \quad (3.6)$$

Οπότε εκφράζεται ως:

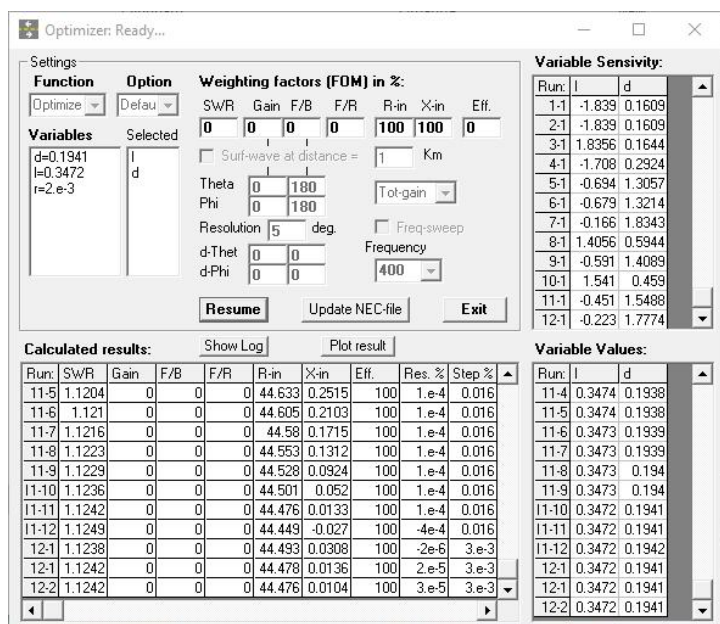
$$V = V_0(\cos(\varphi) + j\sin(\varphi)) \quad (3.7)$$

EX	0	1	6	0	1.0000	0.0000
EX	0	2	6	0	0.0000	-1.0000
EX	0	3	6	0	-1.0000	0.0000
EX	0	4	6	0	0.0000	1.0000
EX	0	5	6	0	1.0000	0.0000
EX	0	6	6	0	0.0000	-1.0000
EX	0	7	6	0	-1.0000	0.0000
EX	0	8	6	0	0.0000	1.0000
EX	0	9	6	0	1.0000	0.0000
EX	0	10	6	0	0.0000	-1.0000
EX	0	11	6	0	-1.0000	-0.0000
EX	0	12	6	0	0.0000	1.0000

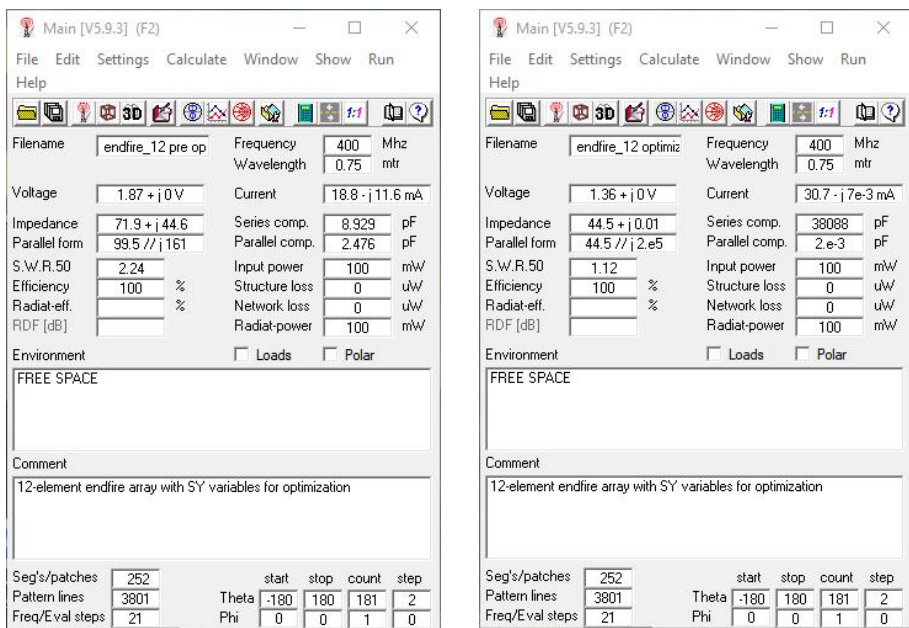
Σχήμα 3.15 Κώδικας 4nec2.

### 3.3.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.

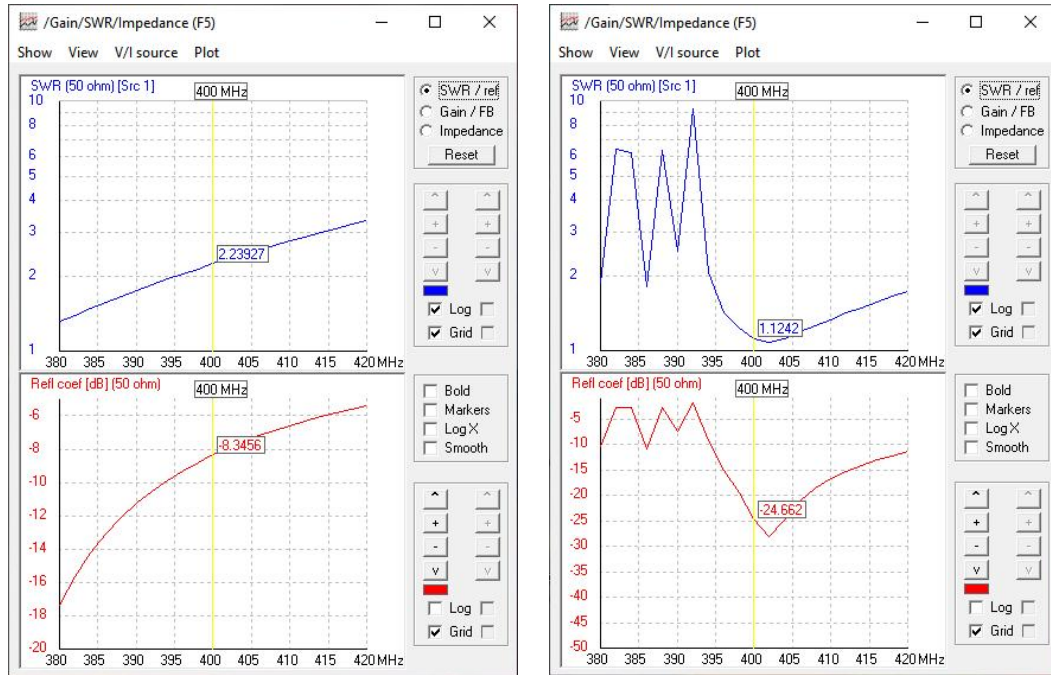
Τρέξαμε τον κώδικα για να δούμε τα αποτελέσματα της κεραίας, παρατηρώντας το παράθυρο main (Σχήμα 3.16) βλέπουμε ότι η κεραία έχει σύνθετη αντίσταση  $72.9 + j44.6 \Omega$  η οποία είναι σχετικά κοντά στα 73 όμως το φανταστικό κομμάτι της αντίστασης πρώτα πρέπει να εξαλειφθεί αλλά πειραματικά γνωρίζουμε ότι λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων και της διαφοράς φάσης η τιμή της αντίστασης μετά τον συντονισμό θα μειωθεί, για αυτό θα πάμε στο optimizer για να ορίσουμε τα δεδομένα. Θα ορίσουμε ως τιμή για το πραγματικό μέρος της αντίστασης  $R_{in} = 73 \Omega$  και φανταστικό  $X_{in} = 0$ . για να δούμε άμα θα μπορέσει να το φέρει σε συντονισμό κοντά στα 75  $\Omega$ . Παρατηρώντας όμως τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι το optimizer σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί να φέρει την κεραία στα 73 ή κοντά στα 73  $\Omega$ , αυτό που προσπαθεί να κάνει είναι να φέρει την κεραία στη μέγιστη ακτινοβολία και να βρει την καλύτερη συμβατότητα μέσα στους περιορισμούς που τέθηκαν, αυτοί οι περιορισμοί μπορεί να είναι φυσικοί όπως το πάχος των αγωγών γιατί το 4nec2 χρησιμοποιεί λεπτά σύρματα. Σε αυτή την περίπτωση το optimizer φέρνει την κεραία στα 44.476  $\Omega$ , αυτό επιτυγχάνεται επειδή το 4nec2 όταν υπολογίζει την αντίσταση εισόδου χρησιμοποιεί την Μέθοδο των Ροπών, δηλαδή μετατρέπει τις εξισώσεις Maxwell σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, υπολογίζει τα ρεύματα σε κάθε τμήμα των διπόλων και υποθέτει ότι το κάθε ρεύμα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά, οπότε επιλέχθηκε ομοαξονικό καλώδιο 50  $\Omega$  για τον συντονισμό αυτής της κεραίας. Στο παράθυρο main παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα της κεραίας όπου η τιμή της αντίστασης εισόδου είναι  $44.5 + j0.01$  και SWR 1.12 που σημαίνει ότι η απόδοση της κεραίας είναι παραδεκτή. Βλέπουμε επίσης ότι η τιμή κέρδους της κεραίας είναι αυτή που θα περίμενε κανείς με βάση της θεωρία.



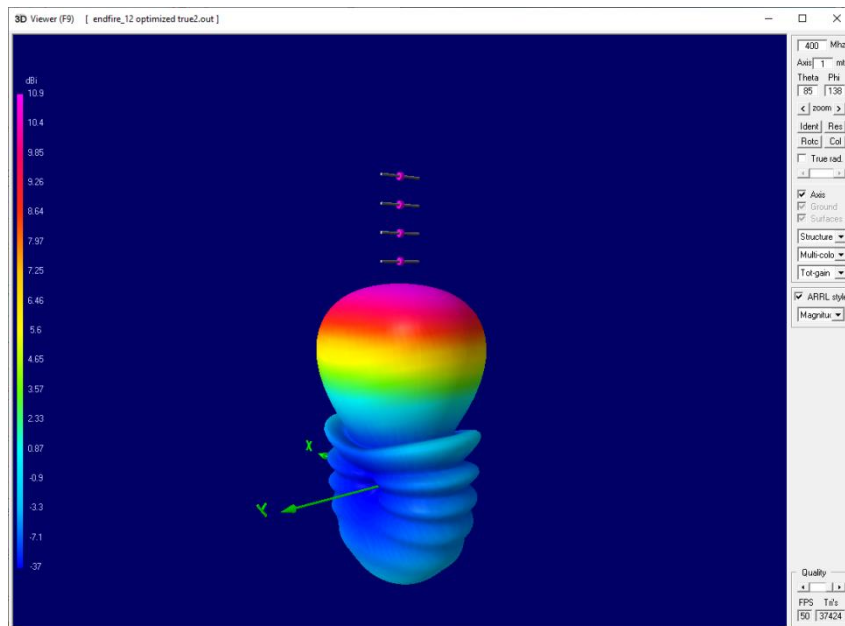
Σχήμα 3.16 Παράθυρο optimizer



Σχήμα 3.17 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων



Σχήμα 3.18 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz πριν τον συντονισμό και μετά.



Σχήμα 3.19 Τρισδιάστατη μορφή σήματος End-fire

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία End-fire)

	Pre optimized	Optimized	Θεωρία
$Z_{in}$	71.9 + 44.6j	44.5 + 0.01j	45+0j
$F_{συντ}$	400MHz	400MHz	400MHz
SWR	2.24	1.12	1.12
RL	-8.34	-24.662	-25.8

Στον πίνακα μπορούμε να δούμε ότι οι εμπειρικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι εξαιρετικά κοντά σε αυτές της προσομοίωσης εκτός από τις τιμές πριν τον συντονισμό. Στην πρώτη περίπτωση μας δείχνει ότι η κεραία δεν είναι κατάλληλα συντονισμένη, η τιμή  $RL = -8.34$  μας δείχνει ότι η επιστροφή του σήματος είναι τεράστια και δεν εκπέμπει η κεραία λόγω μεγάλης αντίστασης. Στην συνέχεια μετά τον συντονισμό η κεραία βλέπουμε ότι συντονίζεται στα 402MHz και όχι ακριβώς στα 400, μια μικρή απόκλιση αυτή της τάξης είναι αμελητέα. Πιο συγκεκριμένα, το SWR έχει τιμή 1.12 και το RL πλέον έχει τιμή -24.662, είναι καλές τιμές και δείχνουν ότι το ποσοστό ανάκλασης κύματος είναι υπερβολικά χαμηλό. Η διαφορά του RL μεταξύ του optimized και της θεωρίας σε ποσοστό % είναι αμελητέα. Το 4nec2 μας δείχνει καθαρά την συμπεριφορά μιας End-fire κεραίας και με τα αποτελέσματα μας εξακριβώνει την λειτουργία. Παρατηρήθηκε όμως ακραία μετάβαση στη αντίσταση εισόδου μετά το optimizer και λόγω της μεταβολής του φυσικού μεγέθους

### 3.4. Κεραίες Phased Array

#### 3.4.1. Περιγραφή κεραίας Phased Array

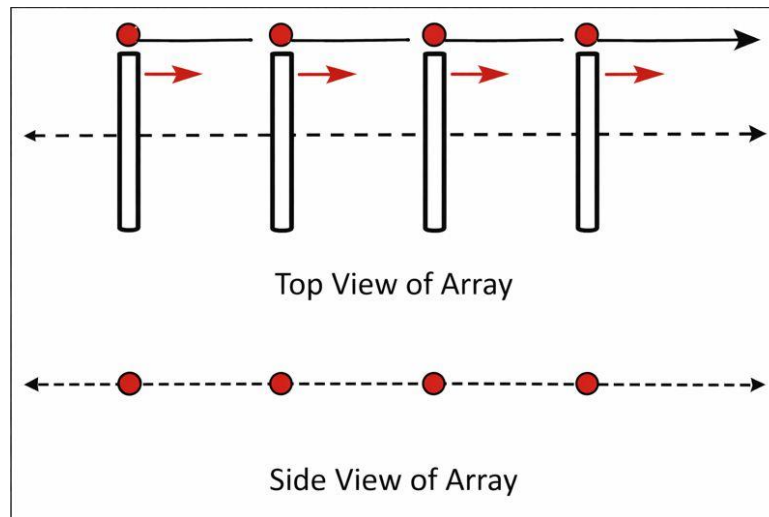
Οι κεραίες τύπου Phased Array (Στοιχειοκεραίες Φασικής Διάταξης) αποτελούν μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα των κεραιών κατά τον 20ό αιώνα, με την ανάπτυξη τους να συνδέεται άμεσα με τις ανάγκες για δυναμικό έλεγχο της κατευθυντικότητας της ακτινοβολίας. Η συστηματική χρήση τους ξεκίνησε επίσης κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές όπως ραντάρ έγκαιρης προειδοποίησης και συστήματα εντοπισμού στόχων, ενώ έκτοτε έχουν βρει εκτεταμένη χρήση και σε πολιτικές εφαρμογές.

Η κεραία Phased Array αποτελείται από ένα σύνολο επιμέρους στοιχείων κεραίας (όπως δίπολα ή patch κεραίες), τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύματα ίδιου πλάτους αλλά με ελεγχόμενες διαφορές φάσης. Μέσω αυτών των διαφορών φάσης, επιτυγχάνεται ο σχηματισμός και η κατεύθυνση της δέσμης ακτινοβολίας χωρίς την ανάγκη μηχανικής περιστροφής της κεραίας. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την ηλεκτρονική σάρωση του χώρου, προσφέροντας υψηλή ταχύτητα απόκρισης και μεγάλη ευελιξία στον έλεγχο της ακτινοβολίας [21].

Το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 3.20) απεικονίζει μία γραμμική διάταξη κεραίας τύπου Phased Array, σε κάτοψη και πλάγια όψη αντίστοιχα. Η διάταξη αποτελείται από ισαπέχοντα στοιχεία κεραίας, τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύματα ίδιου πλάτους αλλά με προοδευτική διαφορά φάσης. Η συγκεκριμένη φασική κατανομή έχει ως αποτέλεσμα η συνολική

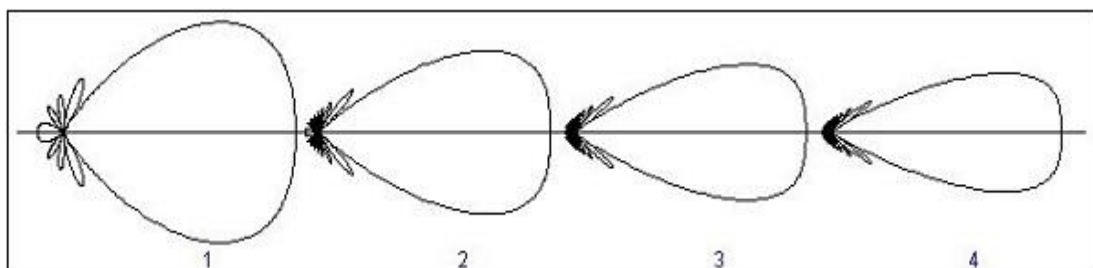
ακτινοβολία της κεραίας να προκύπτει από την ενισχυτική συμβολή των επιμέρους κυμάτων προς μία καθορισμένη κατεύθυνση, όπως υποδεικνύεται από τα βέλη στο σχήμα.

Ο κύριος λοβός ακτινοβολίας σχηματίζεται κατά μήκος της επιθυμητής διεύθυνσης εκπομπής, ενώ σε άλλες κατευθύνσεις παρατηρείται εξασθένιση της ακτινοβολίας λόγω καταστροφικής συμβολής των κυμάτων. Η κατεύθυνση του κύριου λοβού μπορεί να μεταβληθεί με την κατάλληλη ρύθμιση των φασικών διαφορών μεταξύ των στοιχείων, χωρίς μηχανική μετακίνηση της κεραίας [22]



Σχήμα 3.20: Διάταξη κεραίων τύπου Phased Array [22]

Το Σχήμα 3.21 απεικονίζει το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας τύπου Phased Array για διαφορετικές γωνίες φασικής μετατόπισης μεταξύ των στοιχείων της διάταξης. Όπως και στις κεραίες τύπου End-fire, διακρίνεται ο κύριος λοβός ακτινοβολίας, ο οποίος αντιστοιχεί στην κατεύθυνση μέγιστης εκπεμπόμενης ισχύος. Ωστόσο, στις κεραίες Phased Array, η κατεύθυνση του κύριου λοβού μπορεί να μεταβάλλεται δυναμικά μέσω της κατάλληλης ρύθμισης των φασικών διαφορών μεταξύ των επιμέρους στοιχείων, επιτρέποντας την ηλεκτρονική σάρωση του χώρου. Οι πλευρικοί λοβοί, αν και αναπόφευκτοι, μπορούν να περιοριστούν με κατάλληλο σχεδιασμό και κατανομή πλάτους τροφοδοσίας, βελτιώνοντας την κατευθυντικότητα και την ακρίβεια του συστήματος [23].



Σχήμα 3.21. Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Phased Array [23]

Σε αντίθεση με τις απλές κατευθυντικές κεραίες σταθερής δέσμης, οι Phased Array κεραίες προσφέρουν τη δυνατότητα ταχείας ηλεκτρονικής σάρωσης μεγάλων περιοχών του χώρου. Το σήμα μπορεί να κατευθυνθεί διαδοχικά προς διαφορετικές γωνίες, καθιστώντας τις ιδιαίτερα

κατάλληλες για εφαρμογές όπου απαιτείται συνεχής παρακολούθηση πολλαπλών στόχων ή χρηστών. Η απουσία κινούμενων μηχανικών μερών αυξάνει την αξιοπιστία και μειώνει τις ανάγκες συντήρησης [24].

Οι κεραιές τύπου Phased Array παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την κατευθυντικότητα, την απολαβή και την ευελιξία λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται ευρέως (Σχήμα 3.22) σε σύγχρονα ραντάρ αεράμυνας και ναυτιλίας, σε δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας, σε δίκτυα κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G), σε συστήματα εντοπισμού και παρακολούθησης στόχων, καθώς και σε προηγμένα συστήματα επικοινωνίας αεροσκαφών και πλοίων [25].



Σχήμα 3.22 Εφαρμογή κεραιάς τύπου Phased Array [25]

### 3.4.2. Μαθηματική ανάλυση κεραιάς

Το μήκος της κεραιάς Phased Array και η απόσταση μεταξύ των διπόλων βασίστηκε στις κεραιές Broadside και Endfire. Για να δούμε την λειτουργία της Phased Array επιλέγουμε να εκπέμπει στις 30 και 72 μοίρες. Στη συνέχεια κάνουμε τους υπολογισμούς για να ορίσουμε την κατάλληλη διαφορά φάσης.

Για τον υπολογισμό 30 μοιρών:

$$\psi_{30} = kd \cos(30) = 1.36 \text{rad} \quad (3.8)$$

$$\Delta\phi_{30} = -1.36 \text{rad} \rightarrow -77.9^\circ$$

Για τον υπολογισμό 72 μοιρών:

$$\psi_{72} = kd \cos(72) = 0.485 \text{rad} \quad (3.9)$$

$$\Delta\phi_{72} = -0.485 \text{rad} \rightarrow -27.8^\circ$$

Στους πίνακες 3.3 και 3.4 βλέπουμε όλες τις τιμές τις οποίες βάζουμε στον κώδικα και τις φάσης της κεραιάς για τις 30 και 72 μοίρες. Στην στήλη  $\cos(\varphi)$  και  $\sin(\varphi)$  έχουμε τις τιμές που βάζουμε στον κώδικα για την φάση της τάσης, Τα δύο αυτά νούμερα μαζί ορίζουν την φάση της τάσης.

Πίνακας 3.3: Κεραία Phased Array - Φάσεις για Κατεύθυνση 30°

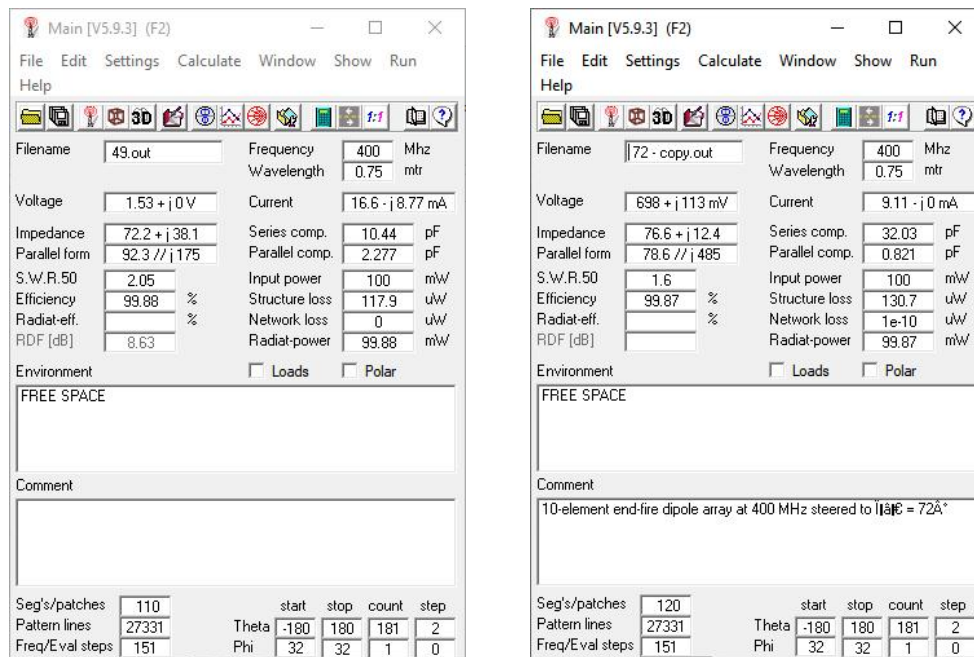
Θέση n	Φάση σε μοίρες(degree)	Φάση $\phi_n$ (rad)	$\cos(\phi_n)$	$\sin(\phi_n)$
0	0	-0.0	1.0	-0.0
1	-77.94	-1.36	0.209	-0.978
2	-155.9	-2.72	-0.912	-0.409
3	126.17	-4.08	-0.591	0.807
4	48.231	-5.44	0.665	0.747
5	-29.71	-6.8	0.869	-0.494
6	-107.7	-8.16	-0.301	-0.954
7	174.4	-9.52	-0.995	0.095
8	96.46	-10.88	-0.115	0.993
9	18.518	-12.24	0.947	0.321

Πίνακας 3.4: Κεραία Phased Array - Φάσεις για Κατεύθυνση 72°

Θέση n	Φάση σε μοίρες(degree)	Φάση $\phi_n$ (rad)	$\cos(\phi_n)$	$\sin(\phi_n)$
0	0	-0.0	1.0	-0.0
1	-27.82	-0.485	0.885	-0.466
2	-55.5	-0.97	0.565	-0.825
3	-83.42	-1.455	0.116	-0.993
4	-111.2	-1.94	-0.361	-0.933
5	-139	-2.425	-0.754	-0.657
6	-166.9	-2.91	-0.973	-0.23
7	165.7	-3.395	-0.968	0.251
8	137.65	-3.88	-0.74	0.673
9	109.74	-4.365	-0.34	0.94

### 3.4.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2 - Απεικονίσεις της προσομοίωσης.

Τρέχοντας το πρόγραμμα πρώτη φορά βλέπουμε ότι και οι δύο κεραίες δεν είναι συντονισμένες, η πρώτη με SWR 2.05 και η δεύτερη 1.6, οποιαδήποτε τιμή πάνω από 2 δεν είναι αποδεκτή αν και η δεύτερη τιμή είναι αποδεκτή μπορούμε μέσω του optimizer επίσης να την φέρουμε σε συντονισμό. Χρησιμοποιώντας το optimizer βλέπουμε ότι υπάρχει μικρή μεταβολή από την αρχική διαφορά μεταξύ των διπόλων από 0.1875μ στα 0.1891μ το μήκος των διπόλων επίσης μεταβλήθηκε από 0.375μ σε 0.35424μ για την κεραία των 30 μοιρών. Στην συνέχεια για την κεραία των 72 μοιρών μεταβλήθηκε το μήκος των διπόλων στα 0.349μ χωρίς να μεταβληθεί η θέση τους πάνω στον άξονα



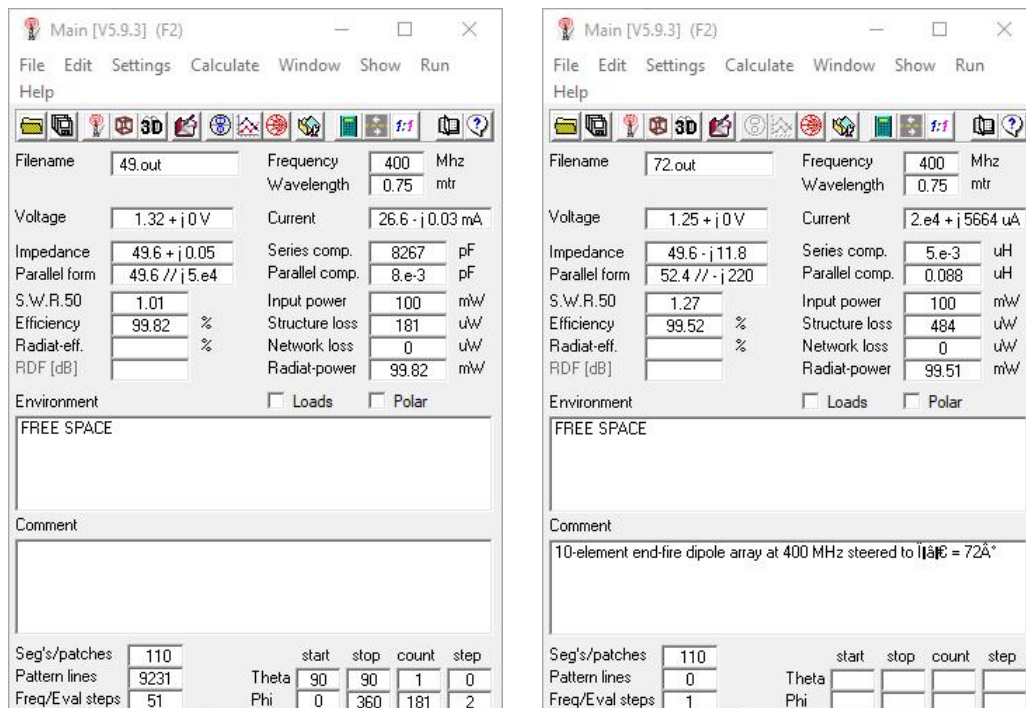
Σχήμα 3.23 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων.

EX 0 1 6 0 1.0000 0 0	EX 0 1 6 0 1.00000 0.00000 0
EX 0 2 6 0 0.2089 -0.9779 0	EX 0 2 6 0 0.88485 -0.46699 0
EX 0 3 6 0 -0.9127 -0.4086 0	EX 0 3 6 0 0.56635 -0.82416 0
EX 0 4 6 0 -0.5902 0.8072 0	EX 0 4 6 0 0.11459 -0.99341 0
EX 0 5 6 0 0.6661 0.7458 0	EX 0 5 6 0 -0.36232 -0.93205 0
EX 0 6 6 0 0.8685 -0.4956 0	EX 0 6 6 0 -0.75515 -0.65555 0
EX 0 7 6 0 -0.3033 -0.9529 0	EX 0 7 6 0 -0.97399 -0.22677 0
EX 0 8 6 0 -0.9952 0.0975 0	EX 0 8 6 0 -0.96905 0.24693 0
EX 0 9 6 0 -0.1125 0.9936 0	EX 0 9 6 0 -0.73900 0.67368 0
EX 0 10 6 0 0.9482 0.3176 0	EX 0 10 6 0 -0.33771 0.94125 0
FR 0 0 0 0 400 0	FR 0 0 0 0 400 0
RP 0 361 1 1000 90 0 1 0	RP 0 361 1 1000 90 0 1 0

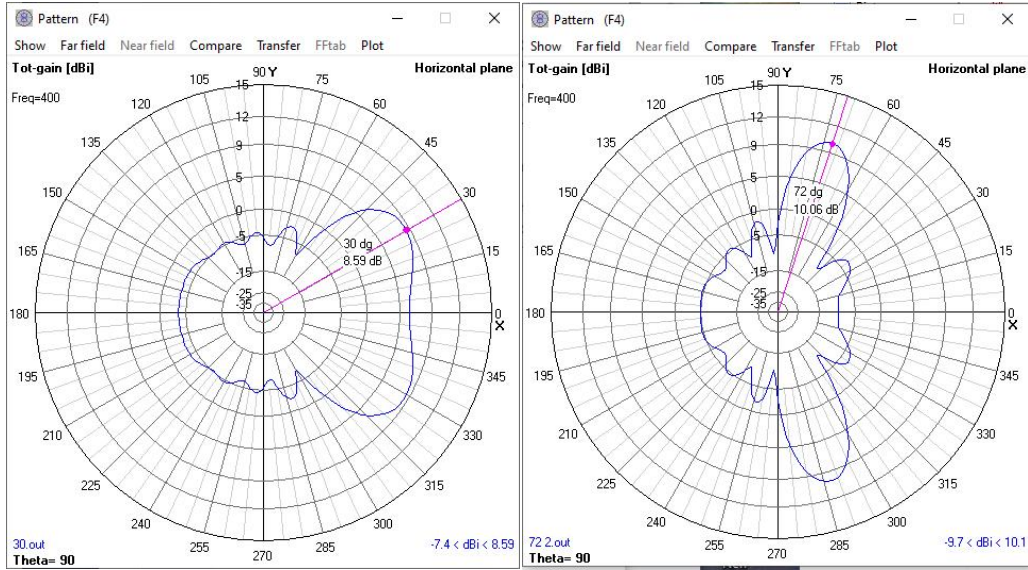
Σχήμα 3.24 Κώδικας 4nec2 για τις φάσεις των πηγών.

### 3.4.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.

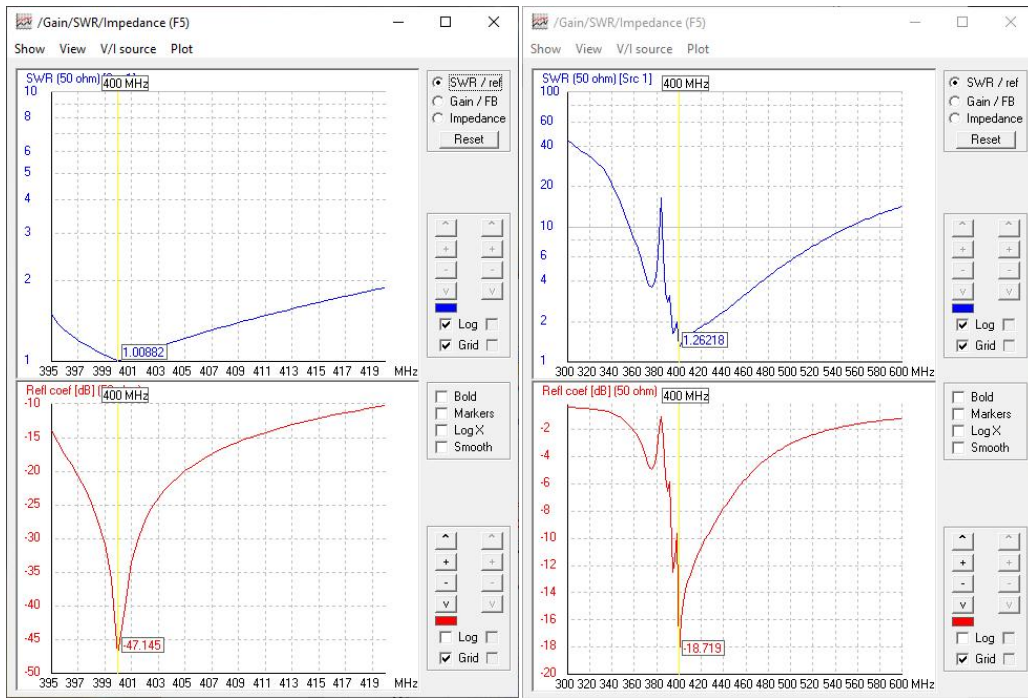
Αφού τρέξουμε το optimizer μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο κεντρικό παράθυρο. Η αντίσταση εισόδου των κεραιών βρίσκεται στα  $49.6 + j0.05$  για την κεραία 30 μοιρών και  $49.6 - j11.8j$  για την κεραία 72 μοιρών που είναι αν και όχι ιδανική πολύ καλή όμως τιμή για αντίσταση εισόδου με SWR στα 1.01 και 1.27 που τις καθιστά σχεδόν ιδανικές. Μπορούμε στην εικόνα να δούμε ότι η μέγιστη ακτινοβολούμενη ισχύς είναι στις 30 μοίρες και ότι για τις 72 μοίρες ισχύει το ίδιο. Πατώντας το δεξί και αριστερό βελάκι μπορούμε να δούμε τις τιμές της κατευθυντικότητας γύρω από τις 30 και 72 μοίρες και να εξακριβώσουμε ότι η μέγιστη τιμή εκπέμπεται προς τις τιμές που ορίσαμε εμείς. Οι δύο αυτές προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι οι δύο αυτές κεραιές αν και έχουν την ίδια αρχιτεκτονική η διαφορά φάσης μεταξύ πηγών επηρεάζει σε διαφορετικό βαθμό.



Σχήμα 3.25 Αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση του κώδικα.



Σχήμα 3.26 Κέρδος κεραίας Phased Array στην συχνότητα συντονισμού και γωνία εκπομπής.



Σχήμα 3.27 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 400MHz στον συντονισμό.

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία Phased Array) για κατεύθυνση 30 και 72 μοιρών.

30°	Pre optimized	Optimized	Θεωρία
$Z_{in}$	72.2 + 38.1j	49.6 + 0.05j	50 + 0j
$F_{\text{συντ}}$	400MHz	400MHz	400MHz
$SWR$	2.05	1.01	1
$RL$	-9.25	-47.14	$-\infty$

72°	Pre optimized	Optimized	Θεωρία
$Z_{in}$	76.6 + 12.4j	49.6 – 11.8j	50 + 0j
$F_{\text{συντ}}$	400MHz	400MHz	400MHz
$SWR$	16	1.27	1
$RL$	-10.514	-18.72	$-\infty$

Παρατηρήθηκε λοιπόν σε αυτό το κεφάλαιο ότι οι στοιχειοκεραίες άσχετα με τον σκοπό του αρχικού τους σχεδιασμού, με κατάλληλη προσαρμογή και υπολογισμό φάσεων της τάσης μπορούν να εκπέμπουν προς όποια κατεύθυνση θέλουμε εμείς. Παρατηρήθηκε επίσης ότι αν και οι δύο γωνίες εκπομπής που επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν με ίδιο μοντέλο κεραίας είχανε διαφορά στο κέρδος 1.51dB, αυτό σημαίνει ότι λόγω διαφορετικής γωνίας εκπομπής μεταβάλλεται και το τελικό κέρδος της κεραίας. Κοιτώντας όμως τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι αν και η κεραία με γωνία 30 μοιρών είναι πιο συμβατή με την γεωμετρία της κεραίας με  $RL$  -47.14dB που σημαίνει υπερβολικά χαμηλή επιστροφή ρεύματος και  $SWR$  1.01 που την κάνει σχεδόν ιδανική, έχει χαμηλότερο κέρδος. Ενώ στην εκπομπή 72 μοιρών το  $RL$  έχει τιμή -18.72 που σημαίνει επίσης καλή προσαρμογή αλλά χειρότερη από την 30 μοιρών το οποίο γίνεται επίσης φανερό από την τιμή της αντίστασης εισόδου. Η διαφορά της ισχύς της κεραίας μαθηματικά είναι της τάξεως του 1.5% το οποίο την κάνει αμελητέα.

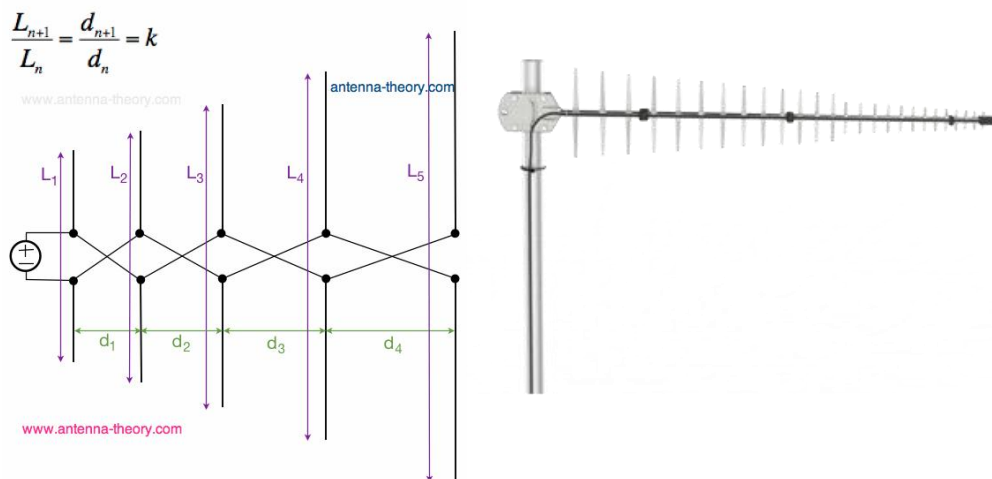
## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Κεραία LPDA

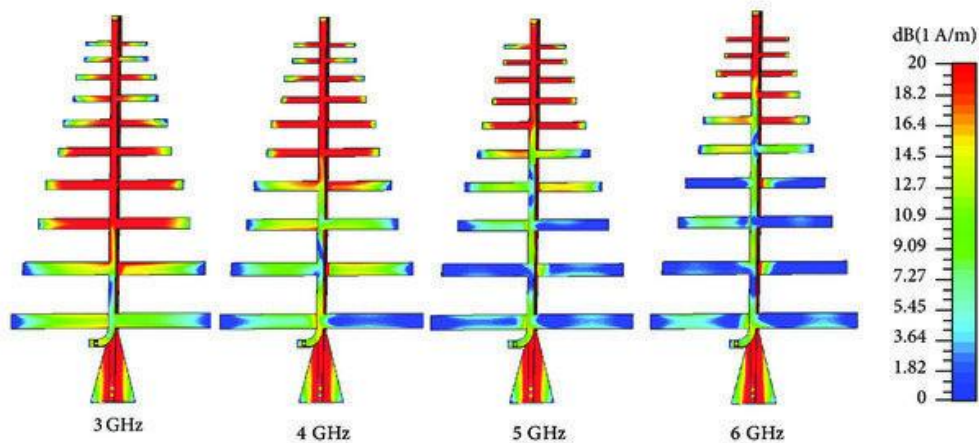
### 4.1. Περιγραφή κεραίας LPDA

Οι κεραίες τύπου Log-Periodic Dipole Array (LPDA) αποτελούν μία κατηγορία κατευθυντικών στοιχειοκεραίων ευρείας ζώνης, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα μέσα του 20ού αιώνα με σκοπό την επίτευξη σχεδόν σταθερών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη λογαριθμική μεταβολή των γεωμετρικών διαστάσεων των επιμέρους στοιχείων, γεγονός που προσδίδει στην κεραία σταθερή απολαβή, κατευθυντικότητα και λόγο εμπρόσθιας προς οπίσθια ακτινοβολία σε ευρύ φασματικό εύρος [26], [27].

Η κεραία LPDA αποτελείται από μία σειρά διπόλων διαφορετικού μήκους, τα οποία είναι τοποθετημένα κατά μήκος δύο παράλληλων αγωγών και τροφοδοτούνται εναλλάξ με αντίθετη φάση. Τα μήκη των διπόλων και οι αποστάσεις μεταξύ τους μεταβάλλονται σύμφωνα με έναν σταθερό λογαριθμικό λόγο, ο οποίος καθορίζει τη λειτουργική ζώνη συχνοτήτων της κεραίας. Για κάθε συχνότητα λειτουργίας, ενεργοποιείται κυρίως μία υποομάδα στοιχείων, γνωστή ως ενεργή περιοχή, η οποία συμβάλλει καθοριστικά στη διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας [26], [28].

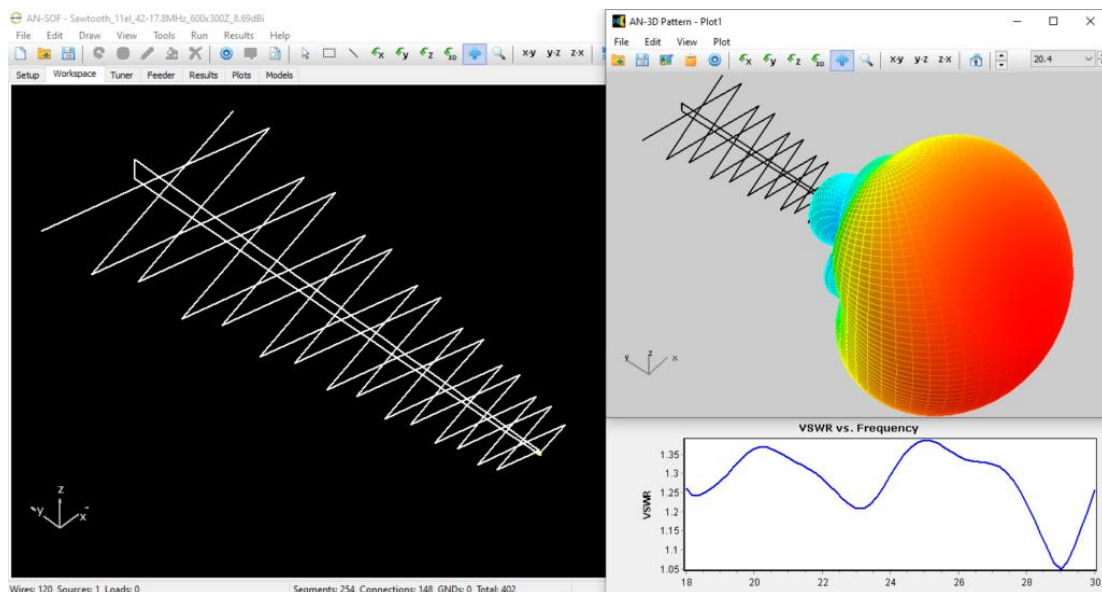
Η φυσική διάταξη της κεραίας LPDA παρουσιάζει ομοιότητες με τις κεραίες τύπου End-fire, καθώς η ακτινοβολία κατευθύνεται κατά μήκος του άξονα της κεραίας, προς την πλευρά των μικρότερων διπόλων (Σχήμα 4.1). Ωστόσο, σε αντίθεση με τις κεραίες End-fire, η κατευθυντικότητα της LPDA δεν επιτυγχάνεται μέσω προοδευτικής φασικής μετατόπισης, αλλά μέσω της γεωμετρικής κλιμάκωσης των στοιχείων και της επιλεκτικής ενεργοποίησης της ενεργής περιοχής [27], [29].





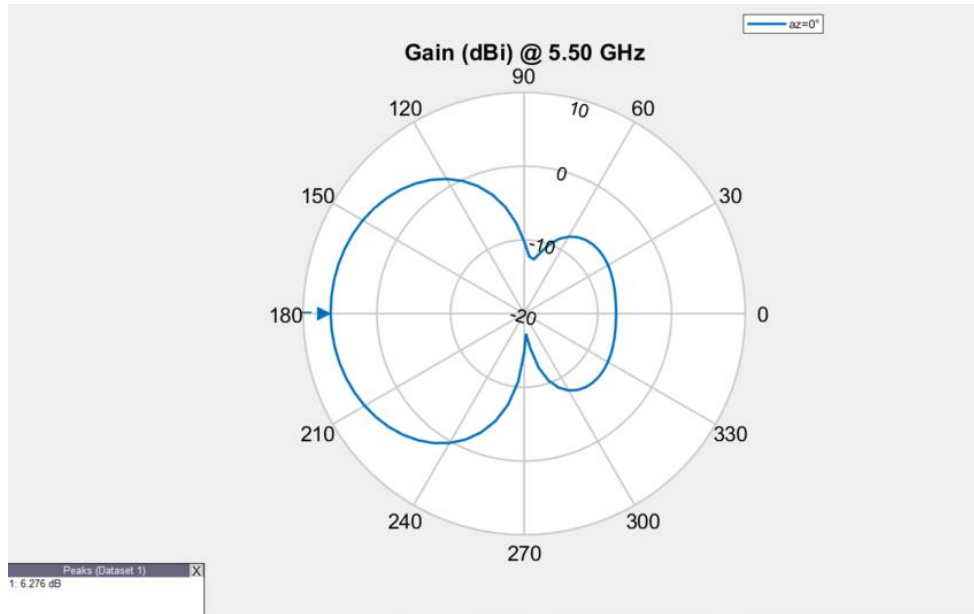
Σχήμα 4.1: Διάταξη κεραιών τύπου LPDA [27]

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραιάς LPDA χαρακτηρίζεται από έναν κύριο λοβό με σχετικά σταθερό πλάτος και απολαβή σε ολόκληρη τη ζώνη λειτουργίας της (Σχήμα 4.2α). Οι πλευρικοί λοβοί διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός που βελτιώνει την κατευθυντικότητα της κεραιάς και περιορίζει τις ανεπιθύμητες παρεμβολές από άλλες κατευθύνσεις [27], [30].



Σχήμα 4.2α: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραιών τύπου LPDA [27]

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς LPDA παρουσιάζει έναν σαφώς καθορισμένο κύριο λοβό προς την κατεύθυνση των μικρότερων στοιχείων της διάταξης. Η μορφή του διαγράμματος παραμένει σχεδόν αμετάβλητη για διαφορετικές συχνότητες εντός της σχεδιασμένης ζώνης λειτουργίας, γεγονός που αποτελεί βασικό πλεονέκτημα των κεραιών αυτής της κατηγορίας και τις καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλες για ευρυζωνικές εφαρμογές [26], [27]



Σχήμα 4.2β: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραιών τύπου LPDA [27]

Οι κεραίες τύπου LPDA χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευρυζωνική απόκριση και σταθερά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Ενδεικτικά, εφαρμόζονται σε συστήματα τηλεοπτικής και ραδιοφωνικής λήψης στις ζώνες VHF και UHF, σε μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), σε συστήματα παρακολούθησης και ανάλυσης φάσματος, καθώς και σε στρατιωτικές, ερευνητικές και τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές όπου απαιτείται αξιόπιστη λειτουργία σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων [27], [28], [31].



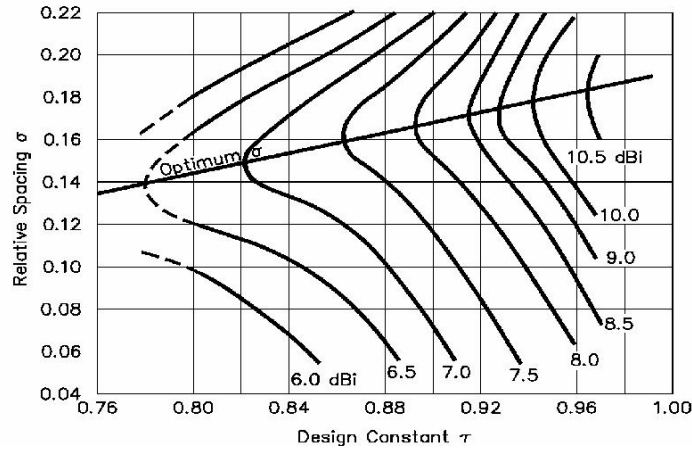
Σχήμα 4.3 Εφαρμογές κεραιάς τύπου LPDA [27], [28], [31].

#### 4.2. Μαθηματική ανάλυση κεραιάς LPDA

Ο στόχος για κάθε σχεδιασμό κεραιάς LPDA όπως και κάθε κεραιάς είναι να πληροί κάποιες προδιαγραφές. Ένας από τους πιο μεθοδικούς και ολοκληρωμένους σχεδιασμούς είναι αυτός του Carrel. Με βάση ένα σετ γραφημάτων και υπολογισμών βασισμένες στις παραμέτρους  $\tau$  και  $\sigma$  τα οποία συσχετίζονται από την εξίσωση:

$$\cot \alpha = \left[ \frac{4\sigma}{1-\tau} \right] = 10.805 \quad (4.1)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{1-\tau}{4\sigma} \right] = 5.29^\circ \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.4: Συντελεστής θέσης και συντελεστής κλίμακας [32]

Όταν επιλέξουμε το  $\tau$  και  $\sigma$  μπορούμε να βρούμε το  $a$ . Για να επιλέξουμε όμως το  $\tau$  και  $\sigma$  πρέπει αρχικά να επιλέξουμε την κατευθυντικότητα σε dB. Για την κεραία αυτή επιλέξαμε τιμή γύρω στα 9dB. Έχει αναφερθεί επίσης ότι το σχήμα μεταξύ  $\sigma$  και  $\tau$  θα μας δώσει 1-2dB υψηλότερη κατευθυντικότητα. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ  $\tau$  και  $\sigma$  είναι ιδανική, για αυτό μπορούμε να διαφοροποιήσουμε τις τιμές ελάχιστα για να σχεδιάσουμε την κεραία. Οι τιμές που επιλέξαμε εμείς για να είμαστε για κέρδος 9dB από το σχήμα  $\chi$  είναι  $\tau=0.933$  και  $\sigma=0.181$ . Για να βρεθεί το ιδανικό  $\tau$  και  $\sigma$  ή για να είναι ικανοποιητικά μπορεί κάποιος να μεταβάλει ελάχιστα τις τιμές αυτές στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο. Το φάσμα λειτουργίας που επιλέχθηκε για την κεραία είναι 680MHz έως 2.5GHz. Το φάσμα λειτουργίας είναι αυτό που ορίζει τα μεγέθη του μεγαλύτερου και μικρότερου δίπολου. Το φάσμα της ενεργής περιοχής ορίζεται από την κατασκευή. Ο Carrel[4] δίνει έναν ημι-εμπειρικό τύπο για τον υπολογισμό του φάσματος λειτουργίας. Η ενεργή περιοχή λειτουργίας ( $B_{ar}$ ) είναι ένας πολλαπλασιαστής διόρθωσης που χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό κεραιών LPDA.

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7(1 - t)^2 \cot a = 1.4734 \approx 1.47 \quad (4.3)$$

Στην πραγματικότητα για τον σχεδιασμό της κεραίας, θέλουμε να την σχεδιάσουμε να λειτουργεί σε λίγο μεγαλύτερο φάσμα ( $B_s$ ) για να είμαστε σίγουροι ότι θα καλύψουμε το φάσμα στο οποίο θέλουμε η κεραία να λειτουργεί ( $B$ ). Όπου:

$$B = \frac{f_{max}}{f_{min}} = 3.676 \quad (4.4)$$

$$B_s = BB_{ar} = 4.96 \approx 5 \quad (4.5)$$

$B_s$  = φάσμα σχεδιασμού

$B$  = φάσμα που θέλουμε εμείς

$B_{ar}$  = ενεργή περιοχή φάσματος

Το ρεύμα λειτουργίας δεν μοιράζεται σε όλα τα δίπολα της κεραίας αλλά, βρίσκεται στα δίπολα που το μήκος τους συντονίζεται για την συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτό ονομάζουμε ενεργή περιοχή.

Μπορούμε να υπολογίσουμε το πλήρες μήκος της κεραίας ( $L$ ) ξεκινώντας από το μικρότερο έως το μεγαλύτερο μήκος των δίπολων της κεραίας.

$$L = \frac{\lambda_{max}}{4} \left(1 - \frac{1}{B_s}\right) \cot \alpha = 0.787m \quad (4.6)$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό δίπολων για τον σχεδιασμό της κεραίας LPDA από τον τύπο του Carrel [4]:

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)} = 24.09 \quad (4.7)$$

Μήκος δίπολων από συχνότητα

$$L_{min} = \frac{c}{2F_H}, L_{max} = \frac{c}{2F_L} * k \quad (4.8)$$

Πολλαπλασιάζουμε με  $k=0.94$  (συντελεστής διόρθωσης) και στην συνέχεια υπολογίζουμε τα υπόλοιπα μήκη των κεραίων με βάση το μεγαλύτερο δίπολο για να είμαστε σίγουροι ότι όλα τα δίπολα έχουν έρθει κοντά στο κατάλληλο μήκος λειτουργίας τους

Τύπος για το μήκος των στοιχείων

$$L_n = L_1 * \tau^{n-1} \quad (4.9)$$

Το  $s$  ορίζει το διάκενο μεταξύ των στοιχείων, η απόσταση μεταξύ των δίπολων αλλάζει για κάθε δίπολο γιατί εξαρτάται από το μήκος του προηγούμενου δίπολου, δηλαδή άμα θέλω να υπολογίσω την θέση για το 7ο δίπολο τότε στην εξίσωση θα χρησιμοποιήσω την τιμή του 6ου δίπολου (Πίνακας 4.1)

$$s_n = 2\sigma L_n \quad (4.10)$$

Πρέπει για την κατάλληλη απόδοση να υπολογίσουμε την διάμετρο των δίπολων αλλά για να κάνουμε απλούστερα τα πράγματα και να μην έχουμε προβλήματα με την προσομοίωση, επειδή το 4nec2 έχει κάποιους περιορισμούς όταν τα μεγέθη είναι πολύ μικρά μπορεί να κάνει λάθος στις πράξεις. Για αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μόνο η διάμετρος του πρώτου στοιχείου για όλα τα δίπολα. Το  $D$  για τις κεραίες LPDA από το βιβλίο του Balanis [26] μας λέει ότι είναι:

$$D = 0.01\lambda_{mid} \quad (4.11)$$

Για να βρούμε το  $\lambda_{mid}$  πρέπει να βρούμε την μέση συχνότητα  $f_{mid}$ :

$$f_{mid} = \sqrt{f_L f_H} \quad (4.12)$$

$$f_{mid} = \sqrt{680 * 2500} = 1303.8MH \quad (4.13)$$

$$\lambda_{mid} = \frac{c}{f_{mid}} = \frac{3*10^8}{1.3038*10^9} \rightarrow \lambda_{mid} = 0.230m \quad (4.14)$$

Άρα το  $D$  πλέον μπορεί να υπολογιστεί όπως και η ακτίνα του δίπολου:

$$D = 2.30mm$$

$$r = 0.00115m$$

Πίνακας 4.1: Κεραία LPDA – Μήκη διπόλων και γεωμετρική θέση

Element	X Position (m)	Full-Length (m)
1	0.0000	0.20735
2	0.07506	0.19344
3	0.14511	0.18069
4	0.21052	0.16873
5	0.27158	0.15763
6	0.32863	0.14695
7	0.38180	0.13692
8	0.43134	0.12747
9	0.47749	0.11854
10	0.52041	0.11010
11	0.56027	0.10213
12	0.59725	0.09458
13	0.63151	0.08741
14	0.66315	0.08060
15	0.69231	0.07412
16	0.71914	0.06796
17	0.74375	0.06208
18	0.76624	0.05649
19	0.78668	0.05116
20	0.80520	0.04608
21	0.82188	0.04123
22	0.83681	0.03659
23	0.85006	0.03215
24	0.86170	0.02790

### 4.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2 - Απεικονίσεις της προσομοίωσης

```

CM
CM F1 = 680 MHz, FH = 2500 MHz, Number of LP elements = 24
CM TAU-L = 0.933 TAU-S = 0.933 SIGMA = 0.18100
CM | Feeder Z = 73 ohms
CE
GW 1 33 0.00000 -0.10368 0 0.00000 0.10368 0 0.00115
GW 2 33 0.07506 -0.09672 0 0.07506 0.09672 0 0.00115
GW 3 31 0.14511 -0.09035 0 0.14511 0.09035 0 0.00115
GW 4 31 0.21052 -0.08437 0 0.21052 0.08437 0 0.00115
GW 5 29 0.27158 -0.07882 0 0.27158 0.07882 0 0.00115
GW 6 29 0.32863 -0.07347 0 0.32863 0.07347 0 0.00115
GW 7 27 0.38180 -0.06846 0 0.38180 0.06846 0 0.00115
GW 8 27 0.43134 -0.06374 0 0.43134 0.06374 0 0.00115
GW 9 25 0.47749 -0.05927 0 0.47749 0.05927 0 0.00115
GW 10 25 0.52041 -0.05505 0 0.52041 0.05505 0 0.00115
GW 11 23 0.56027 -0.05107 0 0.56027 0.05107 0 0.00115
GW 12 23 0.59725 -0.04729 0 0.59725 0.04729 0 0.00115
GW 13 21 0.63151 -0.04370 0 0.63151 0.04370 0 0.00115
GW 14 21 0.66315 -0.04030 0 0.66315 0.04030 0 0.00115
GW 15 19 0.69231 -0.03706 0 0.69231 0.03706 0 0.00115
GW 16 19 0.71914 -0.03398 0 0.71914 0.03398 0 0.00115
GW 17 17 0.74375 -0.03104 0 0.74375 0.03104 0 0.00115
GW 18 17 0.76624 -0.02825 0 0.76624 0.02825 0 0.00115
GW 19 15 0.78668 -0.02558 0 0.78668 0.02558 0 0.00115
GW 20 15 0.80520 -0.02304 0 0.80520 0.02304 0 0.00115
GW 21 13 0.82188 -0.02062 0 0.82188 0.02062 0 0.00115
GW 22 13 0.83681 -0.01830 0 0.83681 0.01830 0 0.00115
GW 23 11 0.85006 -0.01608 0 0.85006 0.01608 0 0.00115
GW 24 11 0.86170 -0.01395 0 0.86170 0.01395 0 0.00115
GE 0
EX 0 24 6 0 1. 0.
FR 0 92 0 0 680 20
TL 1 17 2 17 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 2 17 3 16 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 3 16 4 16 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 4 16 5 15 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 5 15 6 15 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 6 15 7 14 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 7 14 8 14 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 8 14 9 13 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 9 13 10 13 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 10 13 11 12 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 11 12 12 12 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 12 12 13 11 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 13 11 14 11 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 14 11 15 10 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 15 10 16 10 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 16 10 17 9 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 17 9 18 9 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 18 9 19 8 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 19 8 20 8 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 20 8 21 7 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 21 7 22 7 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 22 7 23 6 -73 0. 0. 0. 0. 0.
TL 23 6 24 6 -73 0. 0. 0. 0. 0.
RP 0 1 360 1500 90. 0. 0. 1. 0. 0.
EN

```

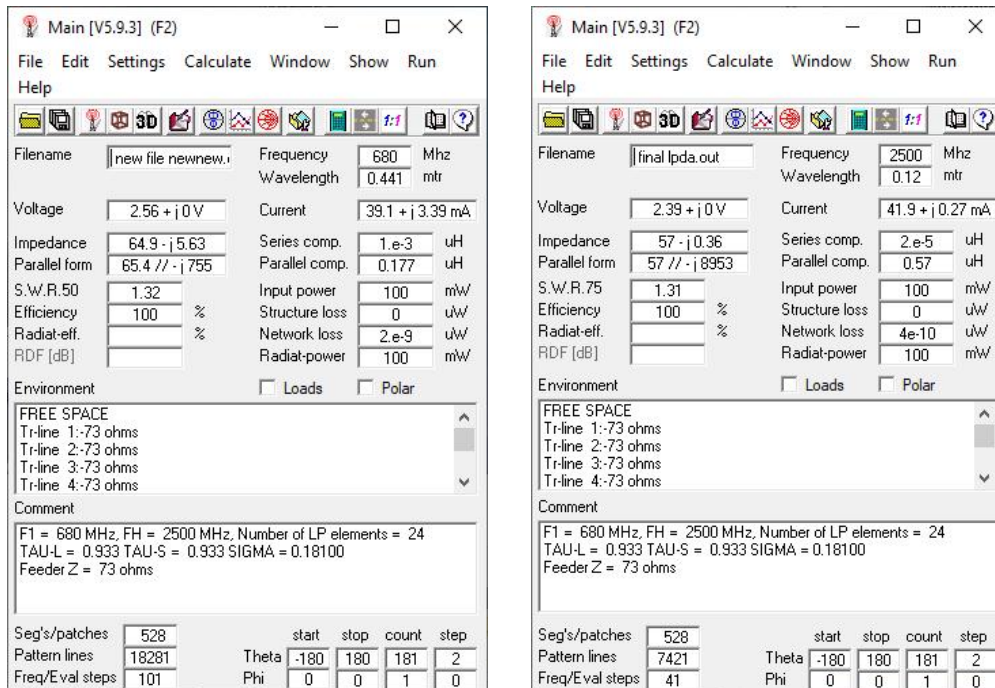
Σχήμα 4.5 Κώδικας 4nec2.

Στον κώδικα μπορούμε να δούμε ότι το δίπολο έχει τοποθετηθεί εις μήκος του άξονα X και το μήκος των διπόλων είναι μεταξύ των αρνητικών και θετικών τιμών πάνω στον άξονα Y. Βλέπουμε στο σχήμα 4.5 ότι χρησιμοποιήθηκε μια νέα εντολή το **TL(transmission line)**, η εντολή TL χρησιμοποιείται για να συνδέσει δύο καλώδια η τμήματα καλωδίων με μια γραμμή μεταφοράς. Η μορφή της εντολής έχει ως εξής.

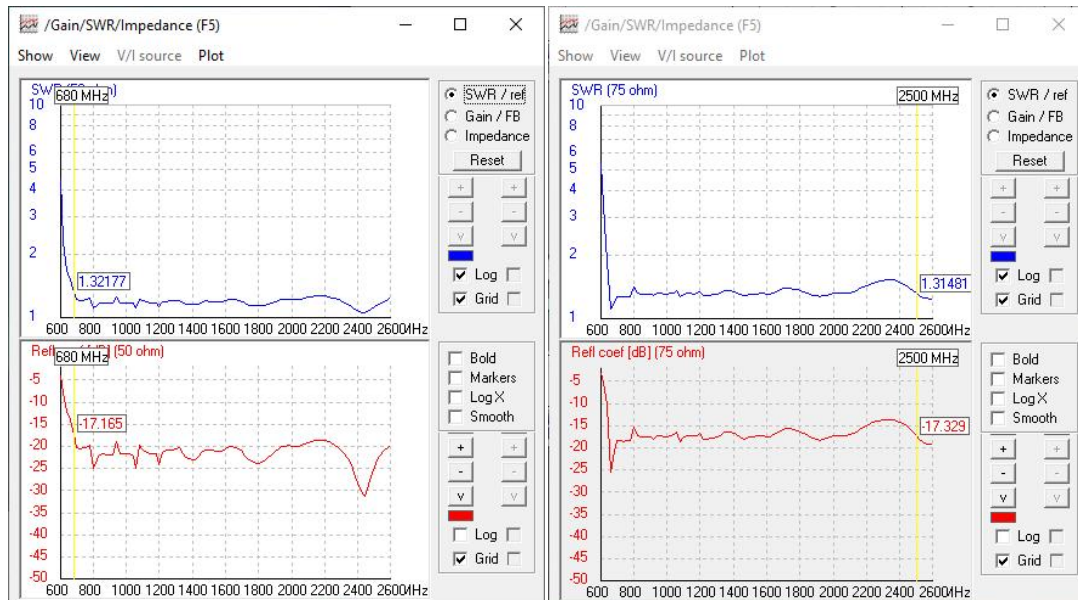
TL tag1 seg1 tag2 seg2 Z0 length phase

Τα tag1 seg1 δηλώνουν την κεραία και το κομμάτι της κεραίας από το οποίο ξεκινάει το καλώδιο προσαρμογής και πηγαίνει στο tag2 seg2, δηλαδή στο καλώδιο η στην κεραία που θέλουμε και στο κομμάτι που θέλουμε. Στην συνέχεια έχουμε την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς η οποία επιλέχθηκε να είναι 73 Ω γιατί γνωρίζουμε ότι ένα δίπολο στον ελεύθερο χώρο έχει χαρακτηριστική αντίσταση 73 Ω για να μην υπάρχει αντανάκλαση ρεύματος μέσα στην γραμμή μεταφοράς. Τέλος τα length και phase ορίζονται και τα δύο 0 γιατί δεν μας ενδιαφέρει να υπάρχει διαφορά φάσης στο καλώδιο.

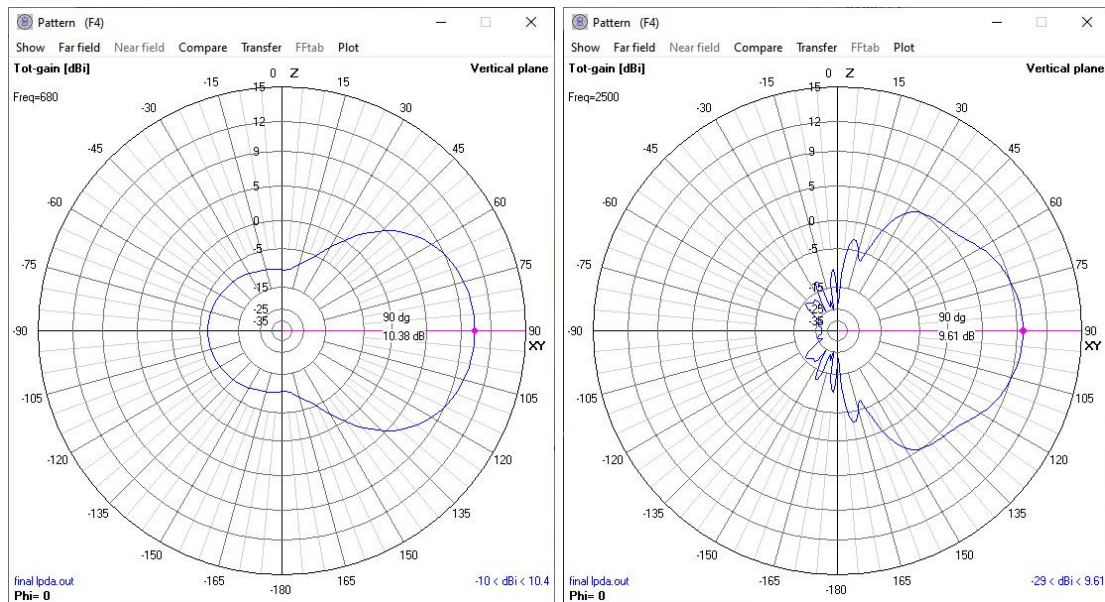
#### 4.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.



Σχήμα 4.6 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων στα 680 MHz και 2.5 GHz

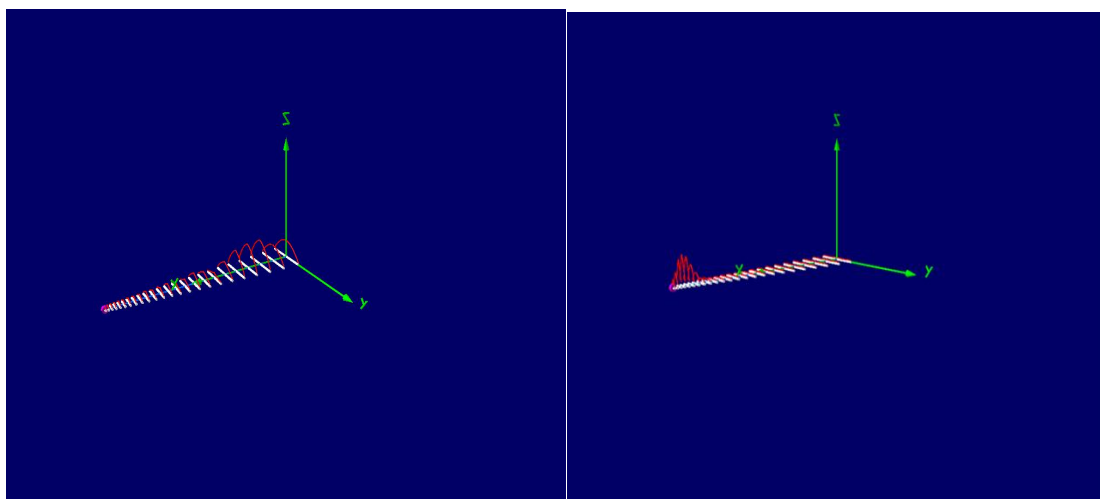


Σχήμα 4.7 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 680 MHz και στα 2.5 GHz στον συντονισμό.



Σχήμα 4.8 Κέρδος κεραίας LPDA στην συχνότητα συντονισμού στα 680 MHz και στα 2.5 GHz.

Μπορούμε να δούμε τις τιμές SWR για όλο το φάσμα λειτουργίας της κεραίας και πως από την αρχή έως το τέλος του η τιμή  $SWR < 2$ . Η τιμή προσαρμογής που επιλέξαμε για τα 680 MHz είναι  $75 \Omega$  και για την συχνότητα 2.5 GHz είναι  $75 \Omega$  που βλέπουμε σε όλο το φάσμα ότι είναι μικρότερη του 2, γνωρίζουμε ότι από τις εμπειρικές και θεωρητικές μελέτες του Carrel [4] ότι η αντίσταση εισόδου μιας LPDA κεραίας είναι μεταξύ των  $50$  και  $75 \Omega$  για αυτό η εκπομπή του σήματος είναι εξαιρετική και για τις δύο περιπτώσεις. Μπορούμε επίσης να δούμε στα διαγράμματα το κέρδος της κεραίας που σχεδιάσαμε το κέρδος είναι μεγαλύτερο από 9 dBi για το οποίο σχεδιάσαμε την κεραία για την συχνότητα 680MHz το κέρδος είναι 10.4 dBi και για τα 2.5 GHz το κέρδος είναι 9.61 dBi. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η κεραία είναι πολύ καλά σχεδιασμένη.



Σχήμα 4.9 Τρισδιάστατες μορφές LPDA με ενεργά δίπολα για τα 680 MHz και για τα 2.5 GHz

Στην τρισδιάστατη μορφή μπορούμε να δούμε ποια δίπολα βρίσκονται σε λειτουργία ή εκπέμπουν, στο σχήμα 4.9 βλέπουμε τα δίπολα που βρίσκονται σε λειτουργία για τα 680 MHz και για τα 2.5 GHz. Μπορούμε χρησιμοποιώντας τον τύπο του Carrel [4] για την ενεργή περιοχή να βρούμε πόσα στοιχεία θα είναι ενεργά. Στο βιβλίο του Carrel [4], έδειξε ότι ο αριθμός ενεργών διπόλων είναι:

$$N_{active} = \frac{1}{\sigma} = 5.52 \quad (4.15)$$

Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μεταξύ 5-6 διπόλων τα οποία είναι ενεργά. Ακριβώς αυτό φαίνεται και στην εικόνα της προσομοίωσης των ρευμάτων αλλά πρέπει να υπολογίσουμε και ποιο δίπολο είναι αυτό που εκπέμπει για να είμαστε σίγουροι ότι λειτουργούν τα κατάλληλα δίπολα. Ο Carrel μας έδειξε ότι το κέντρο της ενεργής περιοχής ορίζεται με τον τύπο:

$$L_e = 0.5\lambda \quad (4.16)$$

Αλλά επειδή έχουμε τα δίπολα στα άκρα της κεραίας να εκπέμπουν και στις δύο περιπτώσεις, ισχύει ότι για τις χαμηλές συχνότητες εκπέμπουν τα μακρύτερα δίπολα αλλά για τις μεγαλύτερες εκπέμπουν τα μικρότερα. Επίσης, για τις LPDA που βρίσκονται σε σωστή λειτουργία πάντα το ρεύμα βρίσκεται σε ασυμμετρία με το δίπολο εκπομπής για αυτό βλέπουμε μεγαλύτερο ρεύμα στα δίπολα κοντά σε αυτά που εκπέμπουν.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου και προσομοίωσης (Κεραία LPDA)

	LPDA (680MHz)	LPDA(2.5GHz)	Θεωρία
$Z_{in}$	64.1 – 6.04j	57 – 0.36j	73 + 0j
$F_{συντ}$	680MHz	2.5GHz	680MHz/2.5GHz
$SWR$	1.2	1.31	1.03
$RL$	-20.93	-17.32	-37.38

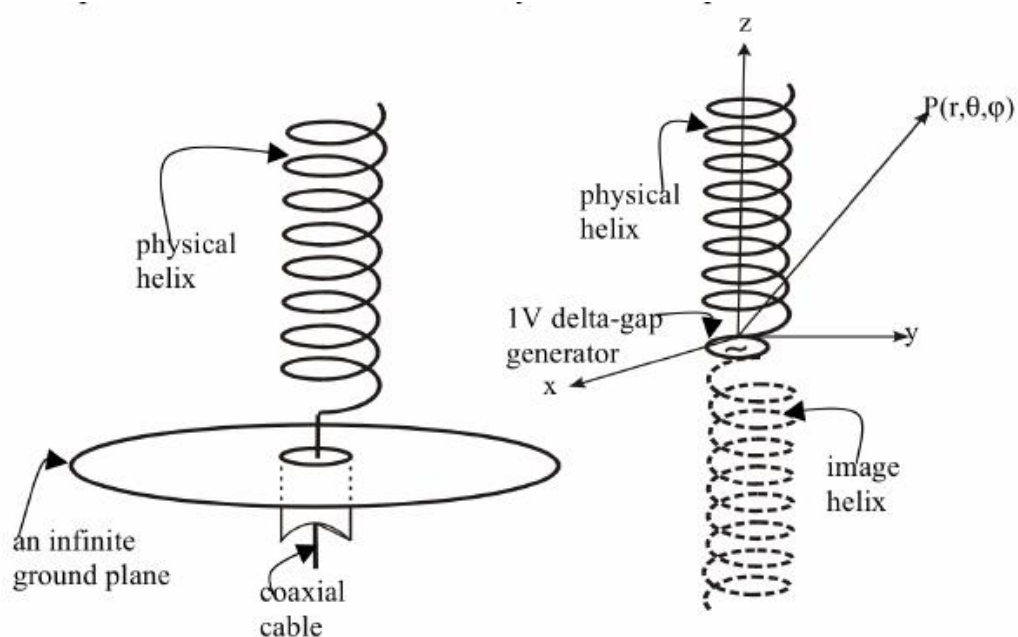
Κοιτώντας το εύρος ζώνης της κεραίας βλέπουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ότι η κεραία σε όλο το εύρος ζώνης έχει  $SWR < 1.5$  για 680MHz και τα 2.5GHz, αυτό είναι λόγω της ακριβής γεωμετρίας της κεραίας. Επίσης, βλέπουμε ότι το  $SWR$  και στις δυο περιπτώσεις δεν διαφοροποιείται πολύ μεταξύ των κεραίων, Μπορούμε να λάβουμε αυτά τα αποτελέσματα η ακόμα και πιο σύνθετα αναλόγως τις ανάγκες μας μέσω της εντολής TL για την κατάλληλη μεταφορά του ρεύματος στα δίπολα συντονισμού.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ελικοειδής κεραία σε Axial Mode

### 5.1. Περιγραφή ελικοειδούς κεραίας Axial Mode

Η ελικοειδής κεραία (Helical Antenna) σε λειτουργία Axial Mode αποτελεί μία κατευθυντική κεραία ευρείας ζώνης, η οποία χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε εφαρμογές όπου απαιτείται κυκλική πόλωση και υψηλή απολαβή. Η λειτουργία της σε Axial Mode επιτυγχάνεται όταν η περιφέρεια της έλικας είναι συγκρίσιμη με το μήκος κύματος της συχνότητας λειτουργίας, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να κατευθύνεται κατά μήκος του άξονα της κεραίας [33], [34].

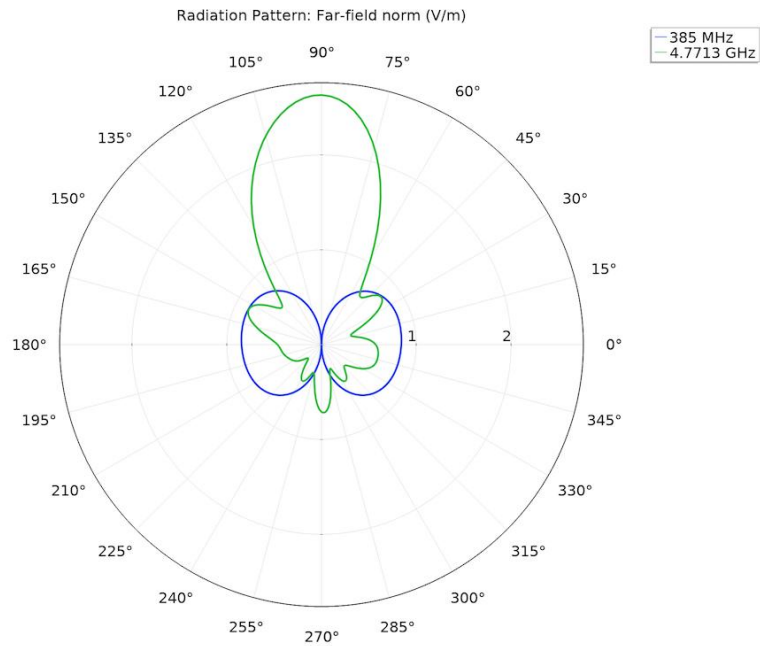
Η ανάπτυξη της ελικοειδούς κεραίας συνδέεται ιστορικά με τις εργασίες του J. D. Kraus στα μέσα του 20ού αιώνα, ο οποίος ανέδειξε τη δυνατότητα της να παρέχει σταθερή κυκλική πόλωση και ικανοποιητική απολαβή με σχετικά απλή γεωμετρική κατασκευή. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν την ελικοειδή κεραία ιδιαίτερα ελκυστική για δορυφορικές και διαστημικές εφαρμογές [33].



Σχήμα 5.1: Διάταξη ελικοειδών κεραίων Axial mode [34]

Η ελικοειδής κεραία αποτελείται από ένα αγωγίμο σύρμα τυλιγμένο σε μορφή έλικας γύρω από έναν φανταστικό κύλινδρο, τοποθετημένο πάνω από ένα επίπεδο γείωσης. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεραίας είναι η διάμετρος της έλικας, το βήμα (spacing) μεταξύ των σπειρών και ο συνολικός αριθμός σπειρών.

Στη λειτουργία Axial Mode, η ακτινοβολία προκύπτει από τη συνδυαστική συμβολή των ρευμάτων κατά μήκος της έλικας, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό κύριου λοβού κατά μήκος του άξονα της κεραίας. Η εκπεμπόμενη δέσμη παρουσιάζει κυκλική πόλωση (δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη, ανάλογα με τη φορά της έλικας), γεγονός που καθιστά την κεραία ανθεκτική σε απώλειες λόγω περιστροφής ή μεταβολής προσανατολισμού του δέκτη [34], [35].



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ακτινοβολίας ελικοειδών κεραιών Axial mode.

Οι ελικοειδείς κεραιές σε λειτουργία Axial Mode χρησιμοποιούνται κυρίως σε δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας, σε συστήματα πλοήγησης GPS, σε διαστημικές αποστολές, καθώς και σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα όπου πρέπει να υπάρχει αξιόπιστη κυκλική πόλωση και κατευθυντική εκπομπή. Επιπλέον, εφαρμόζονται σε ραδιοζεύξεις μεταξύ δορυφόρων και επίγειων σταθμών, καθώς και σε συστήματα τηλεμετρίας και ελέγχου διαστημικών οχημάτων [35], [36].



Σχήμα 5.3 Εφαρμογές ελικοειδούς κεραιάς Axial mode [37].

## 5.2. Μαθηματική ανάλυση ελικοειδούς κεραίας Axial Mode

Στο βιβλίο του Balanis [1] προτείνεται, για να είμαστε σίγουρα σε λειτουργία Axial mode η γωνία περιέλιξης  $\tan(\alpha)$  να είναι μεταξύ  $12 < \alpha < 14$  μοίρες για αυτή την κεραία επιλέγουμε την ενδιάμεση τιμή.

$$\tan(\alpha) = \frac{S}{C} = 13^\circ \quad (5.1)$$

Για να υπολογίσουμε τα μεγέθη της κεραίας αρχικά θα υπολογίσουμε το μήκος κύματος από τον τύπο  $2.1 \lambda = 0.125\text{m}$ . Για να έχω μια ελικοειδή κεραία σε Axial mode πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις, η τιμή που επιλέγεται για την περίμετρο περιέλιξης (C) ιδανικά είναι ίση με το μήκος κύματος και η απόσταση μεταξύ των σπειρών (S) είναι ίση με  $\lambda/4$ .

$$C \approx \lambda \text{ ή } C = 0.8\lambda \text{ έως } 1.33\lambda \quad (5.2)$$

$$S \approx \lambda/4 \text{ ή } S = C \cdot \tan(\alpha) = 0.0289\text{m} \quad (5.3)$$

Είναι σημαντικό να υπολογίσουμε το μέγεθος της κεραίας για να χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό στην συνέχεια στο πρόγραμμα 4nec2, αυτό μπορεί να γίνει πολλαπλασιάζοντας τις σπείρες με την απόσταση μεταξύ των σπειρών:

$$L = S \cdot N = 0.5202 \quad (5.4)$$

Ο αριθμός σπειρών (N) πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 3, για αυτή την κεραία ο αριθμός επιλέχθηκε να είναι 18 σπείρες. Ο αριθμός σπειρών επηρεάζει την μέγιστη κατευθυντικότητα, όσο περισσότερες σπείρες έχει η κεραία τόσο πιο στενός και κατευθυντικός είναι ο λοβός. Η διάμετρος (D) επηρεάζεται άμεσα από την περιέλιξη καθώς υπολογίζεται από αυτήν.

$$C = \pi D \rightarrow D = \frac{C}{\pi} = 39.7\text{mm} \quad (5.5)$$

Η αντίσταση εισόδου ( $Z_{in}$ ) βασίζεται στην επιλογή της περιέλιξης αλλά για την συγκεκριμένη κεραία επειδή το  $C = \lambda$  δεν αλλάζει η τιμή της.

$$Z_{in} = 140 \left( \frac{C}{\lambda} \right) = 140\Omega \quad (5.6)$$

Το κέρδος της κεραίας υπολογίζεται από δύο τύπους, αρχικά θα πάρουμε τον εμπειρικό τύπο από το βιβλίο του Balanis [1] για να υπολογίσουμε το  $D_0$  και στην συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε το αποτέλεσμα του για να υπολογίσουμε το κέρδος της κεραίας. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κέρδους είναι για ιδανικές συνθήκες, δηλαδή χωρίς απώλειες.

$$D_0 = 15N \left( \frac{C^2 S}{\lambda^3} \right) = 62.424 \quad (5.7)$$

$$G_{dBi} = 10 \log_{10} \left( \frac{NC^2 S}{\lambda^3} \right) = 17.95\text{dBi} \quad (5.8)$$

### 5.3. Προσομοίωση της κεραίας σε 4nec2 - Απεικονίσεις της προσομοίωσης.

Το 4nec2 επιτρέπει τον σχεδιασμό της ελικοειδούς κεραίας με δύο τρόπους, Ο ένας είναι με την εντολή **GH** (Geometry Helix) όπου ο χρήστης γράφει ο ίδιος της παραμέτρους της κεραίας και ο δεύτερος είναι ο αυτόματος σχεδιασμός της μέσα από το ίδιο το πρόγραμμα, πατώντας το Run στο κεντρικό παράθυρο και μετά επιλέγοντας το Geometry builder μας ανοίγει ένα νέο παράθυρο με διάφορες επιλογές για αυτόματους σχεδιασμούς μέσα στους οποίους υπάρχει η επιλογή Helix που είναι ο σχεδιασμός της ελικοειδούς κεραίας, εδώ όμως χρησιμοποιήθηκε η εντολή **GH** για τον σχεδιασμό της κεραίας. Η εντολή GH ορίζεται ως εξής:

GH INT NS S HL A1 B1 A2 B2 RAD

Όπου **INT** είναι ο αριθμός που δηλώνουμε στον έλικα, το **NS** είναι σε πόσα τμήματα είναι χωρισμένη κάθε στροφή, το **S** είναι η απόσταση μεταξύ των σπειρών σε μέτρα και το **HL** είναι το μήκος της κεραίας. Στην συνέχεια του κώδικα έχουμε τις μεταβλητές A1 B1 A2 B2, οι θέσεις αυτές ορίζουν την ακριβή απόσταση που έχουν οι στροφές από το κέντρο πάνω στους άξονες X,Y στην αρχή της κεραίας και στο τέλος της, με αυτό τον τρόπο κρατώντας την τιμή ίση στην αρχή και στο τέλος το 4nec2 σχεδιάζει την κεραία σε μορφή «ελατηρίου» είναι η ελικοειδής κεραία στην βάση και στο τέλος της. Στον κώδικα παρακάτω θέσαμε 0.0199 γιατί ουσιαστικά θέσαμε την ακτίνα από το κέντρο της κεραίας και τέλος το RAD είναι η διάμετρος του καλωδίου την οποία θέτουμε 0.001.

GH	1	120	0.0289	0.52	0.0199	0.0199	0.0199	0.0199	0.001
GM	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0
GW	150	1	0.0199	0	0	0.0199	0	0.004	0.00199
GE	1								
LD	5	0	0	0	58000000				
GN	1								
EK									
EX	0	150	1	0	1	0	0		
FR	0	0	0	0	2400	0			
EN									

Σχήμα 5.4 Κώδικας 4nec2 γεωμετρίας ελικοειδούς κεραίας

Τώρα που υπολογίσαμε ότι χρειαζόμασταν για να σχεδιάσουμε την κεραία προχωράμε στην προσομοίωση της. Για την καλύτερη εκπομπή της κεραίας σχεδιάστηκε ένας ανακλαστήρας, ο ανακλαστήρας τοποθετείται στην βάση της κεραίας για να στέλνει οποιοδήποτε σήμα εκπέμπεται αντίθετα από τον κεντρικό λοβό στην ίδια κατεύθυνση με αυτόν και ενισχύει το σήμα προς την ίδια κατεύθυνση. Δεν είναι τέλειος δίσκος αλλά θα προσφέρει στο κέρδος της κεραίας κατευθύνοντας κάποιο από το σήμα πίσω στον κεντρικό λοβό. Στο σχήμα 5.5 βλέπουμε ότι χρησιμοποιήθηκαν πολλές εντολές GW και σχεδιάστηκε ο ανακλαστήρας. Από την θεωρία σχεδιασμού ανακλαστήρων γνωρίζουμε ότι ένας ανακλαστήρας θα πρέπει να είναι από 0.25λ έως 0.5λ, η επιλογή αυτή γίνεται για πρακτικούς λόγους όπως το βάρος του δίσκου και επειδή η κεραία δεν βασίζεται αποκλειστικά στον ανακλαστήρα γιατί έχει φυσική κατευθυντικότητα. Ο Balanis [1] προτείνει από -0.7 έως 1λ επειδή προτείνει τέλειο έδαφος,

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό 4nec2 ο ανακλαστήρας λειτουργεί ως ηλεκτρομαγνητική γείωση όταν συνδέεται ηλεκτρικά με την κεραία. Αυτό δεν αντιστοιχεί σε λειτουργία γείωσης αλλά σαν «πυκνωτής» για τα ρεύματα που επιστρέφουν και σαν μονοπάτι για το ρεύμα. Είναι απαραίτητο να υπάρχει ο ανακλαστήρας για την εφαρμογή της Μεθόδου των Ροπών αλλιώς το 4nec2 δεν θα μπορέσει να κάνει την μετατροπή σε γραμμικές εξισώσεις και θα σταματήσει η λειτουργία του προγράμματος. Για τον σχεδιασμό αυτής της κεραίας επιλέχθηκε τιμή  $\lambda/3 = 38.75\text{mm}$  για να βρισκόμαστε μεταξύ 0.25λ και 0.5λ, για την προσομοίωση του ανακλαστήρα χρειάστηκε η τοποθέτηση 16 καλωδίων κυκλικά για συμμετρία, ο ανακλαστήρας με αριθμό 200 να έρχεται σε επαφή με την κεραία.

GW	200	5	0	0	0.0001	0.03875	0	0.0001	0.001
GW	201	5	0	0	0.0001	0.03554	0.01608	0.0001	0.001
GW	202	5	0	0	0.0001	0.02739	0.02739	0.0001	0.001
GW	203	5	0	0	0.0001	0.01608	0.03554	0.0001	0.001
GW	204	5	0	0	0.0001	0	0.03875	0.0001	0.001
GW	205	5	0	0	0.0001	-0.01608	0.03554	0.0001	0.001
GW	206	5	0	0	0.0001	-0.02739	0.02739	0.0001	0.001
GW	207	5	0	0	0.0001	-0.03554	0.01608	0.0001	0.001
GW	208	5	0	0	0.0001	-0.03875	0	0.0001	0.001
GW	209	5	0	0	0.0001	-0.03554	-0.01608	0.0001	0.001
GW	210	5	0	0	0.0001	-0.02739	-0.02739	0.0001	0.001
GW	211	5	0	0	0.0001	-0.01608	-0.03554	0.0001	0.001
GW	212	5	0	0	0.0001	0	-0.03875	0.0001	0.001
GW	213	5	0	0	0.0001	0.01608	-0.03554	0.0001	0.001
GW	214	5	0	0	0.0001	0.02739	-0.02739	0.0001	0.001
GW	215	5	0	0	0.0001	0.03554	-0.01608	0.0001	0.001

Σχήμα 5.5 Κώδικας 4nec2 ανακλαστήρα κεραίας

#### 5.4. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του κώδικα.

The screenshot shows the main window of the 4nec2 software. The title bar reads 'Main [V5.9.3] (F2)'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Settings', 'Calculate', 'Window', 'Show', 'Run', and 'Help'. The toolbar contains various icons for file operations and simulation settings. The main area displays the following parameters and results:

Filename	helical_antenna.o	Frequency	2400 Mhz
		Wavelength	0.125 mtr
Voltage	4.55 + j 0 V	Current	22 + j 10.8 mA
Impedance	167 - j 82	Series comp.	5.e-3 uH
Parallel form	207 // - j 422	Parallel comp.	0.028 uH
S.W.R.140	1.75	Input power	100 mW
Efficiency	70.75 %	Structure loss	29.25 mW
Radiat-eff.	%	Network loss	0 uW
RDF [dB]		Radiat-power	70.75 mW

Environment:  Loads  Polar

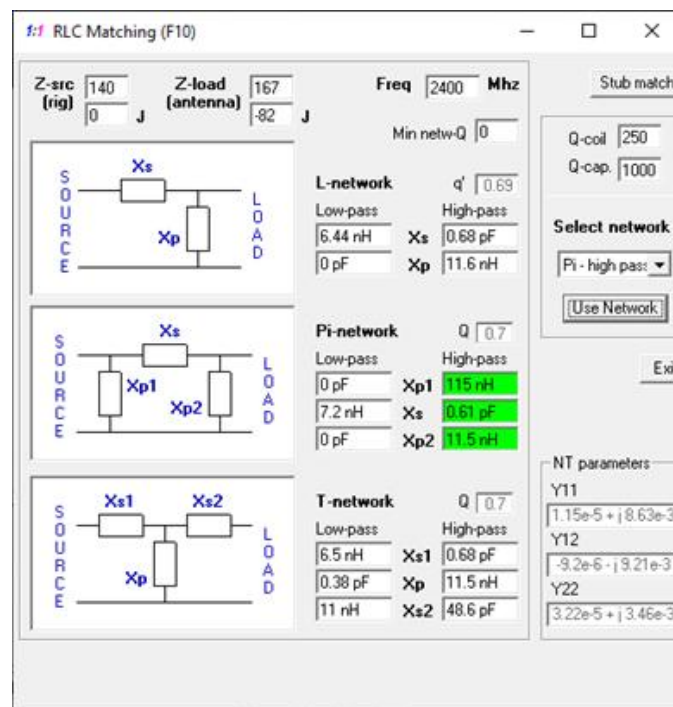
Environment: FREE SPACE

Comment: Helix with full disc reflector (radial wires) at 2.4 GHz

Seg's/patches	start	stop	count	step
201				
Pattern lines	24254	Theta -180 180	181	2
Freq/Eval steps	134	Phi 0 0	1	0

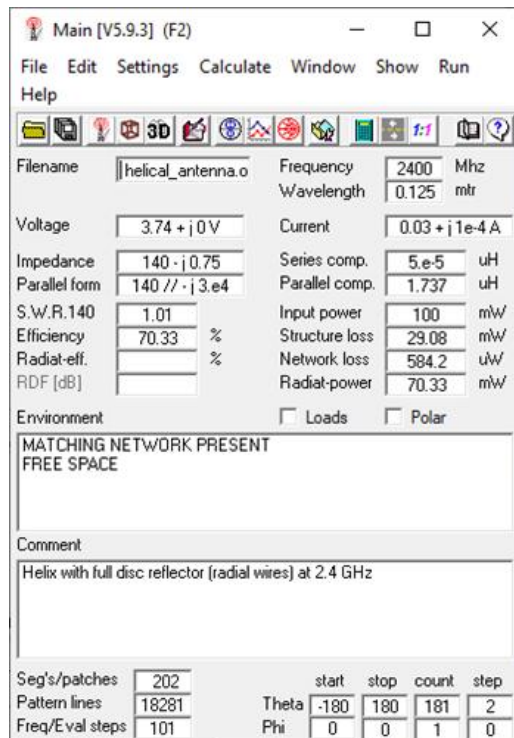
Σχήμα 5.6 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων

Αφού έτρεξε ο κώδικας είδαμε ότι η αντίσταση εισόδου της κεραίας δεν είναι καλά προσαρμοσμένη ακόμα και η τιμή της βρίσκεται στα 167-82j Ω, η τιμή του SWR είναι 1.75, δεν θεωρείται καθόλου καλή τιμή, η κεραία μπορεί να έχει πολύ καλύτερη προσαρμογή. Μπορούμε να διορθώσουμε αυτό το πρόβλημα υπολογίζοντας ένα κύκλωμα προσαρμογής στην είσοδο της κεραίας, αυτό θα φέρει την αντίσταση εισόδου στα 140 Ω και θα κάνει την προσαρμογή κατάλληλη για ομοαξονικό καλώδιο των 140 Ω, με αυτή την μέθοδο θα μπορούσαμε να φέρουμε σε κατάλληλη τιμή την αντίσταση εισόδου της κεραίας για οποιαδήποτε τιμή ομοαξονικού καλωδίου.

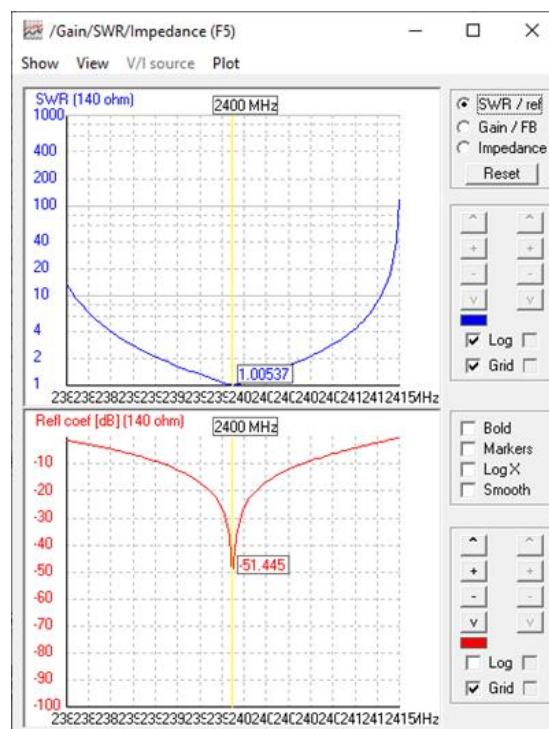


Σχήμα 5.7. Παράθυρο φίλτρων

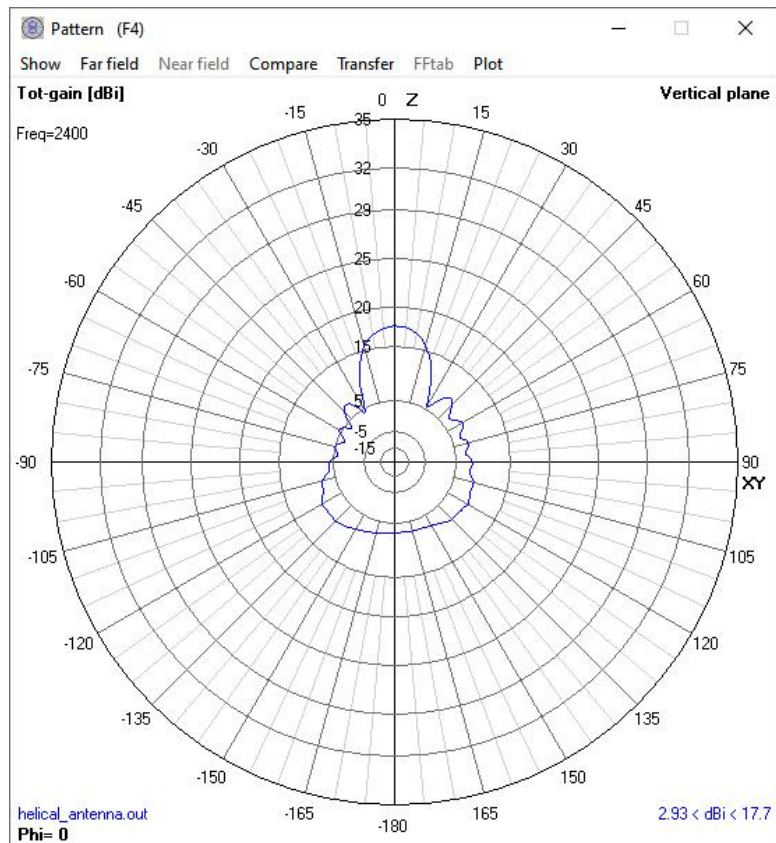
Πηγαίνοντας ξανά στο Calculate→L/Pi/T Matching ανοίγει ένα νέο παράθυρο από το οποίο μπορούμε να επιλέξουμε τον τύπο κυκλώματος προσαρμογής που θέλουμε για την κεραία, τα κυκλώματα που υποδεικνύονται μπορούν να σχεδιαστούν και να χρησιμοποιηθούν για μια πραγματική κεραία αλλά η τιμές θα μεταβληθούν επειδή δεν θα βρισκόμαστε σε ιδανικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε ένα Pi-network κύκλωμα. Το 4nec μας δίνει αυτόματα τις τιμές για την προσαρμογή κάνοντας μόνο του τους υπολογισμούς. Πάνω αριστερά ( $Z_{src}$ ) βλέπουμε την τιμή πραγματικής και φανταστικής τιμής της αντίστασης που θέλουμε να πλησιάσουμε και δεξιά ( $Z_{load}$ ) βλέπουμε την τιμή που έχουμε αυτή την στιγμή. Με βάση αυτά τα στοιχεία κάνει το 4nec2 τους υπολογισμούς. Στην συνέχεια άμα κοιτάζουμε πάνω από τις τιμές που επιλέξαμε μπορούμε να δούμε τον τύπο φίλτρου που επιλέγουμε να σχεδιαστεί, στα αριστερά έχουμε χαμηλοπερατό και στα δεξιά υψηπερατό. Η διαδικασία που χρησιμοποιεί το 4nec2 είναι αρχικά να βλέπει την σύνθετη αντίσταση εισόδου που έχουμε και δηλώνουμε τον στόχο 140 Ω, στην συνέχεια να επιλέγει το συντελεστή ποιότητας (Q), που εδώ η τιμή του είναι 0.7. Σκοπός είναι να γίνει και εκμηδενισμός του -82j Ω στο δίκτυο Pi, Τέλος, γίνεται αυτόματα ο υπολογισμός του δικτύου Pi και βλέπουμε τις τιμές  $X_{p1} = X_{p2} = 115\text{nH}$  για δύο πηνία και ο πυκνωτής έχει τιμή  $X_s = 0.61\text{pF}$ .



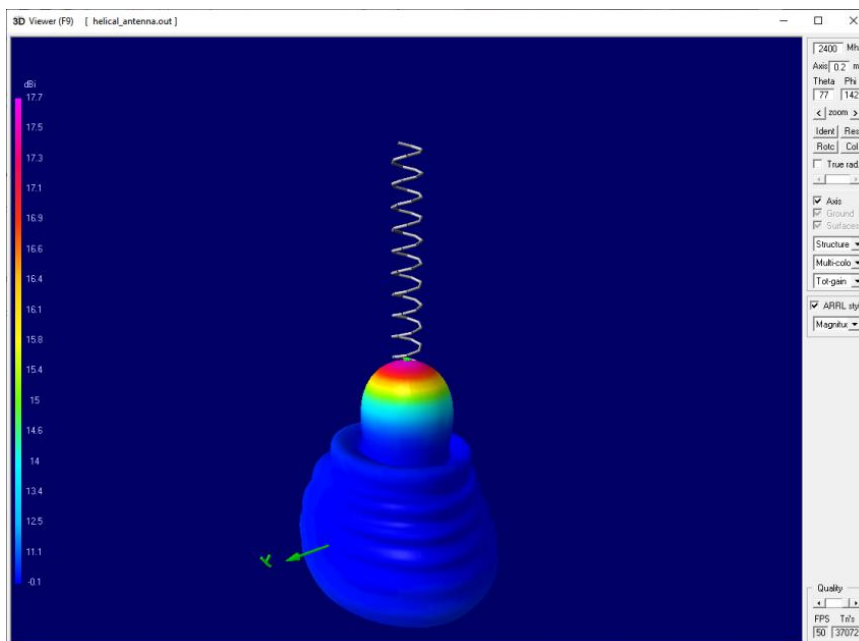
Σχήμα 5.8 Κύριο παράθυρο αποτελεσμάτων στα 2.4 GHz



Σχήμα 5.9 Διακύμανση του SWR και του Συντελεστή Ανάκλασης στα 2.4 GHz στον συντονισμό.



Σχήμα 5.10 Κέρδος ελικοειδούς κεραίας Axial Mode στην συχνότητα συντονισμού στα 2.4 GHz.



Σχήμα 5.11 Τρισδιάστατη μορφή ελικοειδούς κεραίας Axial Mode

Πίνακας 5.1 Μαθηματικό Μοντέλο και προσομοίωσης (Ελικοειδής κεραία σε Axial Mode)

	Pre optimized	Optimized	Θεωρία
$Z_{in}$	167 – 82j	140 + 0.75j	140 + 0j
$F_{συντ}$	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
$SWR$	1.75	1.01	1
$RL$	-11.59	-51.445	$-\infty$

Μετά την χρήση του φίλτρου βλέπουμε ότι πλέον η κεραία έχει έρθει σε συντονισμό και η τιμή SWR πλέον είναι 1.01 που την καθιστά ιδανική και με σύνθετη αντίσταση εισόδου 140-0.05j που επίσης είναι σχεδόν ιδανική. Το κέρδος της επίσης υπολογίστηκε στα 17.95dBi και η κεραία στον ελεύθερο χώρο έχει κέρδος 17.7dBi που ουσιαστικά είναι όμοιες. Ένα πράγμα που παρατηρήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο είναι ότι το 4nec2 επιτρέπει ανακλαστήρες χωρίς την χρήση κάποιας τροφοδοσίας για την προσαύξηση του σήματος στο κεντρικό σήμα. Ο ανακλαστήρας χρησιμοποιήθηκε επίσης σαν «γειώση» γιατί σε κεραίες όπως η ελικοειδής χρειάζεται κάπου να πηγαίνει το αρνητικό ρεύμα της πηγής γιατί όπως βλέπουμε στις προσομοιώσεις η πηγή συνδέεται σε δύο σημεία αλλά στην περίπτωση της ελικοειδής κεραίας μόνο το ένα άκρο έρχεται σε επαφή με την κεραία, οπότε όπως και στην πραγματικότητα η κεραία συνδέεται σε έναν ανακλαστήρα για να γειώνεται έτσι και στο 4nec2 κάνουμε το ίδιο.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και προτάσεις

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε στόχο την ανάλυση και τη σχεδίαση γραμμικών κεραιών, καθώς και τη μελέτη της συμπεριφοράς τους μέσω θεωρητικών υπολογισμών και προσομοιώσεων με το λογισμικό 4nec2, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο NEC. Οι κεραιές που προσομοιώθηκαν μας επέτρεψαν να εξακριβώσουμε επίσης την αξιοπιστία του λογισμικού 4nec2,

Αρχικά, σχεδιάστηκε η κεραία μισού μήκους κύματος, η οποία έγινε σημείο αναφοράς για τη σύγκριση των υπόλοιπων διατάξεων. Τα αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών και προσομοιώσεων έδειξαν πολύ καλή συμφωνία, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του μοντέλου και της διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Η βελτιστοποίηση μέσω του εργαλείου Optimizer του 4nec2 ανέδειξε τη σημασία του συντονισμού για τη βελτίωση της προσαρμογής και τη μείωση των απωλειών.

Στη συνέχεια, έγινε η ανάλυση για τις στοιχειοκεραίες Broadside και End-fire, όπου έγινε ξεκάθαρος ο ρόλος της γεωμετρικής διάταξης και της φασικής τροφοδοσίας στο σχήμα εκπομπής του διαγράμματος ακτινοβολίας. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Broadside μας έδειξε ακτινοβολία κάθετη στον άξονα της κεραίας, ενώ η End-fire εκπέμπει τη δέσμη κατά μήκος του άξονα. Και στις δύο περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ήρθαν πολύ κοντά στους θεωρητικούς υπολογισμούς ως προς το κέρδος, την κατευθυντικότητα και την αντίσταση εισόδου. Επίσης οι δύο Phased Array όπου μέσω της διαφοράς των φάσεων τροφοδοσίας μας επιτρέπει τον έλεγχο της δέσμης εκπομπής χωρίς φυσική μετακίνηση της κεραίας, η μια στις 30 μοίρες και η δεύτερη στις 72 μοίρες με ελάχιστες διαφορές κέρδους και απωλειών. Το 4nec2 έδειξε ότι με σωστό υπολογισμό για την γωνία φάσης των πηγών και με κατάλληλη προσαρμογή θα μπορούμε πάντα να εκπέμπουμε προς την κατεύθυνση για οποιαδήποτε γεωμετρία διπόλων τύπου Phased array.

Για τον σχεδιασμό της κεραίας LPDA, ο ακριβής υπολογισμός και τοποθέτηση των δίπολων βασίστηκε στην κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων  $\sigma$  και  $\tau$  και έπαιξε τον σημαντικότερο ρόλο, Για την κατάλληλη προσαρμογή μεταξύ των διπόλων καθώς πάντα έχουν αντίσταση 73  $\Omega$ , προσημειώθηκαν γραμμές μεταφοράς για την μεταφορά του ρεύματος στα δίπολα, επίσης είδαμε ότι πέρα από τα τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας μπορούμε επίσης να δούμε σε ποια δίπολα διοχετεύεται το ρεύμα αναλόγως την συχνότητα λειτουργίας της κεραίας σε τρισδιάστατη μορφή. Τέλος παρατηρήσαμε ότι λόγω καλού σχεδιασμού η κεραία διατηρεί σχεδόν σταθερά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων

Τέλος, η προσομοίωση της ελικοειδούς κεραίας σε λειτουργία Axial Mode μας έδειξε ότι μέσω κατάλληλου σχεδιασμού και μέσω της προσομοίωσης ότι μπορεί να επιτευχθεί υψηλή κατευθυντικότητα, επειδή επιλέχθηκε  $\alpha = 13^\circ$ , που είναι η ιδανική γωνία για τον σχεδιασμό μιας ελικοειδής κεραίας σε λειτουργία Axial mode με σωστή κυκλική πόλωση, θέτοντας την κατάλληλη για δορυφορικές και διαστημικές εφαρμογές, επίσης ήταν πού σημαντική η κατασκευή του ανακλαστήρα και η συμπεριφορά του ως «γείωση» για την σωστή λειτουργία της κεραίας στο κενό. Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι το λογισμικό 4nec2 είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο για τη προσομοίωση κεραιών, με αποτέλεσμα την κατανόηση της συμπεριφοράς των κεραιών.

Για μελλοντική επέκταση της εργασίας, θα μπορούσε να γίνει πειραματική εξακρίβωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, με την κατασκευή και μέτρηση των κεραιών σε πραγματικές συνθήκες. Στην συνέχεια θα μπορούσε να γίνει μελέτη πάνω στη λειτουργία κεραιών σε υψηλότερες συχνότητες, όπως στις ζώνες μικροκυμάτων, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε σύγχρονες ασύρματες εφαρμογές και δίκτυα 5G. Θα μπορούσε επίσης να γίνει μελέτη πάνω στην επίδραση του περιβάλλοντος, όπως π.χ. το έδαφος στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραιών. Τέλος, η σύγκριση του 4πec2 με άλλα πιο σύγχρονα λογισμικά προσομοίωσης θα μπορούσε να προσφέρει μια καλύτερη εικόνα για τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- [2] J. D. Kraus and R. J. Marhefka, *Antennas for All Applications*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [3] R. C. Johnson and H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1984.
- [4] R. L. Carrel, “The design of log-periodic dipole antennas,” *IRE National Convention Record*, pt. 1, pp. 61–75, 1961.
- [5] G. J. Burke and A. J. Poggio, “Numerical Electromagnetics Code (NEC) – Method of Moments,” Lawrence Livermore National Laboratory, Rep. UCID-18834, 1981.
- [6] A. Voors, *4NEC2 user manual*, PDF help file, 2017.
- [7] Highleap Electronic, “Κεραίες RF: Αρχές, τύποι και εφαρμογές,” 2025. [Online]. Διαθέσιμο: <https://hilelectronic.com/el/rf-antennas/>
- [8] Α. Ζαχαράκη, “Θεωρητική και πειραματική μελέτη των φυσικών διαδικασιών απωλειών σε ασύρματη ζεύξη”, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Αντίρριο, 2016.
- [9] Δ. Μπλάτζιος, “Σχεδίαση ευρυζωνικής κεραίας τυπωμένου διπόλου με χρήση μικροταινίας,” Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2016.
- [10] Α. Κανάτας και Γ. Πάντος, “Ασύρματες Επικοινωνίες”, 3η έκδοση, Αθήνα, Ελλάδα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2022.
- [11] Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης, “Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα – Κεραίες,” PH102: Φυσική ΙΙ, διαφάνειες μαθήματος, Ηράκλειο, Ελλάδα. [Online]. Διαθέσιμο: <https://ph102.edu.physics.uoc.gr/presentations/presentation12.pdf>
- [12] TutorialsPoint, “What is a half-wave dipole antenna?,” [Online]. Available: <https://www.tutorialspoint.com/cach3.com/what-is-a-half-wave-dipole-antenna.html>
- [13] G. Kraus, “Simulation of Wire Antennas using 4NEC2,” tutorial PDF, QSL.net, 2009. [Online]. Available: [https://www.qsl.net/4nec2/Tutorial\\_4NEC2\\_english.pdf](https://www.qsl.net/4nec2/Tutorial_4NEC2_english.pdf)
- [14] R.C. Johnson, *Antenna Engineering Handbook*, 4th Edition, McGraw-Hill, 2005.
- [15] TutorialsPoint, “Antenna Theory – Broad-side Array,” [Online]. Available: [https://www.tutorialspoint.com/antenna\\_theory/antenna\\_theory\\_broad\\_side\\_array.htm](https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_broad_side_array.htm)
- [16] D. González-Ovejero, N. Chahat, R. Sauleau, G. Chattopadhyay, S. Maci, and M. Ettore, “Additive Manufactured Metal-Only Modulated Metasurface Antennas,” “IEEE Trans. Antennas Propag.,” vol. 66, no. 11, pp. 6106–6114, Nov. 2018.

- [17] R. J. Mailloux, *\*Phased Array Antenna Handbook\**, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005.
- [18] Tutorialspoint, “Antenna Theory – End-Fire Array,” [Online]. Available: [https://www.tutorialspoint.com/antenna\\_theory/antenna\\_theory\\_end\\_fire\\_array.htm](https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_end_fire_array.htm)
- [19] Watts Antenna Company, “Operational Benefits and Applications of End-Fire Glide Slope (EFGS) Antenna Systems,” 2019. [Online]. Available: <https://wattsantenna.com/wp-content/uploads/2019/07/Operational-Benefits-and-Applications-of-End-Fire-Glide-Slope-EFGS-Antenna-Systems-2.pdf>
- [20] L. Pratt, U.S. Air Force, “MQ-1 Predator drone,” photo, 16 Jan. 2010. Public domain, Wikimedia Commons.
- [21] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [22] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005.
- [23] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [24] E. Brookner, *Radar Technology*. Norwood, MA, USA: Artech House, 1996.
- [25] J. D. Kraus and R. J. Marhefka, *Antennas for All Applications*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [26] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016, ch. 11.
- [27] J. D. Kraus and R. J. Marhefka, *Antennas for All Applications*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [28] R. C. Johnson and H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1993.
- [29] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [30] K. K. Mistry et al., “Design and Optimization of Compact Printed Log-Periodic Dipole Array Antennas with Extended Low-Frequency Response,” *Electronics*, 2021.
- [31] IEEE Std 145-2013, *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*, IEEE, 2014.
- [32] K. Mistry, Z. Zaharis, E. Tziris, P. Lazaridis, T. Xenos, and I. Glover, “An optimal design of printed log-periodic antenna for L-band EMC applications,” in *Proc. Int. Symp. Electromagnetic Compatibility (ISEMC)*, Amsterdam, Netherlands, 2018, pp. 1–4.
- [33] J. D. Kraus, “Helical Antennas,” *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 3, pp. 263–272, Mar. 1949.
- [34] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016, ch. 10.

[35] R. C. Johnson and H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1993.

[36] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.

[37] Kingbastard, "Traqueur acquisition.JPG (Helical satellite tracking antenna, Pleumeur-Bodou, France)," Wikimedia Commons, Apr. 16, 2008. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Traqueur\\_acquisition.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Traqueur_acquisition.JPG). [Accessed: 18-Jan-2026].