



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη και προσομοίωση παράγοντα διάταξης και  
διαγράμματος ακτινοβολίας επίπεδων στοιχειοκεραιών  
ανεστραμμένου F (RIFA)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμά Θ. Γιώργος  
Σαζός Κ. Μάριος

**Επιβλέπων :** Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2012





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη και προσομοίωση παράγοντα διάταξης και  
διαγράμματος ακτινοβολίας επίπεδων στοιχειοκεραιών  
ανεστραμμένου F (RIFA)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Θωμά Θ. Γιώργος  
Σαζός Κ. Μάριος

**Επιβλέπων :** Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26<sup>η</sup> Ιουνίου 2012.

.....  
Χ. Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Π. Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γ. Φικίωρης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2012

.....

Θωμά Θ. Γιώργος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

.....

Σαζός Κ. Μάριος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Θωμά Θ. Γιώργος

Copyright © Σαζός Κ. Μάριος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου  
και στην μνήμη του αδελφού μου Τάσου  
που, αν και δεν ήξερε τίποτα από κεραίες ΡΙΦΑ,  
είχε όμως πολλά να πει για την ζωή. . .  
Μάριος Σαζός

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου  
που ήταν πάντα δίπλα μου  
και με στήριζε σε κάθε μου βήμα. . .  
Γιώργος Θωμά



# Περίληψη

Έχοντας ως γνώμονα τις ραγδαίες εξελίξεις που σημειώνονται σήμερα στα συστήματα των κινητών επικοινωνιών, την μεγάλη ανάγκη για καλή ποιότητα υπηρεσίας και την εξέλιξη των κινητών τερματικών, είναι αρκετά τα αντικείμενα έρευνας σε όλους τους τομείς. Ένα από αυτά τα αντικείμενα είναι και η σχεδίαση κεραιών για κινητές επικοινωνίες οι οποίες πρέπει να παρουσιάζουν ένα ικανοποιητικό κέρδος, να είναι ομοιοκατευθυντικές, να έχουν μικρές διαστάσεις, και να προσαρμόζονται εύκολα σε όλα τα κινητά τερματικά.

Μια ιδανική κεραία η οποία παρουσιάζει τα πιο πάνω χαρακτηριστικά και έχει ευρεία χρήση στα συστήματα κινητών επικοινωνιών και ειδικά στην κινητή τηλεφωνία είναι η επίπεδη κεραία ανεστραμμένου F, PIFA.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται περαιτέρω βελτίωση της κεραίας PIFA δημιουργώντας μια στοιχειοκεραία PIFA.

Αρχικά με την βοήθεια του λογισμικού Super nec παίρνουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας PIFA, και εφαρμόζοντας την θεωρία των στοιχειοκεραιών καταλήγουμε στο διάγραμμα ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων. Στην συνέχεια παίρνουμε ξανά το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων, αλλά αυτή τη φορά μετά από προσομοιώσεις στο πρόγραμμα Super nec, για ίδια τιμή της συχνότητας και για διάφορες τιμές της απόστασης των στοιχείων της. Με αυτό τον τρόπο διαπιστώνουμε ότι η θεωρία των στοιχειοκεραιών επαληθεύεται και για κεραίες PIFA 2 στοιχείων.

Ένα άλλο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι και η μελέτη της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ των στοιχείων μιας στοιχειοκεραίας PIFA M – στοιχείων και το πως αυτή επηρεάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας και την αντίσταση εισόδου της στοιχειοκεραίας. Για να γίνει ο υπολογισμός της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ 2 στοιχείων της στοιχειοκεραίας, παίρνουμε την αντίσταση εισόδου του ενός εκ των δύο στοιχείων μέσω προσομοίωσης, για διάφορες τιμές της μεταξύ τους απόστασης, και μέσω της αντίστασης εισόδου του στοιχείου αυτού καταλήγουμε σε τιμές της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ 2 οποιονδήποτε στοιχείων της στοιχειοκεραίας PIFA που μελετάμε ανάλογα με τις αποστάσεις που αυτά είναι τοποθετημένα.

Μέσω της πιο πάνω διαδικασίας, εφόσον καταλήξουμε στην αμοιβαία αντίσταση μεταξύ ενός οποιουδήποτε ζεύγους στοιχείων της στοιχειοκεραίας, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε μέσω της επίλυσης ενός συστήματος εξισώσεων MxM όπου M τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας όλους τους ρευματικούς συντελεστές των ρευμάτων που επάγονται στα στοιχεία της. Οπότεν έτσι είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας PIFA που μελετάμε, και αντίστοιχα το διάγραμμα ακτινοβολίας της. Ακόμη με μεταβολή των αποστάσεων μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, είναι δυνατόν να δημιουργήσουμε οποιοδήποτε διάγραμμα ακτινοβολίας εμείς επιθυμούμε και το οποίο θα είναι σαφώς βελτιωμένο σε σύγκριση με αυτό της απλής κεραίας PIFA.

## Λέξεις Κλειδιά:

Επίπεδη κεραία ανεστραμμένου F (PIFA), Super Numerical Electromagnetics Code (Super nec), διάγραμμα ακτινοβολίας, παράγοντας διάταξης, αμοιβαία αντίσταση, αποτελέσματα προσομοίωσης, Microsoft Excel





# Abstract

The rapid development of the wireless communication technology, the big need for a good quality of service and the big development of mobile communications provide multiple research subjects in a large variety of fields. These subjects include antenna designing for wireless communications. A satisfying gain, isotropic characteristics, limited dimensions and easy adjustment to all mobile devices are necessary features for these kinds of antennas.

An ideal antenna which is consistent with all the above features and has also a wide use on wireless communication technology and especially on mobile phones is the planar inverted F antenna, PIFA.

The objective of this diploma thesis is the further optimization of PIFA in order to design a multiple element PIFA.

At the beginning, we extract the radiation pattern of the PIFA antenna, using the Super nec software. By applying the multiple element antenna theory, we extrapolate the radiation pattern of a 2 element PIFA. Afterwards we extract again the radiation pattern of the 2 element PIFA, but this time using simulations with the Super nec software, with the same frequency and for different distances of the PIFA elements. This enables us to compare the radiation pattern we extracted from the theory, and the radiation pattern we extracted from the simulations, and conclude that the multiple element antenna theory stands for two element PIFAs.

Another objective of this diploma thesis is the study of the mutual impedance of the elements of a M-element PIFA, and how this mutual impedance affects the radiation pattern and the input impedance of the antenna. In order to calculate the mutual impedance of 2 elements of the antenna, we extract from the simulations the input impedance of the first of the 2 elements for various distances between the 2 elements, and as a result, we are able to calculate the mutual impedance of any 2 elements, depending on the distance between them.

By knowing the mutual impedance of any 2 elements of the antenna, if we solve a  $M \times M$  equations system ( $M$  is the number of the antenna elements), we can calculate all the rheumatic coefficients of the currents which induce on the antenna elements. So, we are able to calculate the antenna factor and the radiation pattern of the M-element PIFA we study. Also, we are able to create a radiation pattern of our choice by changing the distances between the PIFA elements. This radiation pattern will be substantially better than the one of the single PIFA.

## Key words:

Planar inverted F antenna (PIFA), Super Numerical Electromagnetics Code (Super nec), radiation pattern, antenna factor, mutual resistant, simulation results, Microsoft Excel.



## Ευχαριστίες

Στα πλαίσια της διπλωματικής μας εργασίας θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς μας ευχαριστίες σε όλους όσους βοήθησαν στην περάτωση της.

Αρχικά ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Καψάλη που μας εμπιστεύτηκε την ανάθεση αυτής της εργασίας και μας παρείχε τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ειλικρινείς ευχαριστίες απευθύνουμε και στον κύριο Χρήστο Νικολόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις του, τη μεγάλη βοήθεια καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές του στο επίπεδο, που αφορά απαραίτητες γνώσεις, για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Ένα ευχαριστώ οφείλουμε σε όλους τους καθηγητές μας κατά τη διάρκεια των σπουδών μας για τις αστείρευτες γνώσεις που μας μετάδωσαν όλα αυτά τα χρόνια, το καλύτερο εφόδιο στις δύσκολες εποχές που ζούμε.

Επιπλέον θέλουμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας προς τους γονείς μας για την διαρκή τους υποστήριξη, τόσο ηθική όσο και οικονομική, που μας επέτρεψαν να διεκπεραιώσουμε τις σπουδές μας σε ένα άνετο περιβάλλον.

Τέλος ευχαριστούμε τους φίλους μας για τη συμπαράσταση τους στις δύσκολες στιγμές και τη βοήθεια τους.



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	7
Abstract.....	9
Ευχαριστίες .....	11
Περιεχόμενα .....	13
Ευρετήριο Πινάκων .....	15
Ευρετήριο Σχημάτων .....	16
<b>Κεφάλαιο 1: Στοιχειοκεραίες .....</b>	<b>19</b>
1.1 Εισαγωγή .....	19
1.2 Στοιχειοκεραίες πολλών στοιχείων .....	20
1.3 Τα διάφορα είδη των Στοιχειοκεραίων .....	23
1.3.1 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες .....	24
1.3.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με ομοιόμορφη διέγερση .....	26
1.3.3 Σύνθετες στοιχειοκεραίες .....	29
1.3.4 Επίπεδες Στοιχειοκεραίες .....	29
<b>Κεφάλαιο 2: Κεραίες PIFA (Planar Inverted F Antennas) .....</b>	<b>33</b>
2.1 Εισαγωγή .....	33
2.2 Ιστορική αναδρομή.....	34
2.3 Ανάλυση κεραίας PIFA.....	35
2.3.1 Γενικά.....	35
2.3.2 Τεχνικές για την αύξηση του εύρους ζώνης κεραίας PIFA .....	38
2.3.3 Τεχνικές για μείωση των διαστάσεων κεραίας PIFA .....	40
2.3.4 Συχνότητα Συντονισμού .....	40
2.3.5 Προσαρμογή κεραίας PIFA.....	41
2.3.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας .....	41
2.3.7 Αποδοτικότητα .....	42
2.4 Εφαρμογές κεραίας PIFA.....	42
2.4.1 Οι κεραίες PIFA για εφαρμογές WiMAX.....	42
2.4.2 Απλά τροφοδοτούμενη PIFA τετραπλής ζώνης για εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών .....	45
2.4.3 Κεραίες PIFA τύπου μαιάνδρου ενός στοιχείου και δύο στοιχείων τοποθετημένων παράλληλα .....	51

2.4.4	Μικρού μεγέθους και χαμηλού κόστους SPA-PIFA για κινητές 2.4 GHz ISM εφαρμογές.....	53
2.4.5	Μια συμπαγής ενιαία τροφοδοτούμενη, χαμηλού κόστους ευρυζωνική κεραία μεταγωγής δέσμης για κινητές WiMAX εφαρμογές.....	56
<b>Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση στοιχειοκεραίας PIFA με την βοήθεια του προγράμματος SuperNec.....</b>		<b>59</b>
3.1	Εισαγωγή .....	59
3.2	Βελτιστοποίηση μιας Επίπεδης Κεραίας ανεστραμμένου F (Planar Inverted F Antenna, PIFA).....	62
3.2.1	Γενετικοί αλγόριθμοι.....	62
3.2.2	Βελτιστοποίηση κεραίας PIFA στο πρόγραμμα Supernec με την χρήση γενετικών αλγορίθμων.....	64
<b>Κεφάλαιο 4: Μελέτη παράγοντα διάταξης και διαγράμματος ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας PIFA 2 -στοιχείων .....</b>		<b>72</b>
4.1	Εισαγωγή .....	72
4.2	Ανάλυση των αποτελεσμάτων με την βοήθεια του μαθηματικού πακέτου Microsoft Excel .....	77
4.3	Αποτελέσματα από προσομοίωση της στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων στο Supernec και σύγκριση με τα αποτελέσματα από την θεωρία των στοιχειοκεραίων:....	94
<b>Κεφάλαιο 5: Μελέτη παράγοντα διάταξης και Διαγράμματος ακτινοβολίας Στοιχειοκεραίας PIFA M - Στοιχείων μέσω της αμοιβαίας αντίστασης .....</b>		<b>104</b>
5.1	Εισαγωγή .....	104
5.2	Υπολογισμός της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ 2 στοιχείων μιας στοιχειοκεραίας PIFA.....	106
<b>Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις .....</b>		<b>109</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>111</b>

## Ευρετήριο Πινάκων

2.1	Διαστάσεις κεραίας PIFA με τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές.....	43
2.2	Η επίδραση της κάθε σχισμής στην PIFA με τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές.....	44
2.3	Επίδραση του χωρητικού φορτίου στην μείωση του μεγέθους της κεραίας και στην μείωση του εύρους ζώνης για την κεραία PIFA τετραπλής ζώνης.....	49
2.4	Παράμετροι και αποτελέσματα κατά τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση της SPA-PIFA. ( Το μήκος κύματος είναι ίσο με $\lambda_0 = 12,5$ cm, το οποίο αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας 2.4 GHz ).....	54
2.5	Παράμετροι και αποτελέσματα κατά τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση της cross-PIFA. ( Το μήκος κύματος είναι ίσο με $\lambda_0 = 0.0857$ m, το οποίο αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας 3.5 GHz ).....	57
3.1	Παράμετροι και αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για την PIFA.....	66
3.2	Κέρδη σε κάθε συχνότητα υπό εξέταση στο λειτουργικό εύρος ζώνης της απλής PIFA.....	69
3.3	Παράμετροι για την απλή PIFA.....	70
4.1	Αποτελέσματα των εξισώσεων της παραγράφου 4.1 από μετρήσεις στο πρόγραμμα Super nec και με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	77
5.1	Υπολογισμός αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ 2 στοιχείων στοιχειοκεραίας PIFA με δεδομένο το $Z_{in}$ από το Super nec για διάφορες τιμές του $d$ και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	107

# Ευρετήριο Σχημάτων

1.1	Γεωμετρία στοιχειοκεραίας.....	21
1.2	Γεωμετρία χωρικά ομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας.....	24
1.3	Διάγραμμα ακτινοβολίας γραμμικής ομοιόμορφης στοιχειοκεραίας για $M=10$ στοιχεία.....	27
1.4	Διάγραμμα ακτινοβολίας γραμμικής ομοιόμορφης στοιχειοκεραίας για $M=20$ στοιχεία.....	27
1.5	Επίπεδη στοιχειοκεραία.....	30
2.1	Η πρώτη διπλής ζώνης εσωτερική κεραία, η δίδυμη σπειροειδή κεραία (patent US 6166694), όπως την κατασκεύασε ο Z. Ying από την Ericsson το 1998.....	34
2.2	PIFA διπλής ζώνης με διακλαδώσεις για κινητή τηλεφωνία (patent: US 6343208B1), όπως την κατασκεύασε ο Z. Ying από την Ericsson το 1998.....	35
2.3	Κεραία IFA τοποθετημένη πάνω σε ένα επίπεδο γείωσης σχηματίζοντας μια κεραία PIFA.....	36
2.4	Κεραία PIFA.....	36
2.5	Χαρακτηριστικά κεραίας PIFA με χωρητικό φορτίο.....	39
2.6	Κεραία PIFA με τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές.....	43
2.7	Πρωτότυπο κεραίας PIFA με τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές.....	43
2.8	Η επίδραση της κάθε σχισμής στην PIFA με τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές.....	44
2.9	Η δομή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεραίας PIFA τετραπλής ζώνης με 3 σχισμές σχήματος U και χωρητικό φορτίο.....	45
2.10	Φωτογραφία των PIFA διπλής, τριπλής και τετραπλής ζώνης με σχισμές σχήματος U.....	46
2.11	Διάγραμμα συμβατικής PIFA μονής ζώνης και κεντρική συχνότητα $f_1 = 1$ GHz.....	47
2.12	Διάγραμμα PIFA διπλής ζώνης με μια σχισμή σχήματος U και κεντρικές συχνότητες $f_1 = 0.95$ GHz και $f_2 = 2$ GHz.....	47
2.13	Διάγραμμα PIFA τριπλής ζώνης με δύο σχισμές σχήματος U και κεντρικές συχνότητες $f_1 = 0.95$ GHz, $f_2 = 1.8$ GHz και $f_3 = 2.45$ GHz.....	48
2.14	Διάγραμμα PIFA τετραπλής ζώνης με τρεις σχισμές σχήματος U και κεντρικές συχνότητες $f_1 = 0.95$ GHz, $f_2 = 1.8$ GHz, $f_3 = 2.45$ GHz και $f_4 = 2.45$ GHz.....	48
2.15	Η σχέση ανάμεσα στη μείωση του μεγέθους της κεραίας PIFA τετραπλής ζώνης με 3 σχισμές σχήματος U, και την τιμή του χωρητικού φορτίου της.....	50



2.16 Σύγκριση ανάμεσα σε πειραματικές μετρήσεις και σε μετρήσεις από προσομοιώσεις για δύο διαφορετικές τιμές του χωρητικού φορτίου, $C1 = 1.5 \text{ Pf}$ και $C2 = 0.8 \text{ pF}$ , της κεραίας PIFA τετραπλής ζώνης με 3 σχισμές σχήματος U και χωρητικό φορτίο.....	50
2.17 Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου.....	52
2.18 α) Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου ενός στοιχείου. β) Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου δύο στοιχείων τοποθετημένων παράλληλα.....	52
2.19 Γραφικές παραστάσεις απωλειών των πειραματικών μετρήσεων και των προσομοιώσεων για α) Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου ενός στοιχείου, β) Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου δύο στοιχείων τοποθετημένων παράλληλα.....	52
2.20 Αρχιτεκτονική της SPA-PIFA.....	53
2.21 Διάγραμμα ακτινοβολίας της SPA-PIFA στα 2,4 GHz.....	55
2.22 VSWR της SPA-PIFA γύρω από την κεντρική συχνότητα των 2.4 GHz.....	55
2.23 Δομή και διαστάσεις της cross PIFA.....	56
2.24 Διάγραμμα ακτινοβολίας της cross-PIFA στην κεντρική συχνότητα των 3.5 GHz....	58
2.25 VSWR της cross-PIFA γύρω από την κεντρική συχνότητα των 3.5 GHz.....	58
3.1 Δομή της PIFA.....	65
3.2 Υλοποίηση της PIFA στο SNEC.....	66
3.3 Μεταβολή του VSWR στη συχνοτική μπάντα των 900 MHz για την κεραία PIFA....	68
3.4 Διαγράμματα ακτινοβολίας της PIFA στα επίπεδα xy, xz και yz στα 900 MHz.....	69
3.5 Αναπαράσταση της απλής PIFA στο SNEC.....	70
4.1 Διάταξη απλής κεραίας PIFA (single PIFA) η οποία θα χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση στο πρόγραμμα Super nec.....	72
4.2 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$ απλής κεραίας PIFA από μετρήσεις στο πρόγραμμα Super nec και με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	93
4.3 Διάγραμμα ακτινοβολίας $U_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$ απλής κεραίας PIFA με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	93
4.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας $U(\theta=90^{\circ},\varphi)$ στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	94
4.5 Διάταξη στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων η οποία θα χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση στο πρόγραμμα Super nec.....	95
4.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$ στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda/4$ με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	96
4.7 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$ στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda/4$ με δεδομένα από προσομοίωση στο Super nec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	96
4.8 Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας $E_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$ στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda/4$ με προσομοίωση στο Super nec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών.....	97

4.9 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda/2$ με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	97
4.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda/2$ με δεδομένα από προσομοίωση στο Supermec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	98
4.11 Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda/2$ με προσομοίωση στο Supermec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών.....	98
4.12 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda$ με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel...	99
4.13 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda$ με δεδομένα από προσομοίωση στο Supermec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	99
4.14 Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=\lambda$ με προσομοίωση στο Supermec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών.....	100
4.15 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=2\lambda$ με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	100
4.16 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=2\lambda$ με δεδομένα από προσομοίωση στο Supermec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	101
4.17 Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=2\lambda$ με προσομοίωση στο Supermec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών.....	101
4.18 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=4\lambda$ με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	102
4.19 Διάγραμμα ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=4\lambda$ με δεδομένα από προσομοίωση στο Supermec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.....	102
4.20 Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας $E\theta$ ( $\theta=90^\circ, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για $d=4\lambda$ με προσομοίωση στο Supermec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών.....	103
5.1 Διάταξη στοιχειοκεραίας με άξονα τον άξονα των $y$ .....	105
5.2 Διάταξη στοιχειοκεραίας PIFA που μελετάται με άξονα τον άξονα των $y$ .....	105
5.3 Αμοιβαία αντίσταση εισόδου μεταξύ 2 στοιχείων στοιχειοκεραίας PIFA συναρτήσει της απόστασης που βρίσκονται τα στοιχεία.....	108

## Κεφάλαιο 1: Στοιχειοκεραίες

### 1.1 Εισαγωγή

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών είναι αναγκαία η σχεδίαση κεραιών με πολύ μεγάλη κατευθυντικότητα και απολαβή, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν αυξηθεί το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας. Επίσης είναι απαραίτητη σε πολλές περιπτώσεις η ηλεκτρονική στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας των κεραιών. Η αύξηση των διαστάσεων ενός στοιχείου αυξάνει την κατευθυντικότητα της κεραίας. Ένας άλλος τρόπος αύξησης των διατάσεων μιας κεραίας, χωρίς να αυξάνει απαραίτητα και το μέγεθος των ιδιαίτερων στοιχείων, είναι να χρησιμοποιηθεί μια ομάδα από ακτινοβολητές με ορισμένη γεωμετρική και ηλεκτρική μορφή. Μια τέτοια κεραία που σχηματίζεται από πολλά στοιχεία, τα οποία συνήθως είναι πανομοιότυπα λόγω του ότι είναι βολικό, απλό και πρακτικό, ονομάζεται στοιχειοκεραία. Έτσι, με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης επιτυγχάνονται βελτιωμένες ιδιότητες για την στοιχειοκεραία σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες του ενός στοιχείου της, καθώς τα επιμέρους πεδία των στοιχείων της κεραίας, συμβάλουν στις επιθυμητές διευθύνσεις του χώρου, ενώ αντίθετα αλληλοαναιρούνται σε άλλες.

Το συνολικό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας προσδιορίζεται από το διανυσματική υπέρθεση των πεδίων των επιμέρους ακτινοβολητών που την αποτελούν, εφόσον βέβαια δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας. Συνεπώς η ρευματική κατανομή κάθε στοιχείου πρέπει να είναι η ίδια με την κατανομή που θα είχε το στοιχείο μόνο του στο χώρο, κάτι που επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της απόστασης μεταξύ των στοιχείων.

Οι στοιχειοκεραίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή γιατί αυξάνουν την κατευθυντικότητα, έχουν την δυνατότητα να συνθέτουν επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας καθώς επίσης και την δυνατότητα στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρικό τρόπο.

Η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας εξαρτάται από:

- Τη γεωμετρία της στοιχειοκεραίας (γραμμική, κυκλική, επίπεδη κ. λ. π)
- Τη σχετική απόσταση μεταξύ των στοιχείων

- Το πλάτος της ρευματικής διέγερσης για κάθε στοιχείο
- Τη φάση της ρευματικής διέγερσης για κάθε στοιχείο
- Τη συχνότητα λειτουργίας
- Το πλήθος των στοιχείων της κεραίας
- Το σχετικό διάγραμμα του κάθε στοιχείου.

## 1.2 Στοιχειοκεραίες πολλών στοιχείων

Το συνολικό μακρινό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το μακρινό πεδίο ενός από τα όμοια στοιχεία ακτινοβολίας που αποτελούν την στοιχειοκεραία με συνάρτηση που περιγράφει τη διάταξη των στοιχείων και ονομάζεται *παράγοντας διάταξης*. Έτσι συμπεραίνουμε ότι για να παραχθεί το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας, πρέπει να επιλεγεί εκτός από το κατάλληλο στοιχείο ακτινοβολίας και ο παράγοντας διάταξης.

Τα ρεύματα των στοιχείων ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας είναι δυνατόν να διαφέρουν κατά μέτρο και φάση. Οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις χωρικά ομοιόμορφες και τις χωρικά ανομοιόμορφες. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες επειδή για αυτές υπάρχει πλήθος μεθόδων ανάλυσης και σύνθεσης.

Αν  $I_0$  είναι ο φασιθέτης του ρεύματος διέγερσης του κεντρικού στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θεωρείται ως στοιχείο αναφοράς, το ρεύμα διέγερσης οποιουδήποτε άλλου στοιχείου μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$I_m = c_m I_0 \quad \text{όπου } m = 0, 1, 2, \dots, M - 1 \quad (1.1)$$

και

$c_m$  = ρευματικός συντελεστής του στοιχείου  $m$  (μιγαδικός αριθμός)

$M$  = το πλήθος των στοιχείων της κεραίας.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές για τη μακρινή περιοχή των κεραιών, η ένταση ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας  $U(\theta, \varphi)$  δίνεται από την σχέση:

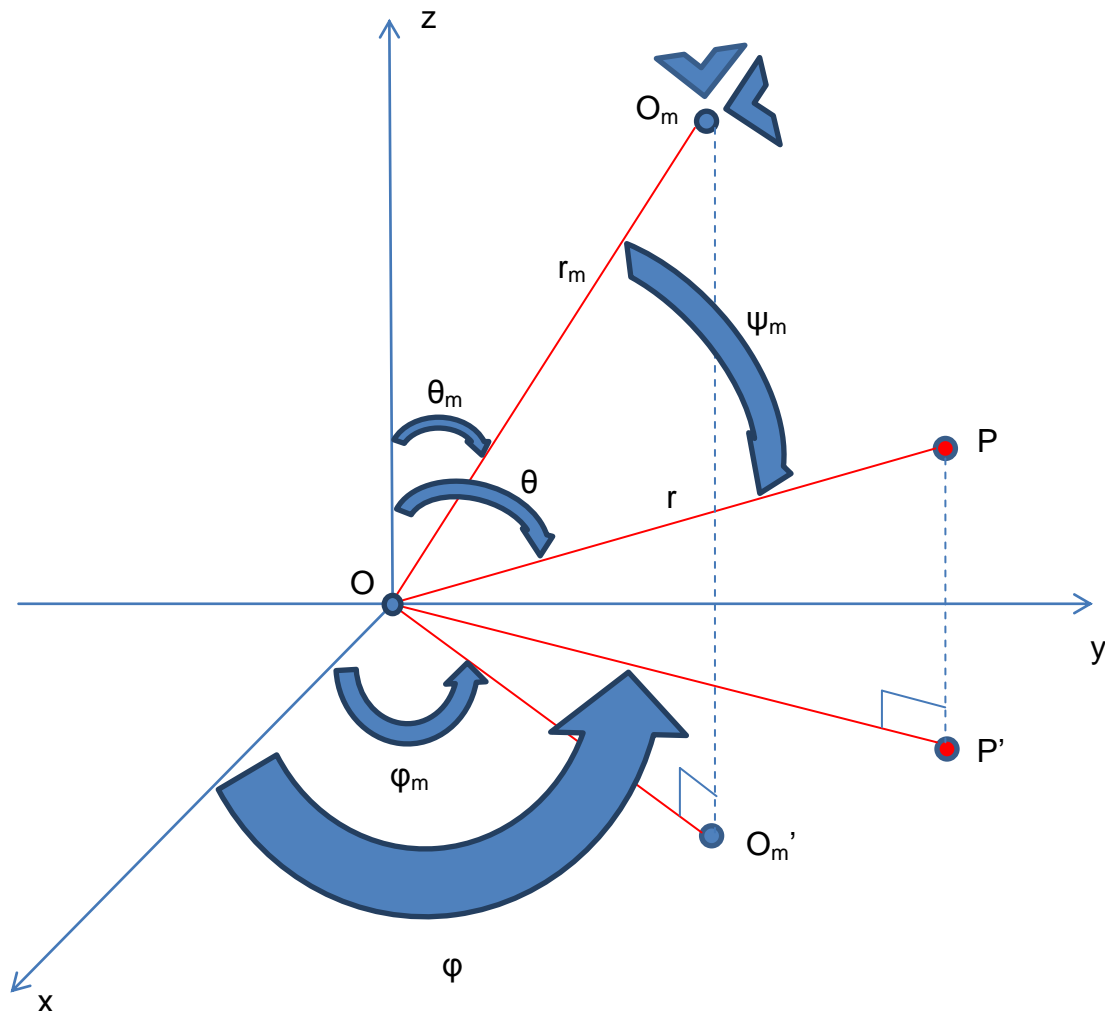
$$U(\theta, \varphi) = U_o(\theta, \varphi)|S(\theta, \varphi)|^2 \quad (1.2)$$

όπου,

$U_o(\theta, \varphi)$  = η ένταση ακτινοβολίας ενός εκ των όμοιων στοιχείων ακτινοβολίας

$S(\theta, \varphi)$  = ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας

Ο παράγοντας διάταξης μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει των συντεταγμένων θέσης των στοιχείων ακτινοβολίας όπως παρουσιάζεται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχήμα 1.1: Γεωμετρία στοιχειοκεραίας [1]

Με βάση το Σχήμα 1.1 ο παράγοντας διάταξης υπολογίζεται:

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp(jkr_m \cos \psi_m) \quad (1.3)$$

$$\cos \psi_m = \cos \theta_m \cos \theta + \sin \theta_m \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m) \quad (1.4)$$

όπου:

$k$  = κυματικός αριθμός του μέσου διάδοσης

$\theta_m, \theta, \varphi_m, \varphi$  και  $\psi_m$  οι γωνίες όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.1

Σε αρκετές περιπτώσεις, το στοιχείο ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας με παράγοντα διάταξης  $S_2(\theta, \varphi)$  αποτελεί και το ίδιο άλλη στοιχειοκεραία με παράγοντα διάταξης  $S_1(\theta, \varphi)$ . Στην περίπτωση αυτή για τον προσδιορισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας εφαρμόζεται η αρχή του πολλαπλασιασμού των παραγόντων διάταξης οπότε ο παράγοντας διάταξης της πιο πάνω στοιχειοκεραίας θα προκύψει:

$$S(\theta, \varphi) = S_1(\theta, \varphi) S_2(\theta, \varphi) \quad (1.5)$$

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι ο παράγοντας διάταξης εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας, τη γεωμετρική διάταξη, το πλήθος και τη σχετική διέγερση των στοιχείων. **Ο παράγοντας διάταξης δεν εξαρτάται από το είδος των ακτινοβολητών που την αποτελούν και προσδιορίζεται αντικαθιστώντας τα στοιχεία ακτινοβολίας με ιστροπικούς ακτινοβολητές, τοποθετημένους στα κέντρα διέγερσης τους.**

Επίσης, το μέτρο του παράγοντα διάταξης που αφορά τη μακρινή περιοχή, είναι ανεξάρτητο από την εκλογή του κέντρου των συντεταγμένων. Σε στοιχειοκεραίες με ορισμένο πλήθος στοιχείων, συγκεκριμένη γεωμετρική διάταξη και διέγερση, ο παράγοντας διάταξης έχει μοναδικό μέτρο, το οποίο αποτελεί συνάρτηση της συχνότητας ανεξάρτητα από την επιλογή του κέντρου συντεταγμένων, η επιλογή του οποίου γίνεται με στόχο την ευκολία προσδιορισμού του και είναι συνήθως το γεωμετρικό κέντρο της κεραίας.

Το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας δίνεται από τη σχέση:

$$D_g(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U_o(\theta, \varphi) |S(\theta, \varphi)|^2}{\oint U_o(\theta, \varphi) |S(\theta, \varphi)|^2 d\Omega} \quad (1.6)$$

ενώ το γεωμετρικό κατευθυντικό κέρδος το οποίο εκφράζει το βαθμό στον οποίο επηρεάζει ο παράγοντας διάταξης την κατευθυντικότητα δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$D_s(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |S(\theta, \varphi)|^2}{\oint |S(\theta, \varphi)|^2 d\Omega} \quad (1.7)$$

### 1.3 Τα διάφορα είδη των Στοιχειοκεραιών

Επιγραμματικά τα διαφορά είδη στα οποία χωρίζονται οι στοιχειοκεραίες είναι:

- Γραμμικές στοιχειοκεραίες
- Γραμμικές στοιχειοκεραίες με ομοιόμορφη διέγερση
- Γραμμικές στοιχειοκεραίες με ανομοιόμορφη διέγερση
- Συνθέτες στοιχειοκεραίες
- Χωρικά ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες

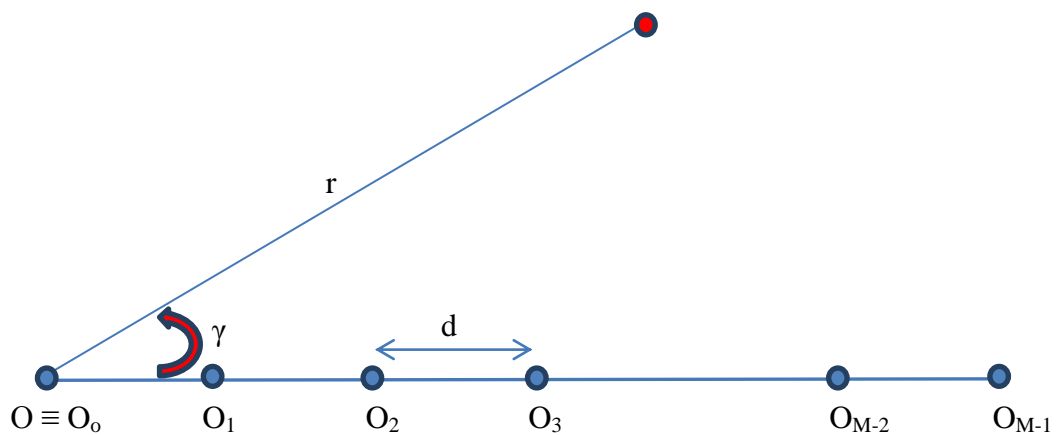
Μερικές από τις παραπάνω κατηγορίες στοιχειοκεραιών περιλαμβάνουν και επιπλέον υποκατηγορίες. Οι γραμμικές στοιχειοκεραίες ανάλογα με την λειτουργία τους διακρίνονται σε αυτές που χρησιμοποιούν μετωπική ακτινοβολία, αξονική ακτινοβολία και σε στοιχειοκεραίες με ηλεκτρονικά στρεφόμενο διάγραμμα.

Στις γραμμικές στοιχειοκεραίες με ανομοιόμορφη διέγερση περιλαμβάνονται και η διωνυμική στοιχειοκεραία, η τριγωνική στοιχειοκεραία και η υπερκατευθυντική στοιχειοκεραία.

### 1.3.1 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες

Οι χωρικά ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες είναι ένα χαρακτηριστικό είδος στοιχειοκεραιών διότι όλα τα σημεία αναφοράς των στοιχείων ακτινοβολίας βρίσκονται τοποθετημένα επί ευθείας που ονομάζεται άξονας της στοιχειοκεραίας και αποτελούν ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον.

Η εύρεση του παράγοντα διάταξης υπολογίζεται με βάση το Σχήμα 1.2 και από της σχέσεις:



Σχήμα 1.2: Γεωμετρία χωρικά ομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας [1]

$$r_m = md \quad (1.8)$$

$$\psi_m = \gamma \quad (1.9)$$

όπου  $m=0,1,2,\dots,M-1$  είναι το πλήθος των στοιχείων και  $d$  οι απόσταση δύο διαδοχικών στοιχείων και ονομάζεται βήμα της γραμμικής στοιχειοκεραίας.

Οπότε ο παράγοντας διάταξης για την γραμμική στοιχειοκεραία υπολογίζεται:

$$S(\gamma) = c_0 + c_1 \exp(jkdc\cos\gamma) + \dots + c_{M-1} \exp[j(M-1)kdc\cos\gamma] \quad (1.10)$$



όπου  $c_i, i=0,1,2,\dots, M-1$ , οι ρευματικοί συντελεστές των στοιχείων της στοιχειοκεραίας και η γωνία  $\gamma$  της παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Παρατηρούμε στο σημείο αυτό ότι η γωνία  $\gamma$  υποκρύπτει της συντεταγμένες διεύθυνσης  $\theta$  και  $\varphi$  και εύκολα προκύπτει:

$$\cos \gamma = \sin \theta \cos \varphi \quad (1.11)$$

αν ο άξονας της στοιχειοκεραίας είναι ο άξονας  $x$ , και

$$\cos \gamma = \sin \theta \sin \varphi \quad (1.12)$$

αν ο άξονας της στοιχειοκεραίας είναι ο άξονας  $y$ .

Σε περίπτωση στην οποία η διαφορά φάσης μεταξύ των ρευματικών συντελεστών είναι σταθερή ανάμεσα σε διαδοχικά στοιχεία έχουμε:

$$c_m = \alpha_m \exp(jm\delta) \quad (1.13)$$

όπου οι συντελεστές  $\alpha_m$  είναι θετικοί πραγματικοί αριθμοί.

Επομένως ο παράγοντας διάταξης με βάση την πιο πάνω σχέση παίρνει την εξής μορφή :

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m \exp[jm(kd \cos \gamma + \delta)] \quad (1.14)$$

Ακόμη περισσότερο μπορεί να απλοποιηθεί ο τύπος για τον παράγοντα διάταξης ορίζοντας την βοηθητική μεταβλητή:

$$\psi = kd \cos \gamma + \delta \quad (1.15)$$

και η τελική μορφή στην οποία καταλήγει είναι :

$$S(\psi) = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m \exp(jm\psi) \quad (1.16)$$

Το συμπέρασμα που προκύπτει από της παραπάνω τύπους είναι ότι ο παράγοντας διάταξης μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας μπορεί να εκφρασθεί ως περιοδική συνάρτηση μιας βοηθητικής μεταβλητής  $\psi$  με περίοδο  $2\pi$ .

Το διάστημα τιμών μέσα στο οποίο η βοηθητική μεταβλητή  $\psi$  αντιστοιχεί σε πραγματικές τιμές της γωνίας κλίσης  $\gamma$  ονομάζεται *ορατή περιοχή του  $\psi$*  και ορίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\delta - kd \leq \psi \leq \delta + kd \quad (1.17)$$

Το εύρος της ορατής περιοχής καθορίζεται από το ηλεκτρικό βήμα  $kd$  της στοιχειοκεραίας, ενώ η θέση της από τη διαφορά φάσης  $\delta$ .

### 1.3.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με ομοιόμορφη διέγερση

Στην κατηγορία αυτή των στοιχειοκεραιών, τα στοιχεία που αποτελούν μια κεραία τροφοδοτούνται με ρεύματα που έχουν ίδιο μέτρο και προοδευτική διαφορά φάσης. Επομένως ο παράγοντας διάταξης έχει την εξής μορφή:

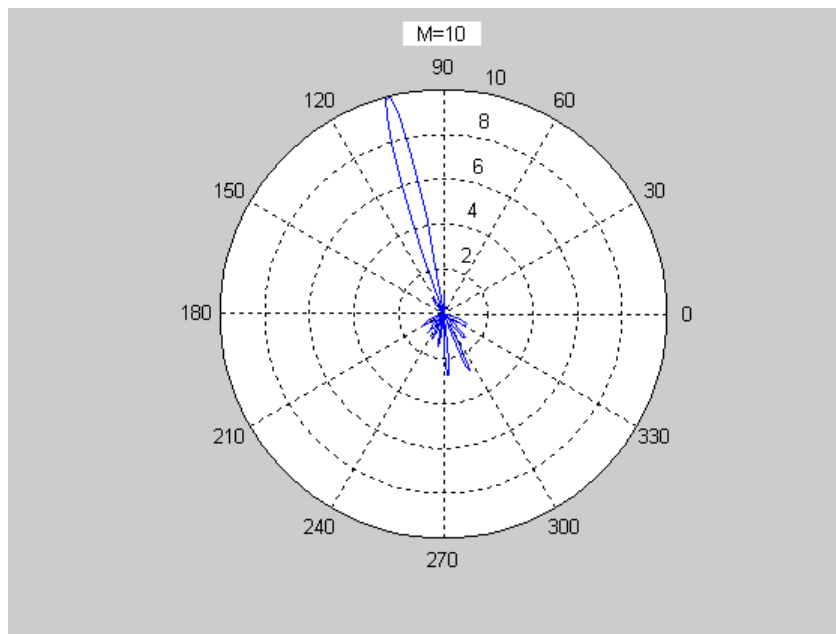
$$S(\psi) = A \sum_{m=0}^{M-1} \exp(jm\psi) = A \exp[j(M-1)\psi/2] \frac{\sin(\frac{M\psi}{2})}{\sin(\frac{\psi}{2})} \quad (1.18)$$

όπου με  $A$  συμβολίζεται ο κοινός συντελεστής καθώς οι συντελεστές για κάθε στοιχείο μιας στοιχειοκεραίας  $a_m$  είναι ίσοι στην περίπτωση αυτή.

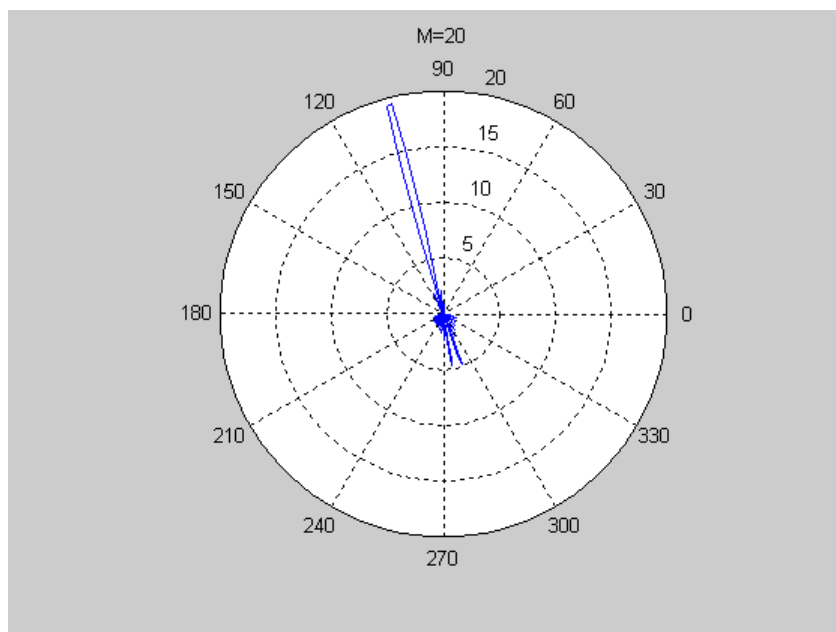
Για την υλοποίηση της χάραξης των διαγραμμάτων ακτινοβολίας υπολογίζεται το μέτρο του παράγοντα διάταξης, το οποίο προκύπτει:

$$|S(\psi)| = AM \left| \frac{\sin(\frac{M\psi}{2})}{M \sin(\frac{\psi}{2})} \right| \quad (1.19)$$

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας γραμμικής ομοιόμορφης στοιχειοκεραίας για  $M=10$  και  $M=20$  στοιχεία με  $\delta=\pi/5$  και  $kd=4\pi/5$ .



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα ακτινοβολίας γραμμικής ομοιόμορφης στοιχειοκεραίας για  $M=10$  στοιχεία [3]



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα ακτινοβολίας γραμμικής ομοιόμορφης στοιχειοκεραίας για  $M=20$  στοιχεία [3]

Με την κατασκευή του πολικού διαγράμματος συνάγονται τα εξής ποιοτικά συμπεράσματα τα οποία είναι χρήσιμα στην κατανόηση της λειτουργίας μιας στοιχειοκεραίας και τα οποία βοηθούν στην επίτευξη επιθυμητών διαγραμμάτων.

- Η τιμή της παραμέτρου  $\delta$  επηρεάζει την κλίση του κύριου λοβού ως προς τον άξονα της στοιχειοκεραίας .
- Ο αριθμός των πλευρικών λοβών αυξάνει καθώς αυξάνει και η τιμή της παραμέτρου  $kd$ .
- Βασικό ρόλο στον αριθμό των πλευρικών λοβών παίζει και το πλήθος των στοιχείων  $M$  όπου με αύξηση του πλήθους των στοιχείων  $M$  αυξάνεται και το πλήθος των πλευρικών λοβών.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται μερικοί τύποι με τους οποίους υπολογίζονται οι γωνίες μηδενισμού  $\gamma_n$  του πολικού διαγράμματος οι οποίες αντιστοιχούν στις γωνίες μηδενισμού  $\psi_n$  του καρτεσιανού διαγράμματος.

$$\frac{M\psi}{2} = n\pi, n \in Z \text{ με } n \neq qM, q \in Z \quad (1.20)$$

$$\cos(\gamma_n) = \frac{1}{kd} \left( -\delta + \frac{2\pi}{M} n \right), n \in Z \text{ με } n \neq qM, q \in Z \quad (1.21)$$

Για το υπολογισμό των γωνιών που αντιστοιχούν σε πτώση 3dB από το μέγιστο του πολικού διαγράμματος ( $\gamma_{3dB}$ ) οι οποίες αντιστοιχούν στις τιμές του  $\psi$  που ικανοποιούν την σχέση:

$$\left| \frac{\sin(\frac{M\psi}{2})}{M \sin(\frac{\psi}{2})} \right| = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (1.22)$$

προκύπτουν:

$$\cos(\gamma_{3dB}) = \frac{1}{kd} (-\delta \pm \psi_{3dB}) \quad (1.23)$$

Βασικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία είναι και το γωνιακός εύρος του κύριου λοβού και το εύρος 3db.

$$\Delta_0 = |\gamma_1 - \gamma_{-1}| = \left| \cos^{-1} \left[ \frac{1}{kd} \left( -\delta + \frac{2\pi}{M} \right) \right] - \cos^{-1} \left[ \frac{1}{kd} \left( -\delta - \frac{2\pi}{M} \right) \right] \right| \quad (1.24)$$

$$\Delta_{3dB} = \left| \cos^{-1} \left[ \frac{1}{kd} (-\delta + \psi_{3dB}) \right] - \cos^{-1} \left[ \frac{1}{kd} (-\delta - \psi_{3dB}) \right] \right| \quad (1.25)$$

Για τον υπολογισμό του κυρίου λοβού θεωρούμε  $\psi=0$  και εφόσον υπάρχει στην ορατή περιοχή η τιμή αυτή για την γωνία  $\gamma$  γίνεται χρήση της σχέσης:

$$\gamma_m = \cos^{-1} \left( -\frac{\delta}{kd} \right) \quad (1.26)$$

### 1.3.3 Σύνθετες στοιχειοκεραίες

Είναι αξιοσημείωτο να αναφέρουμε ότι πολλές στοιχειοκεραίες έχουν ως στοιχεία ακτινοβολίας άλλες στοιχειοκεραίες, οπότε στις περιπτώσεις αυτές ο παράγοντας διάταξης προσδιορίζεται με εφαρμογή της αρχής του πολλαπλασιασμού των παραγόντων σύμφωνα με τη Σχέση 1.5. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι στην παρούσα εργασία για να υπολογιστεί ο παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας PIFA, επειδή τα στοιχεία της κεραίας αυτής αποτελούν ξεχωριστά άλλες στοιχειοκεραίες (επίπεδες στοιχειοκεραίες) θα έπρεπε να εφαρμοστεί η αρχή πολλαπλασιασμού των παραγόντων. Επειδή όμως εμείς δεν γνωρίζουμε τον παράγοντα διάταξης της απλής κεραίας PIFA αλλά γνωρίζουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας της θα θεωρήσουμε τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας PIFA που θα ασχοληθούμε ως ισοτροπικούς ακτινοβολητές τους οποίους γνωρίζουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας τους και θα επιλύσουμε το πρόβλημα μας με την θεωρία των στοιχειοκεραίων που αναλύθηκε πιο πάνω.

### 1.3.4 Επίπεδες Στοιχειοκεραίες

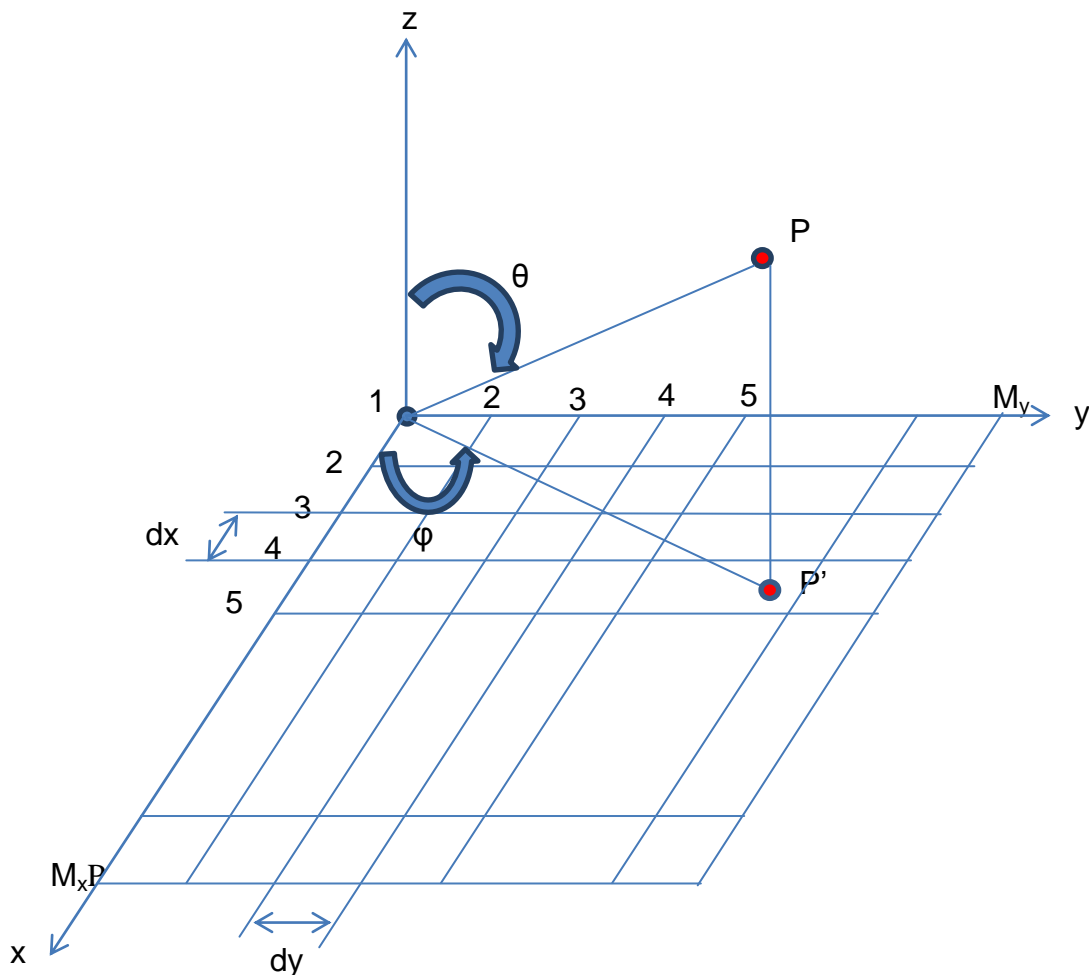
Μια μεγάλη κατηγορία στοιχειοκεραίων είναι οι επίπεδες στοιχειοκεραίες στις οποίες εφαρμόζεται η αρχή του πολλαπλασιασμού των παραγόντων διάταξης. Στις κεραίες αυτές

τα κέντρα διέγερσης είναι μέρος ενός ορθογώνιου πλέγματος και χάρη σε αυτή την μορφή που έχουν αποδίδεται σε αυτές ο χαρακτηρισμός επίπεδες στοιχειοκεραίες.

Η ιδιαίτερη αυτή μορφή κεραιών παρέχει περισσότερες δυνατότητες για την υλοποίηση πιο σύνθετων διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα τα οποία παρέχουν οι επίπεδες στοιχειοκεραίες είναι:

- Η κατασκευή χαμηλότερων πλευρικών λοβών.
- Η δημιουργία συμμετρικών διαγραμμάτων.
- Η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας προς κάθε κατεύθυνση στο χώρο.



Σχήμα 1.5: Επίπεδη Στοιχειοκεραία [1]

Ο παράγοντας διάταξης και για τους δύο άξονες  $(\chi, \psi)$  προσεγγίζει την μορφή των απλών γραμμικών στοιχειοκεραιών με μερικές τροποποιήσεις σε κάθε άξονα αντίστοιχα.

Για τον άξονα  $x$  σχηματίζεται σύμφωνα και με το Σχήμα 1.5 στοιχειοκεραία  $M_x$  στοιχείων με βήμα  $dx$  και προοδευτική διαφορά φάσης  $\delta_x$ . Οπότε ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας αυτής προκύπτει :

$$S_x(\theta, \varphi) = \sum_{m_x=0}^{M_x-1} C_{m_x} \exp[j(m_x - 1)(kd_x \sin \theta \cos \varphi + \delta_x)] \quad (1.27)$$

όπου  $C_{m_x}$ ,  $m_x = 0, 1, 2, \dots, M_x - 1$  οι ρευματικοί συντελεστές των στοιχείων.

Όμοια για τον άξονα  $y$  έχουμε:

$$S_y(\theta, \varphi) = \sum_{m_y=0}^{M_y-1} C_{m_y} \exp[j(m_y - 1)(kd_y \sin \theta \sin \varphi + \delta_y)] \quad (1.28)$$

Εφαρμόζοντας τον πολλαπλασιασμό των παραγόντων διάταξης για τις κεραίες που σχηματίζονται κατά τον άξονα  $x$  και κατά τον άξονα  $y$  κατασκευάζεται ο νέος παράγοντας διάταξης ο οποίος περιγράφεται από τον τύπο που ακολουθεί:

$$S(\theta, \varphi) = C^2 \exp \left[ \frac{j(M_x-1)\psi_x}{2} \right] \frac{\sin(\frac{M_x\psi_x}{2})}{\sin(\frac{\psi_x}{2})} \exp \left[ \frac{j(M_y-1)\psi_y}{2} \right] \frac{\sin(\frac{M_y\psi_y}{2})}{\sin(\frac{\psi_y}{2})} \quad (1.29)$$

και στον οποίο έχει θεωρηθεί ότι στην στοιχειοκεραία τα στοιχεία διεγείρονται ομοιόμορφα και οι ρευματικοί συντελεστές είναι σταθεροί και ίσοι με  $C$ .

Στην συνέχεια ακολουθεί μια νέα απλοποιημένη μορφή του μέτρου του παράγοντα διάταξης χρησιμοποιώντας δυο παραδοχές για τα  $\psi_x$  και  $\psi_y$ .

$$|S(\theta, \varphi)| = C^2 M \left| \frac{\sin(\frac{M_x\psi_x}{2})}{M_x \sin(\frac{\psi_x}{2})} \right| \left| \frac{\sin(\frac{M_y\psi_y}{2})}{M_y \sin(\frac{\psi_y}{2})} \right| \quad (1.30)$$

$$\psi_x = kd_x \sin \theta \cos \varphi + \delta_x \quad (1.31)$$

$$\psi_y = kd_y \sin \theta \sin \varphi + \delta_y \quad (1.32)$$

Τέλος να σημειώσουμε ότι οι ιδιότητες των ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών μπορούν να αξιοποιηθούν και στην περίπτωση των ομοιόμορφων επίπεδων στοιχειοκεραιών.[1],[2],[3]



## **Κεφάλαιο 2: Κεραίες PIFA (Planar Inverted F Antennas)**

### 2.1 Εισαγωγή

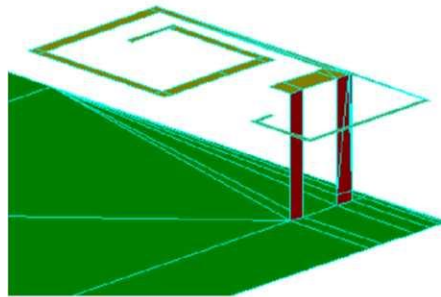
Με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των ασύρματων επικοινωνιών, με τις διάφορες ασύρματες εφαρμογές που υπάρχουν σήμερα, και την τάση να γίνεται συνεχώς μικρότερο το μέγεθος των φορητών συσκευών, είναι αρκετά δύσκολη η επιλογή των κεραιών. Η επιθυμία για συνδυασμό πολλαπλών λειτουργιών και υπηρεσιών με τον ίδιο εξοπλισμό έχει δημιουργήσει την ανάγκη για κεραίες που μπορούν να λειτουργούν σε πολλές μπάντες συχνοτήτων. Οι συσκευές αυτές χρειάζονται μικρές κεραίες οι οποίες να προσαρμόζονται εύκολα στη συσκευή και να είναι και multi-band κεραίες ώστε να μην χρειάζονται πολλές κεραίες, αλλά με μια μόνο κεραία να είναι δυνατή η μετάδοση video, φωνής και δεδομένων. Επίσης πρέπει να έχουν υψηλή απόδοση ακτινοβολίας, να εκπέμπουν ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, να έχουν απλές αντιστάσεις με χαμηλές απώλειες και να είναι απλές μηχανολογικές κατασκευές. [4],[5]

Οι μονοπολικές κεραίες παρουσιάζουν ένα καλό εύρος ζώνης σύνθετης αντίστασης και κατάλληλη λειτουργία σε όλες τις κατευθύνσεις όταν χρησιμοποιούνται σε τερματικές συσκευές. Οι μη συμμετρικές αυτές κεραίες προσαρμόζονται και εύκολα σε γραμμές 50Ω. Σε μια προσπάθεια να μειωθεί το κόστος παραγωγής και να βελτιωθεί το εύρος ζώνης, έχουν αναπτυχθεί επίπεδες κατασκευές έναντι των κλασικών κυλινδρικών stub τετάρτου μήκους κύματος. Επίπεδες μονοπολικές κεραίες έχουν βελτιστοποιηθεί ώστε να παρέχουν εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης (impedance bandwidth) με καλά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Επιπλέον έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη πολύ συμπαγών UWB κεραιών για φορητές εφαρμογές. Αυτές οι απαιτήσεις έχουν οδηγήσει στο σχεδιασμό μονοπολικών κεραιών πιο πολύπλοκων σχημάτων που προσφέρουν ένα καλό συμβιβασμό μεγέθους και ολικής απόδοσης. Οι επίπεδες κεραίες ανεστραμμένου F (PIFA) έχουν αποδειχθεί κατάλληλες για χειροσυσκευές ευρυζωνικών συστημάτων. Μια κεραία PIFA μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα είδος γραμμικής κεραίας ανεστραμμένου F, όπου το καλώδιο έχει αντικατασταθεί από μια πλάκα ώστε να αυξηθεί το εύρος ζώνης της κεραίας. Επίσης οι

PIFA κεραίες, για να αυξήσουν το επιθυμητό εύρος ζώνης μπορούν να έχουν σχισμές/shorting pin (επαγωγικές L και U σχισμές [10], μαιάνδρους [11], χωρητικά συζευγμένες δομές, παρασιτικά συζευγμένες δομές [23]). [6],[7]

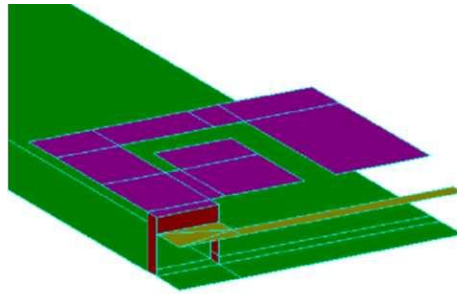
## 2.2 Ιστορική αναδρομή

Στα τέλη της δεκαετίας του 90', έκανε την είσοδό της στην κινητή τηλεφωνία η πρώτη εσωτερική κεραία, και προκάλεσε έτσι μεγάλο ενδιαφέρον στη αγορά. Χρησιμοποιώντας την έννοια των διακλαδώσεων τύπου μαιάνδρου, ο Z. Ying από την Ericsson πρότεινε μια εσωτερική τυπωμένη σπειροειδή κεραία και μια διπλής ζώνης τυπωμένη PIFA. Στο σχέδιο, η PIFA κεραία μπορεί να ελαχιστοποιηθεί και το πολλαπλής ζώνης χαρακτηριστικό γνώρισμα μπορεί να αποκτηθεί με τη χρησιμοποίηση της έννοιας των διακλαδώσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Το 1998, ο Z. Ying από την Ericsson κατασκεύασε την πρώτη διπλής ζώνης εσωτερική κεραία, την δίδυμη σπειροειδή κεραία (patent US 6166694) [7]

Αργότερα, στο ίδιο έτος, κατασκευάστηκε μιας διπλής ζώνης εσωτερική κεραία για κινητά τηλέφωνα. Η κεραία αυτή είναι βασισμένη σε μια κεραία PIFA με διακλαδώσεις που διαμορφώνεται από τις σχισμές σε μια μικρή επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



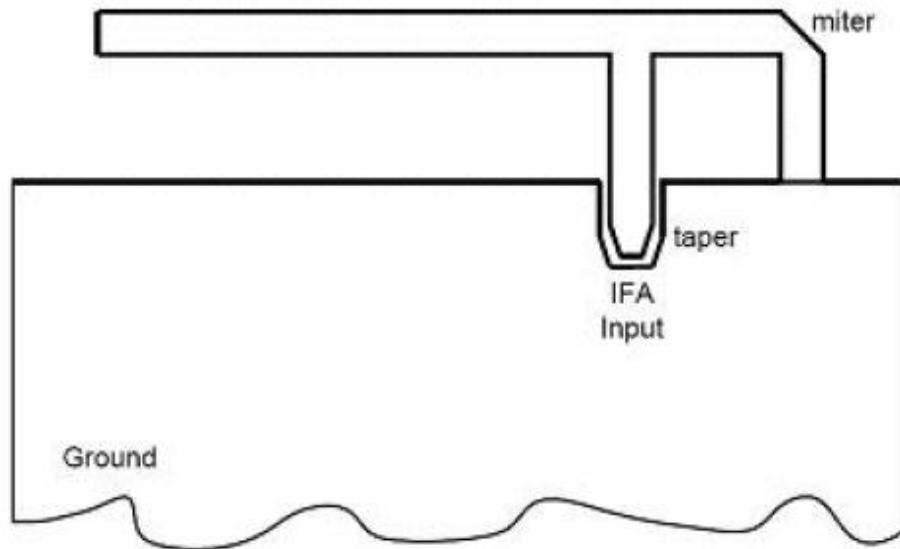
Σχήμα 2.2: Το 1998, ο Z. Ying από την Ericsson κατασκεύασε μια PIFA διπλής ζώνης με διακλαδώσεις για κινητή τηλεφωνία (patent: US 6343208B1) [7]

Ο S. Vance πρότεινε μια looped PIFA διπλής ζώνης που μπορεί ενδεχομένως να δημιουργήσει κυκλική πόλωση, και οι Hayes και S. Vance πρότειναν μια πολλαπλής ζώνης κεραία με διακλαδώσεις, που μπορεί να ενισχύσει την απόδοση των υψηλών ζωνών. Σήμερα, πολλά από τα διπλής ζώνης handsets χρησιμοποιούν αυτές τις κεραίες. [7]

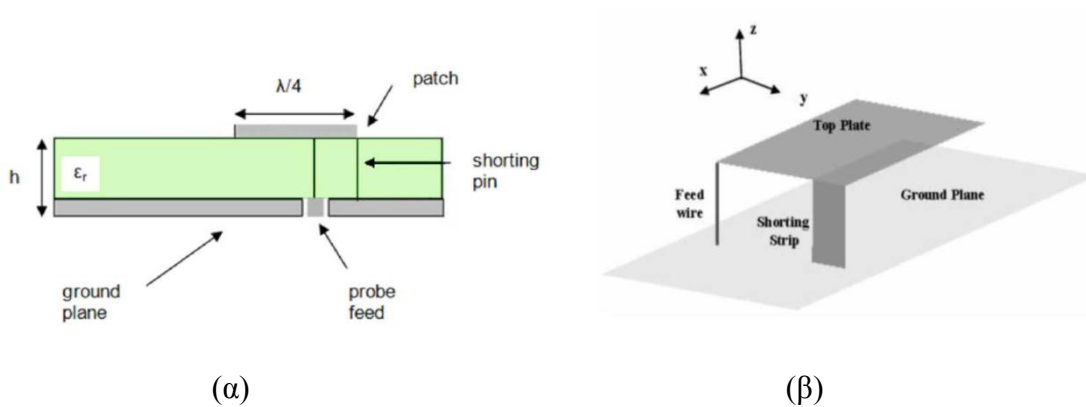
## 2.3 Ανάλυση κεραίας PIFA

### 2.3.1 Γενικά

Η κεραία PIFA (Επίπεδη Ανεστραμμένη F Κεραία) είναι μια κεραία IFA τοποθετημένη πάνω σε ένα επίπεδο γείωσης (Σχήμα 2.3). Ονομάζεται έτσι λόγω του ότι μοιάζει με ένα ανεστραμμένο F κάτι το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 2.4, όπου παρουσιάζεται η δομή μιας κεραίας PIFA.



Σχήμα 2.3: Κεραία IFA τοποθετημένη πάνω σε ένα επίπεδο γείωσης σχηματίζοντας μια κεραία PIFA [9]



Σχήμα 2.4: (α) Κεραία PIFA σε πλάγια όψη. (β) Κεραία PIFA σε 3-D απεικόνιση [8]

Η τυπωμένη κεραία PIFA αποτελείται από μία αγωγίμη άνω πλάκα (conductive top plate) και είναι τοποθετημένη πάνω από ένα επίπεδο (ground plate) ορισμένου μεγέθους. Οι δύο αυτές πλάκες ενώνονται μεταξύ τους μέσω του διπόλου τροφοδότησης (feed wire) και του αγωγού βραχυκύκλωσης (shorting strip). Η κεραία τροφοδοτείται στη βάση του feed wire στο σημείο όπου ενώνεται το feed wire με το επίπεδο γείωσης. Η κεραία PIFA είναι μια παραλλαγή του μονοπόλου, όπου το πάνω τμήμα έχει τοποθετηθεί κάτω με τρόπο ώστε να είναι παράλληλο με το επίπεδο γείωσης, μειώνοντας έτσι το ύψος της κεραίας. Αυτή η

παραλληλότητα των δύο αυτών τμημάτων εισάγει χωρητικότητα στην αντίσταση εισόδου της κεραίας, η οποία αντισταθμίζεται εισάγοντας το κυλινδρικό feed wire. Η απόδοση της κεραίας μπορεί να ελεγχθεί και να βελτιστοποιηθεί αλλάζοντας με διάφορους συνδυασμούς τις διαστάσεις των διάφορων στοιχείων της κεραίας. Το επίπεδο γείωσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση της κεραίας. Η διέγερση ρευμάτων στην άνω πλάκα της PIFA δημιουργεί διέγερση ρευμάτων και στο επίπεδο γείωσης. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που προκύπτει σχηματίζεται από την αλληλεπίδραση της IFA και από το είδωλο της κάτω στο επίπεδο γείωσης. Το επίπεδο γείωσης συμπεριφέρεται σαν ένας τέλειος ανακλαστήρας ενέργειας μόνο όταν έχει άπειρες διαστάσεις ή όταν οι διαστάσεις του είναι πολύ μεγαλύτερες του ίδιου του μονοπόλου. Γενικά έχει παρατηρηθεί από διάφορες εφαρμογές σχετικές με την PIFA ότι εάν το ground plane είναι πολύ μεγαλύτερο από  $\lambda/4$ , όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος που προκύπτει από τη συχνότητα λειτουργίας, τότε το διάγραμμα ακτινοβολίας θα εμφανίζει πολλούς λοβούς και κατά συνέπεια η κεραία δεν θα είναι κατευθυντική. Από την άλλη, εάν το ground plane είναι σημαντικά μικρότερο από  $\lambda/4$ , τότε ο συντονισμός γίνεται όλο και πιο δύσκολος και η απόδοση της κεραίας μειώνεται αισθητά. Επομένως, το μήκος του ground plane πρέπει να είναι περίπου ίσο με  $\lambda/4$ .

Οι κεραίες PIFA έχουν μικρή ακτινοβολία και ένα πανκατευθυντικό διάγραμμα το οποίο με διάφορες τιμές κέρδους εξασφαλίζει επαρκή απόδοση για τα τυπικά εσωτερικά περιβάλλοντα λαμβάνοντας υπόψη τις τυποποιημένες τιμές της ισχύος και της ευαισθησίας των δεκτών των περιορισμένου εύρους ραδιο-συσκευών. Επιπλέον, η πόλωση της κεραίας είναι συνήθως ελλειπτική αντί για γραμμική. Κατά συνέπεια, η κεραία έχει τη δυνατότητα να λάβει και τα κάθετα και τα οριζόντια πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, πράγμα που είναι πολύ χρήσιμο για τα εσωτερικά περιβάλλοντα όπου η αποπόλωση είναι ένα κυρίαρχο φαινόμενο, που λαμβάνει χώρα συχνά, και έτσι η επιλογή της κατάλληλης πόλωσης αποτελεί δύσκολη υπόθεση.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, οι κεραίες PIFA έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, γι' αυτό και είναι τόσο δημοφιλής. Πιο κάτω αναφέρονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα :

- Μια κεραία PIFA έχει μειωμένη οπίσθια ακτινοβολία προς το κεφάλι του χρήστη, ελαχιστοποιώντας την ηλεκτρομαγνητική απορρόφηση ισχύος των κυμάτων (SAR) ενώ παράλληλα ενισχύει την απόδοση των κεραιών.

- Μπορούν να τοποθετηθούν σε κινητή συσκευή σε σύγκριση με τις ελικοειδείς κεραίες ή τις κεραίες ραδιοφώνου (whip antenna ή rod antenna) όπου κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό.
- Η PIFA εκθέτει μέτριο έως ψηλό κέρδος και στις κάθετες και οριζόντιες καταστάσεις της πόλωσης. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι πολύ χρήσιμο σε ορισμένες ασύρματες επικοινωνίες όπου ο προσανατολισμός της κεραίας δεν καθορίζεται και οι αντανάκλασεις λαμβάνουν χώρα από διαφορετικές γωνίες του περιβάλλοντος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η σημαντική παράμετρος που εξετάζεται είναι το συνολικό πεδίο που προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των οριζόντιων και κάθετων καταστάσεων της πόλωσης.

Το βασικό μειονέκτημα που απομονώνει την κεραία PIFA από διάφορες εφαρμογές είναι το στενό εύρος ζώνης που παρουσιάζει και ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο να διερευνηθεί το εύρος ζώνης για την χρήση της τόσο σε κινητά τηλέφωνα όσο και σε άλλες εφαρμογές.

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε μερικές τεχνικές κατά τον σχεδιασμό της κεραίας PIFA προκειμένου να επιτευχθεί μείωση του μεγέθους, βελτίωση του εύρους ζώνης καθώς και άλλων χαρακτηριστικών της κεραίας.

### 2.3.2 Τεχνικές για την αύξηση του εύρους ζώνης κεραίας PIFA

Οι κύριες σχέσεις μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων που έχουν επίδραση στο εύρος ζώνης είναι οι εξής:

$$\text{Bandwidth} = \frac{f_u - f_l}{f_r} \propto \frac{1}{Q} \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L}}{R\sqrt{C}} \quad (2.2)$$

$$Q \propto \frac{1}{S} \quad (2.3)$$

Όπου:  $f_u$  = άνω συχνότητα εύρους ζώνης

$f_l$ = κάτω συχνότητα εύρους ζώνης

$f_r$ = συχνότητα συντονισμού

$Q$ = συντελεστής ποιότητας (quality factor)

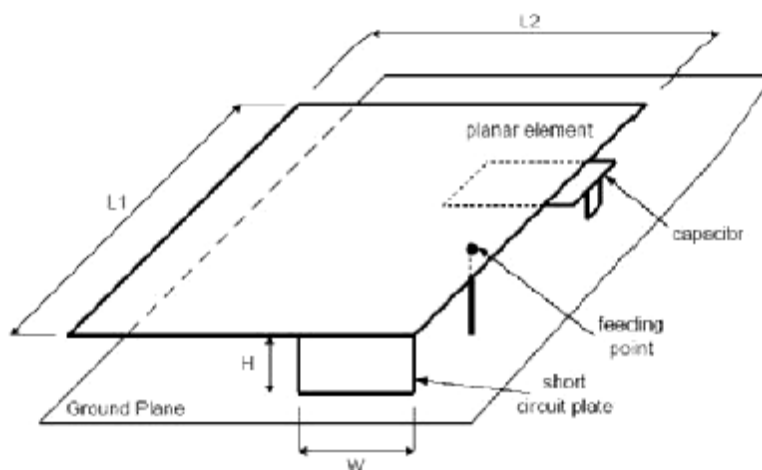
$L$ = επαγωγικός συντελεστής κεραίας

$R$ = συντελεστής απωλειών κεραίας

$C$ = χωρητικός συντελεστής κεραίας

$S$ = όγκος της κεραίας

Η διάταξη της κεραίας που μελετάμε είναι της μορφής:



Σχήμα 2.5: Χαρακτηριστικά κεραίας PIFA με χωρητικό φορτίο [5]

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για να διευρύνουμε το εύρος ζώνης είναι να αυξήσουμε το ύψος του βραχυκυκλώματος (shorting plate), δηλαδή να αυξήσουμε τον όγκο της κεραίας (volume). Ακόμη το εύρος ζώνης επηρεάζεται πάρα πολύ από το μέγεθος του επιπέδου γείωσης (ground plane). Έτσι μεταβάλλοντας το μέγεθος του ground plane, το εύρος ζώνης μιας κεραίας PIFA μπορεί να ρυθμιστεί. Για παράδειγμα, η μείωση του επιπέδου γείωσης μπορεί αποτελεσματικά να διευρύνει το εύρος ζώνης του συστήματος της κεραίας. Ακόμη αρκετές σχισμές στις άκρες του επιπέδου γείωσης μπορούν να τοποθετηθούν για τη μείωση του συντελεστή ποιότητας ( $Q$ ) της διάταξης (και να αυξηθεί έτσι το εύρος ζώνης). Ενίσχυση του εύρους ζώνης μπορεί επίσης να επιτευχθεί με διάφορες αποτελεσματικές προσεγγίσεις, όπως, χρησιμοποιώντας διπλό συντονισμό με την προσθήκη

επιπλέον patch προσθέτοντας έτσι χωρητικό φορτίο, τη φόρτωση με διηλεκτρικό υλικό υψηλής επιτρεπτότητας και επισυνάπτοντας επιπλέον αντίσταση στο σύστημα η οποία θα αυξήσει περαιτέρω τον όρο απωλειών.

### 2.3.3 Τεχνικές για μείωση των διαστάσεων κεραίας PIFA

Μια μέθοδος για να μειώσουμε το μέγεθος της κεραίας PIFA είναι να γειώσουμε το επίπεδο γείωσης με το επίπεδο στοιχείο της. Ωστόσο η προσέγγιση αυτή επηρεάζει παράλληλα την αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας. Το γεγονός αυτό μπορούμε να το αντισταθμίσουμε τοποθετώντας ένα χωρητικό φορτίο. Στην πράξη η απουσία του ύψους της κεραίας αντισταθμίζεται με ένα ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή το οποίο βοηθά στο να αντισταθμίσουμε τις μεταβολές στην αντίσταση ακτινοβολίας και να αυξήσουμε την αποδοτικότητα της κεραίας. Το χωρητικό φορτίο μειώνει το μήκος κύματος από  $\lambda / 4$  σε λιγότερο από  $\lambda / 8$  σε βάρος του εύρους ζώνης, επιτυγχάνοντας όμως καλό ταίριασμα της αντίστασης και μπορεί να παραχθεί με την προσθήκη μιας πλάκας (παράλληλα με το επίπεδο γείωσης) για να δημιουργηθεί έτσι μια παράλληλη πλάκα πυκνωτή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5. Τέλος η εισαγωγή σχισμών και μαιάνδρων στην κεραία PIFA επηρεάζει την συχνότητα συντονισμού και αυτή με την σειρά της επηρεάζει τις διαστάσεις της όπως θα αναφέρουμε και στην επόμενη παράγραφο.

### 2.3.4 Συχνότητα Συντονισμού

Η συχνότητα συντονισμού της κεραίας PIFA μπορεί να προσεγγιστεί από τις σχέσεις:

$$L_1 + L_2 = \frac{\lambda}{4} \quad (2.4)$$

$$\text{Όταν } \frac{W}{L_1} = 1 \text{ τότε } L_1 + H = \frac{\lambda}{4} \quad (2.5)$$

$$\text{Όταν } W = 0 \text{ τότε } L_1 + L_2 + H = \frac{\lambda}{4} \quad (2.6)$$

Όπου  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $W$ ,  $H$  φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



Η εισαγωγή μιας ανοικτής σχισμής στο σύστημα μειώνει τη συχνότητα συντονισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επάγονται ρεύματα τα οποία ρέουν από την άκρη της σχισμής, και ως εκ τούτου δημιουργείται ένα χωρητικό φορτίο στην σχισμή το οποίο μειώνει τη συχνότητα συντονισμού, οπότεν και δραστικά τις διαστάσεις της όπως φαίνεται και από τις σχέσεις (2.4) - (2.6). Η ίδια αρχή της δημιουργίας διαφόρων σχισμών στο επίπεδο στοιχείο της κεραίας μπορεί να εφαρμοστεί και για λειτουργία της κεραίας σε διπλή συχνότητα λειτουργίας (π.χ 900MHz και 1800MHz). Ακόμη, αλλαγές στο πλάτος του επίπεδου στοιχείου μπορεί επίσης να επηρεάσει στον καθορισμό της συχνότητας συντονισμού, όπως επίσης και το πλάτος της μικρής πλάκας γείωσης της PIFA. Η συχνότητα συντονισμού μειώνεται με την μείωση του πλάτους της πλάκας βραχυκύκλωσης (shorting plate), (W). Η συχνότητα συντονισμού και το χαρακτηριστικό εύρος ζώνης της κεραίας μπορούν εύκολα να αναλυθούν καθορίζοντας το σημείο τροφοδοσίας, στο οποίο θα λάβουμε τον ελάχιστο συντελεστή ανάκλασης.

### 2.3.5 Προσαρμογή κεραίας PIFA

Η προσαρμογή στο σύστημα της κεραίας PIFA επιτυγχάνεται με την κατάλληλη τοποθέτηση του σημείου τροφοδοσίας και του σημείου βραχυκυκλώματος και ρυθμίζοντας τον χώρο μεταξύ τους. Η κεντρική ιδέα για τον σχεδιασμό μιας κεραίας PIFA είναι να αποφύγουμε, χρησιμοποιώντας επιπλέον συγκεντρωμένα στοιχεία για την προσαρμογή στο σύστημα, επιπλέον απώλειες.

### 2.3.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της PIFA ορίζεται ως η σχετική κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος ως συνάρτηση της κατεύθυνσης στο χώρο. Στη συνηθισμένη περίπτωση το διάγραμμα ακτινοβολίας καθορίζεται στην μακρινή περιοχή και απεικονίζεται ως συνάρτηση των πολικών συντεταγμένων.

### 2.3.7 Αποδοτικότητα

Η αποδοτικότητα της κεραίας PIFA στο περιβάλλον μειώνεται δραστικά από:

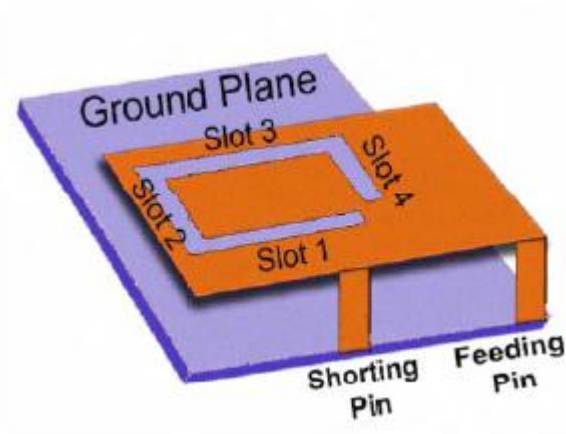
- Ωμικές απώλειες
  - Απώλειες λόγω μη καλής προσαρμογής
  - Απώλειες τροφοδοσίας και γραμμών μεταφοράς
  - Εξωτερικές παρασιτικές συχνότητες κοντά στην συχνότητα συντονισμού κ.τ.λ.
- [5],[7],[8],[9]

## 2.4 Εφαρμογές κεραίας PIFA

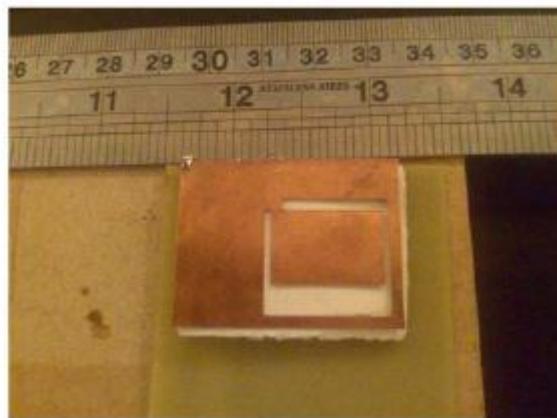
Όπως ειπώθηκε και στα προηγούμενα, είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι οι κεραίες PIFA χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην κινητή τηλεφωνική αγορά, καθώς αποτελούν, σε συντριπτικό ποσοστό, τις κεραίες που εφαρμόζονται σε εφαρμογές όπως τα GPS, GSM, CS 1800, WiMAX, DCS, Bluetooth, PCS και άλλα, και αυτό γιατί παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως το ότι είναι εύκολες στην κατασκευή τους, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, και έχουν απλή δομή.

### 2.4.1 Οι κεραίες PIFA για εφαρμογές WiMAX

Οι εφαρμογές WiMAX έχουν τρεις κατανεμημένες ζώνες συχνοτήτων, τη χαμηλή, τη μεσαία και τη ψηλή ζώνη. Η χαμηλή ζώνη έχει εύρος από 2.5-2.8 GHz, η μεσαία ζώνη έχει εύρος από 3.2-3.8 GHz και η ψηλή ζώνη έχει εύρος από 5.2-5.8 GHz. Ούτως ώστε να επιτευχθούν αυτές οι τρεις ζώνες για WiMAX εφαρμογές στα 2.6, 3.6 και 5.6 GHz με μια μόνο κεραία, έχουν χαραχθεί τέσσερις σχισμές πάνω σε μια κεραία PIFA. Η κεραία PIFA με τις τέσσερις σχισμές στο top plate φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται το πρωτότυπο της PIFA με τις τέσσερις σχισμές και στον Πίνακα 2.1 έχουμε τις διαστάσεις της κεραίας.



Σχήμα 2.6: Η κεραία PIFA με τις τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές [4]



Σχήμα 2.7: Πρωτότυπο της κεραίας PIFA με τις τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές [4]

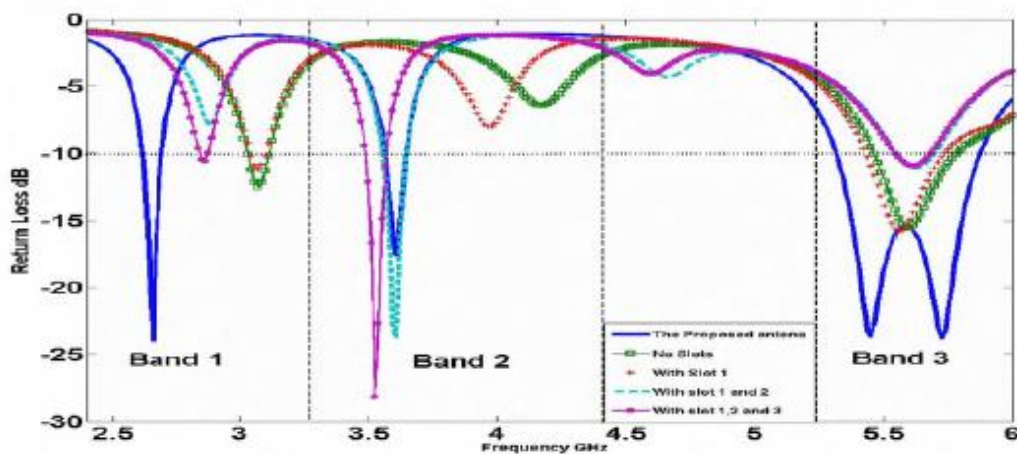
**The overall dimensions of the proposed antenna (UNIT: mm)**

W	L	Slot 1	Slot 2	Slot 3
38	29.59	2 x 20	1 x 20	5 x 21
Slot 4	Shorting pin	Feeding pin	Ground plane 50 x 50	
1 x 18	6 x 1.5	3 x 6		

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις κεραίας PIFA με τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές [4]

Στο Σχήμα 2.8 βλέπουμε την επίδραση της κάθε σχισμής στο top plate της κεραίας. Με πράσινο χρώμα έχουμε το διάγραμμα στο οποίο δεν υπάρχει καμία σχισμή στο top plate, με

κόκκινο χρώμα έχουμε μια σχισμή, με γαλάζιο χρώμα έχουμε δύο σχισμές, με μωβ χρώμα έχουμε τρεις σχισμές και με μπλε χρώμα έχουμε την τελική δομή της κεραίας με τέσσερις σχισμές. Αν συγκρίνουμε το πράσινο χρώμα στο οποίο δεν έχουμε σχισμές με το μπλε χρώμα όπου έχουμε τέσσερις σχισμές, παρατηρούμε ότι χωρίς σχισμές, η πρώτη ζώνη συχνοτήτων είναι στα 3.1 GHz, η δεύτερη ζώνη στα 4.5 GHz ενώ η τρίτη ζώνη είναι εκεί που πρέπει στα 5.6 GHz. Αν παρατηρήσουμε το διάγραμμα με μπλε χρώμα όπου έχουμε τις τέσσερις σχισμές, βλέπουμε ότι οι τρεις ζώνες είναι στις συχνότητες που πρέπει με πολύ μικρότερες απώλειες. Στον Πίνακα 2.2 φαίνεται η επίδραση της κάθε σχισμής στο εύρος και στην κεντρική συχνότητα της κάθε ζώνης. [4]



Σχήμα 2.8: Η επίδραση της κάθε σχισμής στην PIFA με τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές [4]

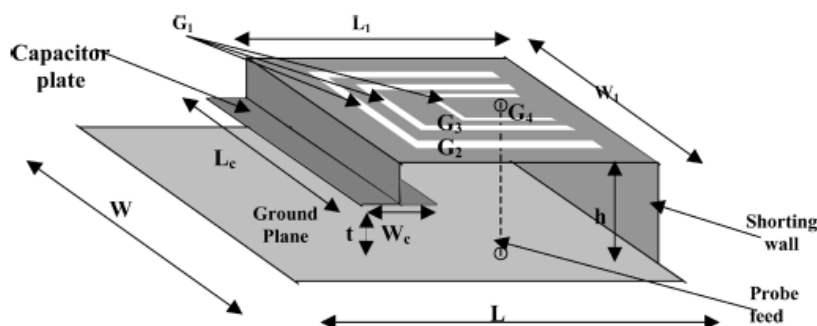
The effect of the slots on the antenna responses

	No Slots	Slot 1	Slot 1 and 2	Slot 1, 2 and 3	Proposed Antenna
Frequency 1	3.1 GHz	3.1 GHz	2.8 GHz	2.8 GHz	2.6 GHz
Bandwidth $f_1$	2.95%	2.95%	--	2%	3.81%
Frequency 2	4.5 GHz	4 GHz	3.6 GHz	3.6 GHz	3.6 GHz
Bandwidth $f_2$	--	--	2.5%	2.95%	2.77%
Frequency 3	5.6 GHz	5.6 GHz	5.6 GHz	5.6 GHz	5.6 GHz
Bandwidth $f_3$	5.89%	5.90%	2.66%	3.77%	10.21%

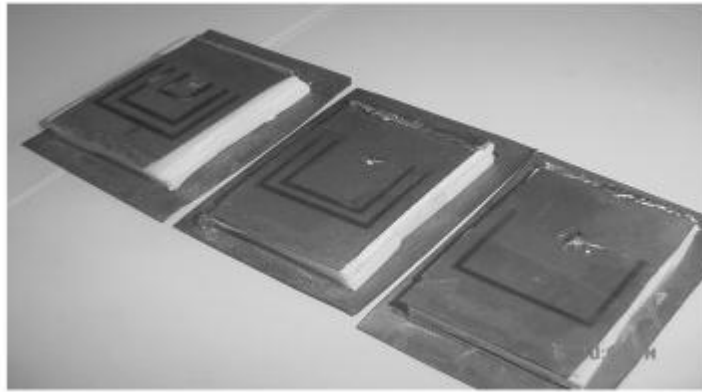
Πίνακας 2.2: Η επίδραση της κάθε σχισμής στην PIFA με τέσσερις σχισμές για WiMAX εφαρμογές [4]

## 2.4.2 Απλά τροφοδοτούμενη PIFA τετραπλής ζώνης για εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών

Οι τέσσερις κεντρικές συχνότητες στις οποίες θέλουμε να λειτουργεί η PIFA είναι στα πλαίσια των εφαρμογών GSM, DCS, Bluetooth και WLAN. Η κεντρική συχνότητα του GSM είναι στα 0.9 GHz, του DCS στα 1.8 GHz, της ασύρματης τεχνολογίας Bluetooth στα 2.4 GHz και η ζώνη των WLAN στα 5.2 GHz. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε μια συμβατική κεραία PIFA με υπόστρωμα αφρού με  $\epsilon_r = 1.07$  ώστε να είναι πιο ελαφριά, να έχει άκαμπτη δομή και να είναι εύκολη στη θωράκιση της. Στη συνέχεια τοποθετούμε στην κεραία PIFA τρεις σχισμές σχήματος U με συγκεκριμένες διαστάσεις η καθεμιά, και σε κατάλληλα σημεία ώστε να πετύχουμε τις τέσσερις ζώνες συχνοτήτων που επιθυμούμε. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί το μέγεθος της συμβατικής PIFA κατά 30%. Επιπλέον μείωση του μεγέθους της συμβατικής PIFA κατά 15% επιτυγχάνεται αν τοποθετηθεί ένα χωρητικό φορτίο στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Το εύρος ζώνης των τεσσάρων ζωνών είναι ικανοποιητικό για τις πιο πάνω εφαρμογές και η κεραία εκπέμπει ισοτροπικά στις τέσσερις ζώνες με κέρδος 9 dBi, το οποίο είναι αποδεκτό για τις περισσότερες κινητές και ασύρματες εφαρμογές. Η δομή της κεραίας PIFA τετραπλής ζώνης με τις 3 σχισμές σχήματος U και το χωρητικό φορτίο φαίνεται στο Σχήμα 2.9 και στο Σχήμα 2.10 έχουμε την κεραία PIFA με μια, δύο και τρεις σχισμές σχήματος U.



Σχήμα 2.9: Η δομή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεραίας PIFA τετραπλής ζώνης με τις 3 σχισμές σχήματος U και το χωρητικό φορτίο [10]



Σχήμα 2.10: Φωτογραφία των PIFA διπλής, τριπλής και τετραπλής ζώνης [10]

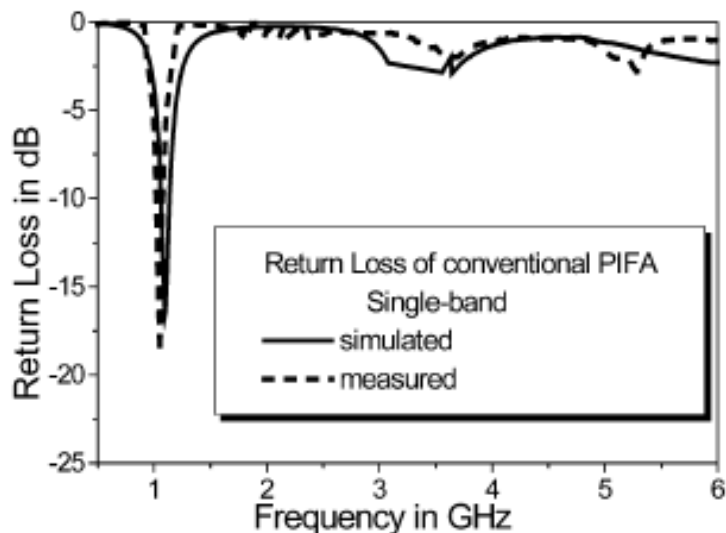
Στο Σχήμα,  $L_1$  και  $W_1$  είναι το μήκος και το πλάτος της συμβατικής κεραίας PIFA,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$  το μήκος των σχισμών της PIFA διπλής, τριπλής και τετραπλής ζώνης αντίστοιχα και  $W_2$ ,  $W_3$ ,  $W_4$  το πλάτος των σχισμών της PIFA διπλής, τριπλής και τετραπλής ζώνης αντίστοιχα. Το κατάλληλο μήκος και πλάτος της κάθε σχισμής ώστε να έχουμε την επιθυμητή συχνότητα μπορεί να βρεθεί από την παρακάτω σχέση:

$$L_i + W_i = \frac{\lambda_i}{4\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.7)$$

όπου:  $\lambda_i$  = μήκος κύματος λειτουργίας

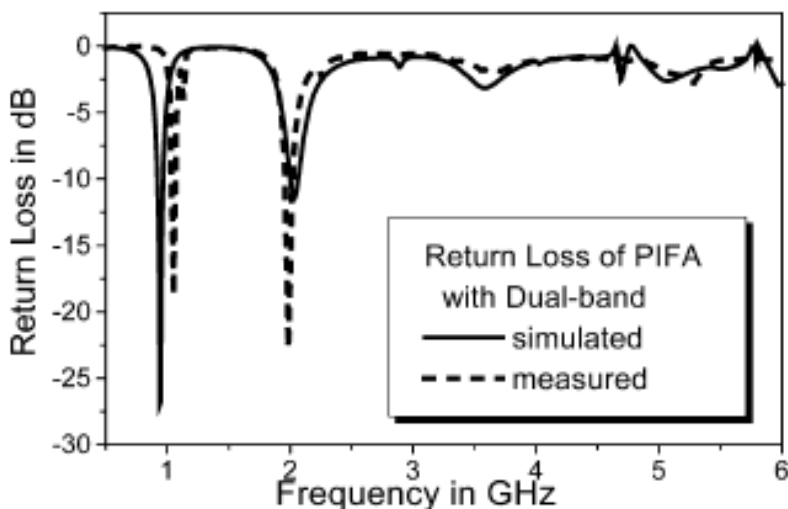
$\epsilon_r$  = διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος

Για να πετύχουμε την πρώτη κεντρική συχνότητα  $f_1 = 0.9$  GHz, έχουμε  $(L_1, W_1) = (61,40$  mm). Το feed wire είναι τοποθετημένο στο κέντρο του top plate και σε απόσταση 22 mm από το shorting plate. Το επίπεδο γείωσης της κεραίας έχει  $L = 100$ mm και  $W = 60$  mm. Το διάγραμμα της συμβατικής PIFA με αυτές τις διαστάσεις και κεντρική συχνότητα  $f_1 = 1$  GHz φαίνεται στο Σχήμα 2.11.



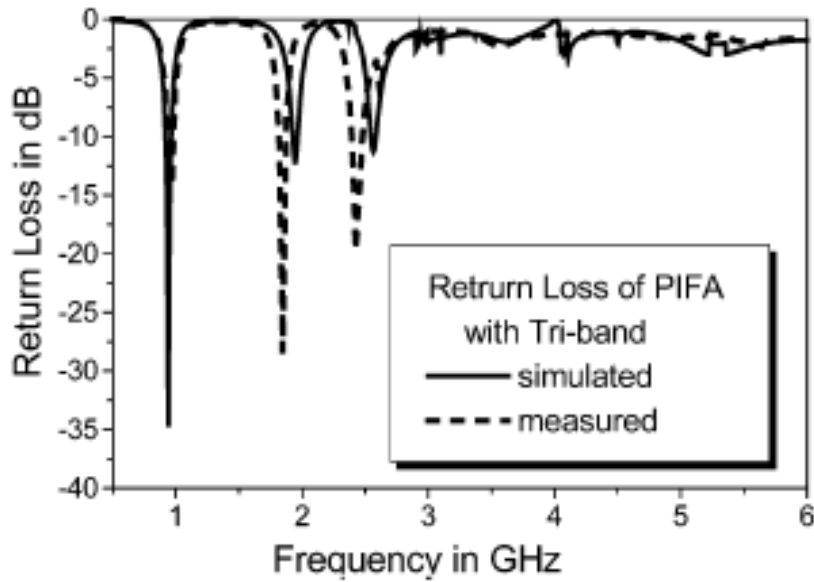
Σχήμα 2.11: Συμβατική PIFA μονής ζώνης και κεντρική συχνότητα  $f_1 = 1$  GHz [10]

Για να πετύχουμε τη δεύτερη κεντρική συχνότητα  $f_2 = 1.8$  GHz, έχουμε  $(L_2, W_2) = (23, 30)$  mm. Η πρώτη σχισμή σχήματος U είναι τοποθετημένη στο κέντρο του top plate και σε απόσταση 18.5 mm από το shorting plate. Το διάγραμμα της PIFA διπλής ζώνης με κεντρικές συχνότητες  $f_1 = 0.95$  GHz και  $f_2 = 2$  GHz φαίνεται στο Σχήμα 2.12.



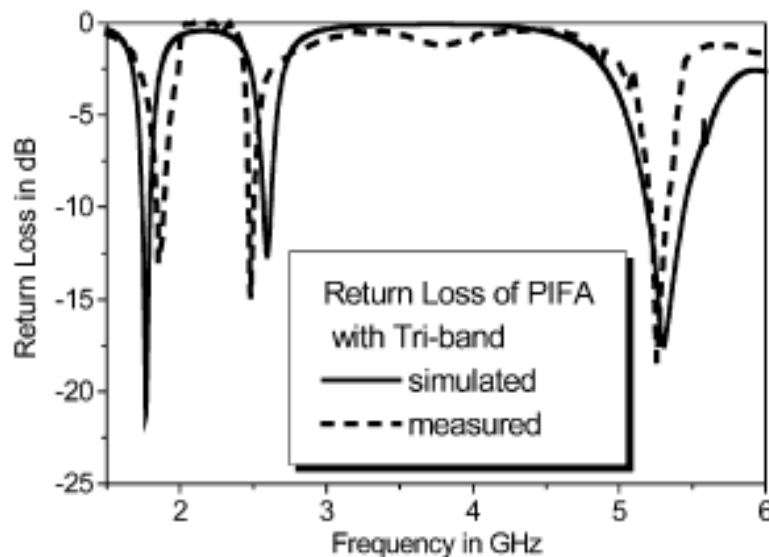
Σχήμα 2.12: PIFA διπλής ζώνης με μια σχισμή σχήματος U και κεντρικές συχνότητες  $f_1 = 0.95$  GHz και  $f_2 = 2$  GHz [10]

Για να πετύχουμε την τρίτη κεντρική συχνότητα  $f_3 = 2.4$  GHz, έχουμε  $(L_3, W_3) = (18, 20)$  mm. Το διάγραμμα της PIFA τριπλής ζώνης με κεντρικές συχνότητες  $f_1 = 0.95$  GHz,  $f_2 = 1.8$  GHz, και  $f_3 = 2.45$  GHz φαίνεται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: PIFA τριπλής ζώνης με δύο σχισμές σχήματος U και κεντρικές συχνότητες  $f_1 = 0.95$  GHz,  $f_2 = 1.8$  GHz και  $f_3 = 2.45$  GHz [10]

Για να πετύχουμε την τέταρτη κεντρική συχνότητα  $f_4 = 5.2$  GHz, έχουμε  $(L_4, W_4) = (9.5, 8)$  mm. Το διάγραμμα της PIFA τετραπλής ζώνης με κεντρικές συχνότητες  $f_1 = 0.95$  GHz,  $f_2 = 1.8$  GHz,  $f_3 = 2.45$  GHz και  $f_4 = 5.2$  GHz φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: PIFA τετραπλής ζώνης με τρεις σχισμές σχήματος U και κεντρικές συχνότητες  $f_1 = 0.95$  GHz,  $f_2 = 1.8$  GHz,  $f_3 = 2.45$  GHz και  $f_4 = 2.45$  GHz [10]

Από το τελευταίο διάγραμμα, όπου έχουμε την τετραπλής ζώνης κεραία, παρατηρούμε ότι οι πειραματικές μετρήσεις και οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις είναι αρκετά κοντά. Από



μετρήσεις προσομοιώσεων έχει αποδειχθεί ότι όταν  $G_1 = G_2 = G_3 = G_4$  όπου  $G$  είναι το πάχος των σχισμών, τότε έχουμε το επιθυμητό εύρος για κάθε ζώνη.

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, με την προσθήκη ενός χωρητικού φορτίου στην κατακόρυφη κατεύθυνση ανάμεσα στο top plate και το ground plane, επιτυγχάνουμε περαιτέρω μείωση του μεγέθους της κεραίας. Αυτή η μείωση εξαρτάται βέβαια από τις διαστάσεις του επιπέδου του χωρητικού φορτίου. Η μείωση όμως του μεγέθους της κεραίας λόγω του χωρητικού φορτίου, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση και του εύρους της κεραίας. Το γεγονός ότι με το χωρητικό φορτίο μειώνεται και το εύρος ζώνης της κεραίας μπορεί να αντισταθμιστεί με τη βελτιστοποίηση του πάχους του shorting plate της PIFA και του πάχους των σχισμών. Στον Πίνακα 2.3 φαίνεται η επίδραση του χωρητικού φορτίου στην μείωση του μεγέθους της κεραίας και στην μείωση του εύρους ζώνης, και για τις τέσσερις ζώνες συχνοτήτων.

	Capacitor size (We x Lc)/t (mm)	Value of load capacitor C in (PF)	Reduction ratio % from original PIFA size	f <sub>1</sub> (GHz) BW <sub>1</sub> %	f <sub>2</sub> (GHz) BW <sub>2</sub> %	f <sub>3</sub> (GHz) BW <sub>3</sub> %	f <sub>4</sub> (GHz) BW <sub>4</sub> %
C1	(30x40)/1	10	27%	0.9 6%	1.85 6%	2.45 4.5%	5.24 5%
C2	(8x40)/2	1.6	26%	0.92 9.7%	1.88 3.2%	2.44 3.2%	5.29 4.3%
C3	(6x40)/2	1.13	22.5%	0.9 7.5%	1.9 5.2%	2.46 3.6%	5.2 4.6%
C4	(4x40)/2	0.75	20%	0.94 9%	1.9 3.1%	2.44 3.66%	5.3 4.15%
C5	(8x40)/6	0.5	18%	0.92 8.6%	1.83 5.4%	2.48 4%	5.22 4.5%
C6	(5x40)/5	0.34	13%	1 8%	1.83 5.4%	2.45 3.2%	5.21 4%
C7	(4x40)/6	0.25	10%	0.87 9%	1.86 3.7%	2.48 3%	5.25 4%

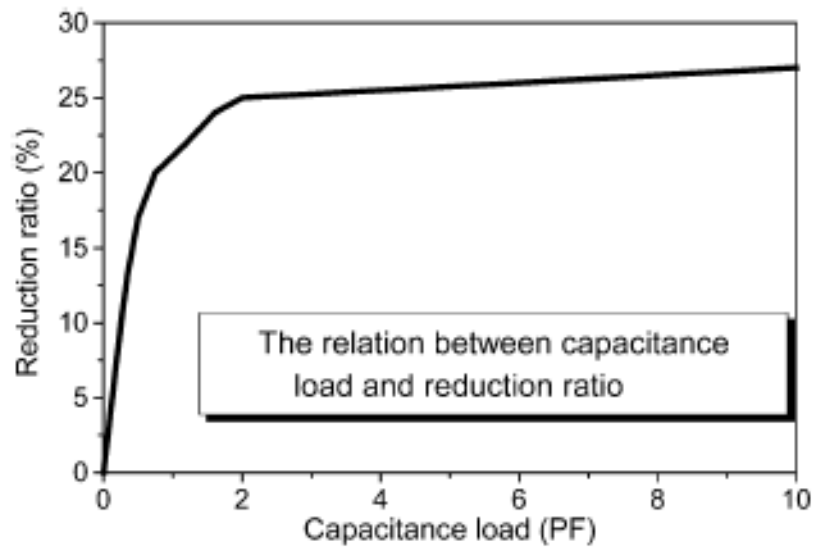
Πίνακας 2.3: Επίδραση του χωρητικού φορτίου στην μείωση του μεγέθους της κεραίας και στην μείωση του εύρους ζώνης για την κεραία PIFA τετραπλής ζώνης [10]

Στο Σχήμα 2.15 φαίνεται η σχέση ανάμεσα στη μείωση του μεγέθους της κεραίας και την τιμή του χωρητικού φορτίου  $C$ , όπου

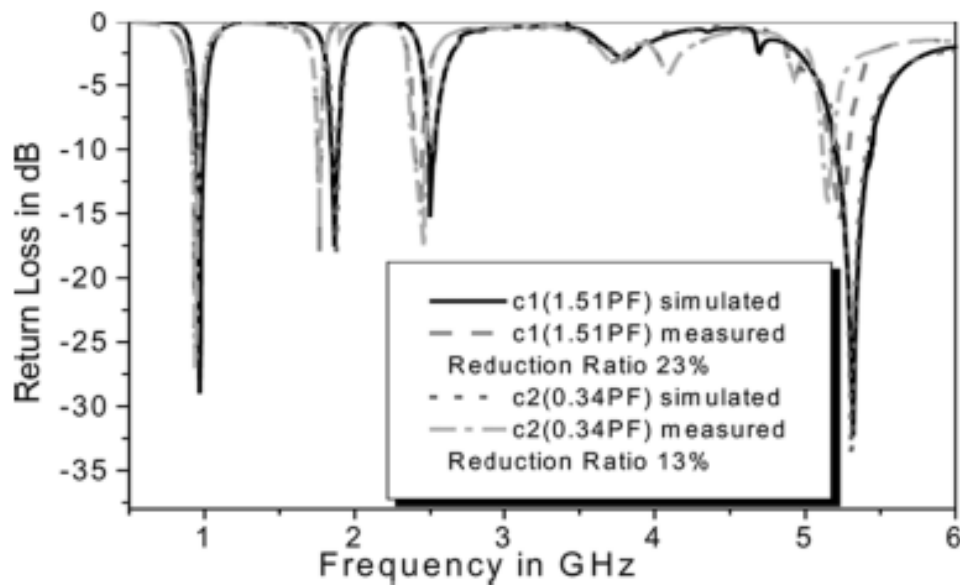
$$C = \varepsilon \left( \frac{L_c W_c}{t} \right) \quad (2.8)$$

Από το σχήμα βλέπουμε ότι μέχρι μια τιμή του χωρητικού φορτίου, η σχέση ανάμεσα σε αυτά τα δύο μεγέθη είναι γραμμική, ενώ πέραν από την τιμή αυτή η σχέση τους σταματά να

είναι γραμμική. Στο Σχήμα 2.16 έχουμε μια σύγκριση ανάμεσα σε πειραματικές μετρήσεις και σε μετρήσεις από προσομοιώσεις για δύο διαφορετικές τιμές του χωρητικού φορτίου ( $C_1 = 1.5 \text{ Pf}$ ,  $C_2 = 0.8 \text{ pF}$ ).



Σχήμα 2.15: Η σχέση ανάμεσα στη μείωση του μεγέθους της κεραίας και την τιμή του χωρητικού φορτίου [10]



Σχήμα 2.16: Σύγκριση ανάμεσα σε πειραματικές μετρήσεις και σε μετρήσεις από προσομοιώσεις για δύο διαφορετικές τιμές του χωρητικού φορτίου,  $C_1 = 1.5 \text{ Pf}$  και  $C_2 = 0.8 \text{ pF}$  [10]

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τέσσερις ζώνες συχνοτήτων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και αυτό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Αυτή η κεραία PIFA τετραπλής ζώνης μπορεί να επεκταθεί και να λειτουργεί σε περισσότερες από τέσσερις ζώνες τοποθετώντας περισσότερες σχισμές σχήματος U, φτάνει να υπάρχει βέβαια αρκετός χώρος στο top plate της PIFA. Οι κεντρικές συχνότητες της κάθε ζώνης μπορούν να βρεθούν από τη Σχέση (2.7), από την οποία θα βρούμε τις κατάλληλες διαστάσεις για την κάθε σχισμή. [10]

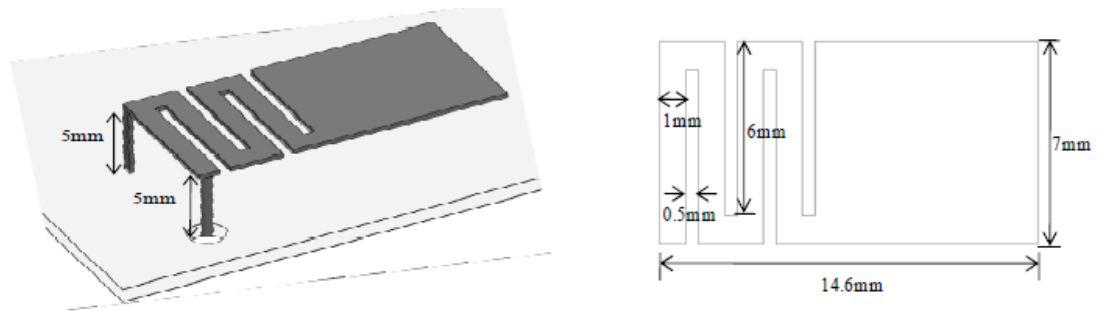
#### 2.4.3 Κεραίες PIFA τύπου μαιάνδρου ενός στοιχείου και δύο στοιχείων τοποθετημένων παράλληλα

Τον τελευταίο καιρό έχει γίνει μεγάλη έρευνα σε συστήματα κεραιών τύπου MIMO (Multiple Input Multiple Output), τα οποία θεωρούνται ότι θα είναι ένα από τα κλειδιά για πιο εύρωστα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Η κύρια πρόκληση για το σχεδιασμό μιας κεραίας MIMO για ασύρματες ακουστικές εφαρμογές είναι ο σχεδιασμός μικρών στοιχείων της κεραίας με μικρό διάστημα μεταξύ των στοιχείων αυτών έτσι ώστε οι κεραίες να ταιριάζουν στον περιορισμένο όγκο των ακουστικών συσκευών. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, απαιτείται μεγάλη απομόνωση μεταξύ των στοιχείων της κεραίας ώστε να επιτευχθεί η αναμενόμενη απόδοση και κέρδη πολυπλεξίας. Επιπλέον, στο σχεδιασμό πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν το γεγονός ότι οι συσκευές πρέπει να είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν σε μια ποικιλία από περιβάλλοντα διάδοσης με διαφορετικές στατιστικές ιδιότητες, κάτι το οποίο θα επηρεάσει την απόδοση τους.

Για το σκοπό αυτό έχουν μελετηθεί οι PIFA τύπου μαιάνδρου (Σχήμα 2.17) έναντι των συμβατικών PIFA, αφού με αυτές επιτυγχάνεται μικρότερο μέγεθος κεραίας και μπορούν να λειτουργήσουν σε πολλαπλές ζώνες. Χρησιμοποιείται μια ποικιλία από διαφορετικές δομές μαιάνδρου στις κεραίες PIFA για διαφορετικές εφαρμογές.

Εκτός από τις PIFA τύπου μαιάνδρου με μια κεραία PIFA, έχει μελετηθεί και η περίπτωση όπου έχουμε 2 κεραίες PIFA τύπου μαιάνδρου τοποθετημένες παράλληλα. Αυτή η περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Μετά από μετρήσεις ακτινοβολίας και απωλειών που έχουν γίνει σε ανηχοικούς θαλάμους, έχει παρατηρηθεί ότι οι πειραματικές μετρήσεις και οι μετρήσεις μετά από προσομοιώσεις δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους στο εύρος συχνοτήτων 2-3 GHz που έγιναν οι μετρήσεις. Στο Σχήμα 2.19 έχουμε την γραφική παράσταση των

απωλειών των πειραματικών μετρήσεων και των προσομοιώσεων, για PIFA τύπου μαιάνδρου με ένα στοιχείο και για PIFA τύπου μαιάνδρου με δύο στοιχεία. [11]



Σχήμα 2.17: Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου [11]

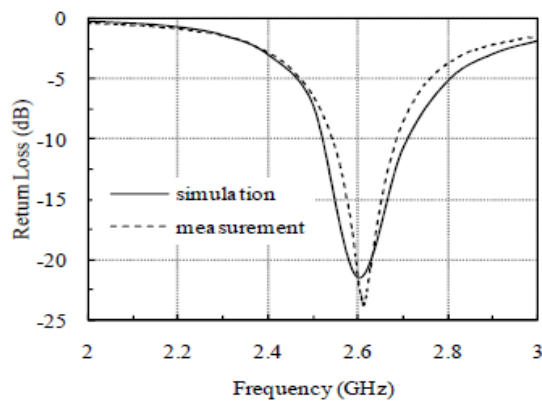


α)

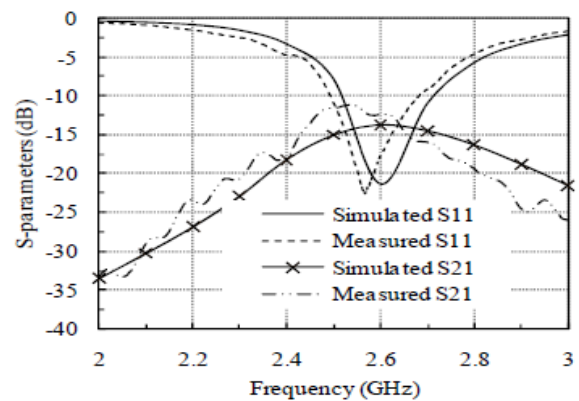


β)

Σχήμα 2.18: α) Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου ενός στοιχείου, β) Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου δύο στοιχείων τοποθετημένων παράλληλα [11]



α)



β)

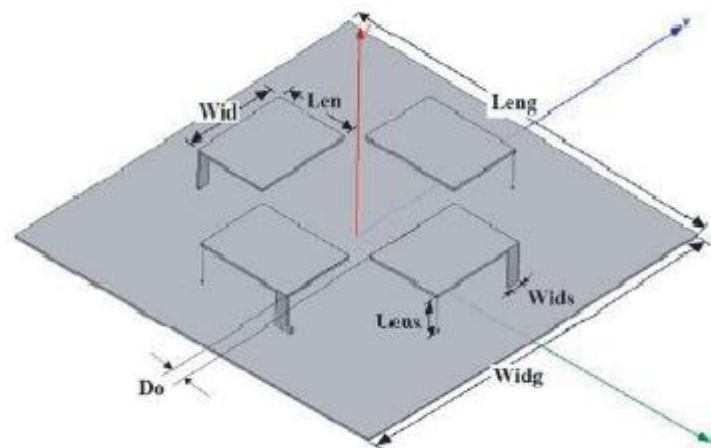
Σχήμα 2.19: Γραφικές παραστάσεις απωλειών των πειραματικών μετρήσεων και των προσομοιώσεων για

α) Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου ενός στοιχείου, β) Κεραία PIFA τύπου μαιάνδρου δύο στοιχείων τοποθετημένων παράλληλα [11]

#### 2.4.4 Μικρού μεγέθους και χαμηλού κόστους SPA-PIFA για κινητές 2.4 GHz ISM εφαρμογές

Η αρχή λειτουργίας των SPAs (Switched-Parasitic Arrays) περιλαμβάνει την τροφοδοσία ενός καθορισμένου ενεργού στοιχείου τη στιγμή που ένας αριθμός από άλλα παθητικά στοιχεία είναι βραχυκυκλωμένα ή ανοιχτοκυκλωμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να ελέγχεται το διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης. Η διάταξη που μελετάται σε αυτό το κεφάλαιο λειτουργεί στα 2.4 GHz και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ISM. Περιλαμβάνει 4 κεραίες PIFA, συμμετρικά τοποθετημένες πάνω σε ένα επίπεδο γείωσης. Μια από τις 4 PIFA τροφοδοτείται μόνιμα ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία είναι βραχυκυκλωμένα (παρασιτικά). Με αυτό τον τρόπο έχουμε 4 μεταβλητά διαγράμματα ακτινοβολίας τα οποία καλύπτουν συμμετρικά το οριζόντιο επίπεδο. Η προσθήκη παρασιτικών στοιχείων αυξάνει την κατευθυντικότητα της διάταξης και έχουμε και συντονισμό όταν η διάταξη λειτουργεί στην επιθυμητή συχνότητα.

Η αρχιτεκτονική της SPA-PIFA για κινητές 2.4 GHz ISM εφαρμογές φαίνεται στο Σχήμα . Οι προδιαγραφές της διάταξης αυτής είναι να επιτευχθούν 4 διαγράμματα ακτινοβολίας που να έχουν τους κύριους τους λοβούς στις  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ , και  $270^\circ$ , και ο κάθε λοβός να έχει ένα εύρος 3 dB  $90^\circ$ . Λόγω της συμμετρίας της διάταξης, αν ελέγχουμε ηλεκτρικά το ενεργό και τα παθητικά στοιχεία, το διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης θα μπορεί να στρέφεται κατά το οριζόντιο επίπεδο. Οι παράμετροι βελτιστοποίησης είναι το μήκος και το πλάτος του top plate της κάθε PIFA, το ύψος και το πλάτος των shorting strips, το μέγεθος του επιπέδου γείωσης, και η ακτίνα του κύκλου της διάταξης (απόσταση μεταξύ των PIFA).



Σχήμα 2.20 : Αρχιτεκτονική της SPA-PIFA [24]

Η δομή της διάταξης παράγεται με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος SuperNEC[13] και βελτιστοποιείται με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων.[24] Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη στη χρήση των γενετικών αλγορίθμων καθώς και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.4.

Element	Range of Variation	Step	Results	Physical Dimensions
Length of top plates (Len)	$0.06\lambda_0 - 0.16\lambda_0$	$0.02\lambda_0$	$0.12\lambda_0$	1.5 cm
Width of top plates (Wid)	$0.06\lambda_0 - 0.16\lambda_0$	$0.02\lambda_0$	$0.16\lambda_0$	2.0 cm
Length of ground plane (Leng)	$(2*Len+Wid+Do) + 2*(0.02\lambda_0 - 0.1\lambda_0)$	$0.02\lambda_0$	$0.64\lambda_0$	8.0 cm
Width of ground plane (Widg)	$(2*Len+Wid+Do) + 2*(0.02\lambda_0 - 0.1\lambda_0)$	$0.02\lambda_0$	$0.64\lambda_0$	8.0 cm
Height of shorting strip (Lens)	$0.02\lambda_0 - 0.08\lambda_0$	$0.02\lambda_0$	$0.06\lambda_0$	0.75 cm
Width of shorting strip (Wids)	$0.02\lambda_0 - (Wid - 1) \cdot 0.02\lambda_0$	$0.02\lambda_0$	$0.02\lambda_0$	0.25 cm
Distance between PIFAs (Do)	$0.02\lambda_0 - 0.06\lambda_0$	$0.02\lambda_0$	$0.02\lambda_0$	0.25 cm
Active PIFA	1-4	1	1	

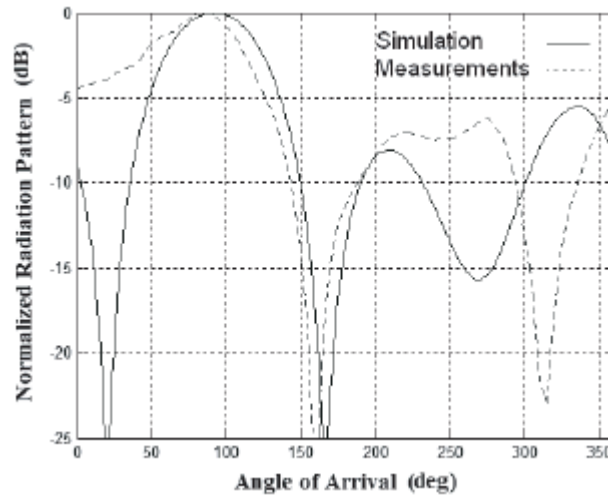
Πίνακας 2.4: Παράμετροι και αποτελέσματα κατά τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση της SPA-PIFA. ( Το μήκος κύματος είναι ίσο με  $\lambda_0 = 12,5$  cm, το οποίο αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας 2.4 GHz ) [24]

Το επιθυμητό εύρος καθορίζεται από τις συχνότητες στις οποίες η τιμή του συντελεστή ανάκλασης στο σημείο τροφοδοσίας είναι μικρότερη από -10 dB, ούτως ώστε η τιμή του VSWR να μην είναι περισσότερο από 2, όπου η χαρακτηριστική αντίσταση θεωρείται ότι είναι ίση με 75 Ω. Στο Σχήμα έχουμε τη γραφική παράσταση του VSWR, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις στο SuperNEC γύρω από την κεντρική συχνότητα των 2.4 GHz.

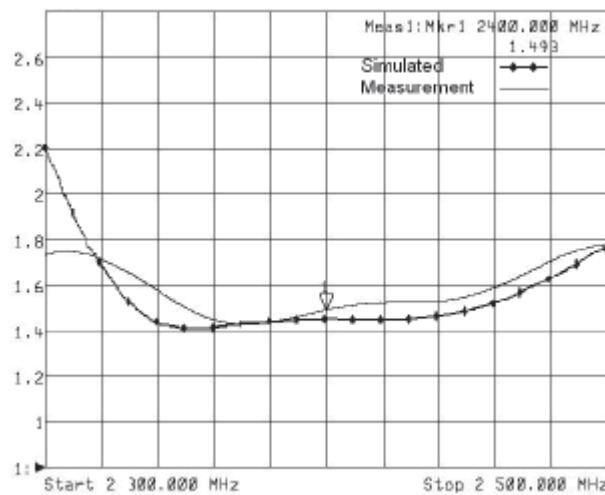
Στο Σχήμα έχουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης στις 90°. τα υπόλοιπα 3 διαγράμματα στις 0°, 180°, και 270° είναι πανομοιότυπα με το πιο πάνω. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα, έχουμε συντονισμό στα 2.4 GHz ( VSWR = 1.4633 ) και εύρος ζώνης λειτουργίας μεγαλύτερο από 200 MHz γύρω από την κεντρική συχνότητα. Επίσης έχουμε ένα κύριο λοβό στις 90° με ένα εύρος 3 dB 82°, κέρδος 3.6 dB και front to back ratio 15.6

dB. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα χαρακτηριστικά ισχύουν σε όλο το εύρος λειτουργίας της κεραίας των 200 MHz.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.4, βλέπουμε ότι οι διαστάσεις της SPA-PIFA είναι αρκετά μικρές. [24]



Σχήμα 2.21: Διάγραμμα ακτινοβολίας της SPA-PIFA στα 2,4 GHz [24]

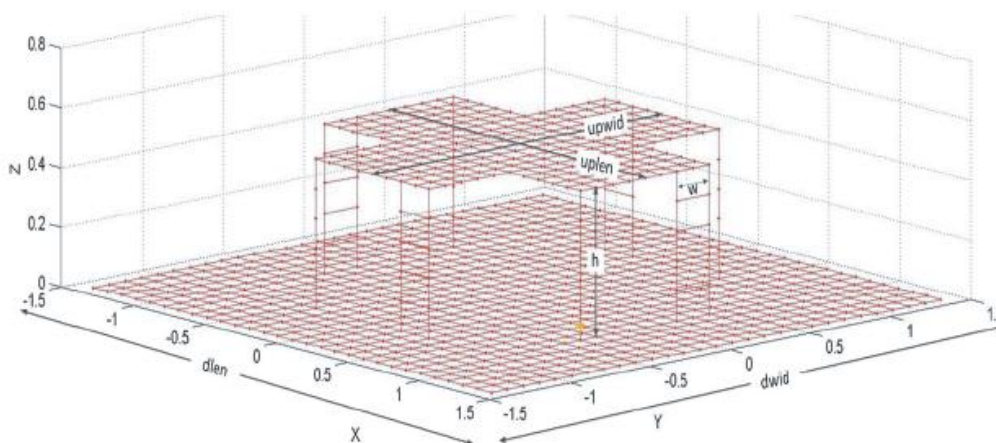


Σχήμα 2.22: VSWR της SPA-PIFA γύρω από την κεντρική συχνότητα των 2.4 GHz [24]

### 2.4.5 Μια συμπαγής ενιαία τροφοδοτούμενη, χαμηλού κόστους ευρυζωνική κεραία μεταγωγής δέσμης για κινητές WiMAX εφαρμογές

Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται σήμερα στα κινητά τερματικά για κινητές WiMAX εφαρμογές πρέπει να έχουν αρκετά μεγάλο εύρος ζώνης, χαμηλή αντίσταση ακτινοβολίας, κατάλληλη γεωμετρία και μικρές διαστάσεις ώστε να ταιριάζουν στις σημερινές τερματικές συσκευές. Η κεραία μεταγωγής δέσμης έχει μικρό μέγεθος (12x12 cm), ικανοποιητική κατευθυντικότητα για εφαρμογές κινητών επικοινωνιών 6,2 dB, με εύρος ζώνης λειτουργίας 120 MHz γύρω από την κεντρική συχνότητα των 3,5 GHz. Η κεραία αυτή συνδυάζει την τεχνολογία SPA (Switched- Parasitic Arrays) με την επίπεδη κεραία αντεστραμμένου F (PIFA). [25],[27]

Η χαμηλού κόστους ευρυζωνική κεραία μεταγωγής δέσμης φαίνεται στο Σχήμα . Η δομή της αποτελείται από ένα top plate, το οποίο αποτελείται από 4 κεραίες PIFA συνδεδεμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα σταυρό, και είναι τοποθετημένες πάνω σε ένα πεπερασμένου μεγέθους αγωγίμο επίπεδο το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με 4 καλώδια από τα οποία μόνο ένα είναι ενεργό (feed wires), και 4 shorting strips, σε μια συμμετρική διαμόρφωση ως προς το οριζόντιο επίπεδο (Σχήμα 4.23). Το διάγραμμα ακτινοβολίας και η απόδοση της κεραίας μπορούν να ρυθμιστούν μεταβάλλοντας τις διαστάσεις της διάταξης. Επίσης, λόγω της συμμετρίας της διάταξης, ελέγχοντας ηλεκτρικά το ενεργό feeding wire και τα παθητικά στοιχεία (shorting strips), το διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης μπορεί να στραφεί ως προς το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 4.23: Δομή και διαστάσεις της cross PIFA [25]



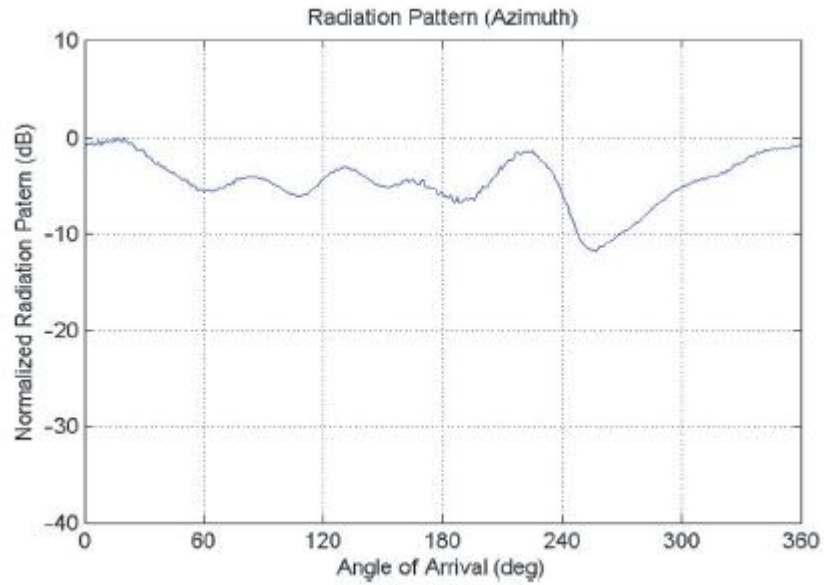
Μεταβάλλοντας το μήκος  $l_a$  του ενεργού στοιχείου (feed wire), το μήκος των παρασιτικών στοιχείων  $l_b$ , τις διαστάσεις του top plate, και τις διαστάσεις του επιπέδου γείωσης, μπορούμε να έχουμε μια διάταξη με επαρκές εύρος ζώνης λειτουργίας και το επιθυμητό οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας στη συχνότητα λειτουργίας της διάταξης. Η δομή της κεραίας αυτής παράγεται με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος SuperNEC[13] και βελτιστοποιείται με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων. Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη στη χρήση των γενετικών αλγορίθμων καθώς και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

Element	Range of Variation	Step	Results	Physical Dimentions
Length of top plate (uplen)	$0.15\lambda_o - 1.5\lambda_o$	$0.05\lambda_o$	$0.9\lambda_o$	7.7 cm
Width of top plate (upwid)	$0.15\lambda_o - 1.5\lambda_o$	$0.05\lambda_o$	$0.9\lambda_o$	7.7 cm
Length of ground plate (dlen)	$UpLen + 2 * (0.05\lambda_o - 0.5\lambda_o)$	$0.05\lambda_o$	$UpLen + 0.25\lambda_o$	12 cm
Width of ground plate (dwid)	$UpWid + 2 * (0.05\lambda_o - 0.5\lambda_o)$	$0.05\lambda_o$	$UpWid + 0.25\lambda_o$	12 cm
Height of wires/ shorting strips (h)	$0.05\lambda_o - 0.2\lambda_o$	$0.05\lambda_o$	$0.05\lambda_o$	0.42 cm
Width of shorting strips (w)	$0.05\lambda_o - 0.4\lambda_o$	$0.05\lambda_o$	$0.25\lambda_o$	2.14 cm

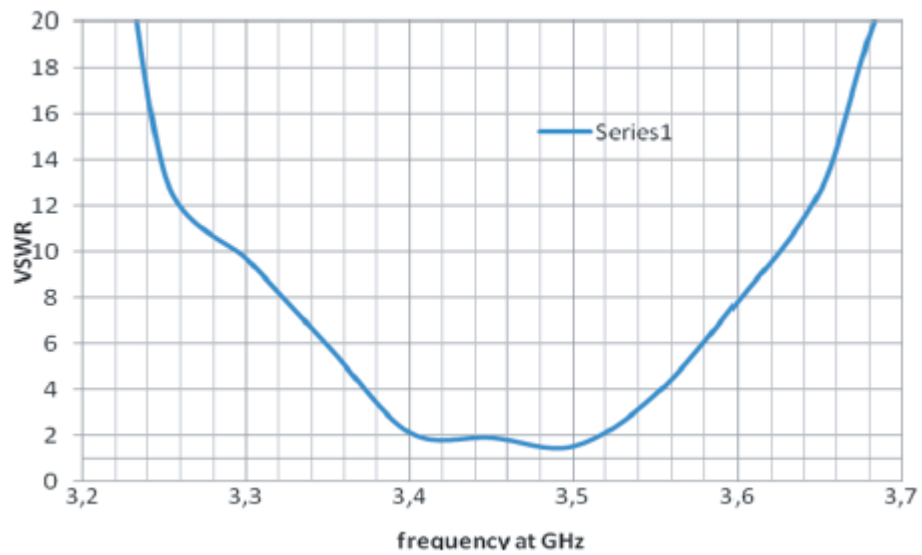
Πίνακας 2.5: Παράμετροι και αποτελέσματα κατά τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση της cross-PIFA. ( Το μήκος κύματος είναι ίσο με  $\lambda_o = 0.0857$  m, το οποίο αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας 3.5 GHz ) [25]

Το επιθυμητό εύρος καθορίζεται από τις συχνότητες στις οποίες η τιμή του συντελεστή ανάκλασης στο σημείο τροφοδοσίας είναι μικρότερη από -10 dB, ούτως ώστε η τιμή του VSWR να μην είναι περισσότερο από 2, όπου η χαρακτηριστική αντίσταση θεωρείται ότι είναι ίση με 50 Ω. Στο Σχήμα έχουμε τη γραφική παράσταση του VSWR, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις στο SuperNEC γύρω από την κεντρική συχνότητα των 3.5 GHz.

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα , έχουμε συντονισμό στα 3.4 GHz ( VSWR = 1.51 ) και εύρος ζώνης λειτουργίας ίσο με 120 MHz, το οποίο είναι επαρκές για εφαρμογές WiMAX. Στο Σχήμα έχουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης. Όπως βλέπουμε στο σχήμα, έχουμε ένα κύριο λοβό στις  $0^\circ$  με ένα εύρος 3 dB  $60^\circ$ , κέρδος 6.2 dB και front to back ratio 6 dB. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα χαρακτηριστικά ισχύουν σε όλο το εύρος λειτουργίας της κεραίας των 120 MHz.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα ακτινοβολίας της cross-PIFA στην κεντρική συχνότητα των 3.5 GHz [25]



Σχήμα 4.25: VSWR της cross-PIFA γύρω από την κεντρική συχνότητα των 3.5 GHz [25]

## **Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση στοιχειοκεραίας PIFA με την βοήθεια του προγράμματος SuperNec**

### **3.1 Εισαγωγή**

Το SuperNEC είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κεραιών και επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Το πρόγραμμα επιτρέπει την προσομοίωση και την εκτίμηση της ηλεκτρομαγνητικής επίδοσης απλών κεραιών, καθώς και κεραιών που βρίσκονται τοποθετημένες πάνω σε πολύπλοκες κατασκευές, σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Το σημείο εκκίνησης, για το πρόγραμμα προσομοίωσης SuperNEC, αποτέλεσε ο πολύ γνωστός αριθμητικός ηλεκτρομαγνητικός κώδικας (Numerical Electromagnetic Code) NEC 2, ο οποίος αναπτύχθηκε από το αμερικάνικο ναυτικό σε συνεργασία με τα εργαστήρια Lawrence Livermore, το 1982.

Το 1987 ο Derek Nitch δημιούργησε μια παράλληλη έκδοση του NEC2, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα FORTRAN. Ο κώδικας που προέκυψε με τον τρόπο αυτό ήταν πολύ δύσκολο να διαμορφωθεί και ο Derek Nitch ξανασχεδίασε το πρόγραμμα ξεκινώντας από την θεμελιώδη θεωρία χρησιμοποιώντας αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Το νέο πρόγραμμα, το οποίο ήταν γραμμένο σε C++, ήταν πιο γρήγορο, χρησιμοποιούσε πιο δυναμικές δομές δεδομένων και το σημαντικότερο, ήταν πολύ πιο εύκολο να επεκταθεί και να διαφοροποιηθεί. Το νέο πρόγραμμα ήταν διαμορφωμένο έτσι ώστε να εκτελείται παράλληλα σε διαφορετικούς υπολογιστές που είναι συνδεδεμένοι σε τοπικό δίκτυο. Μια μέθοδος λύσης για υψίσυχνα προβλήματα, η γεωμετρική μέθοδος της περίθλασης (Uniform geometrical Theory of Diffraction, UTD), προστέθηκε στην ήδη υπάρχουσα μέθοδο των ροπών (Method of Moments, MOM) που χρησιμοποιούσαν οι πρώτες εκδόσεις του Super NEC, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα υβριδικό μοντέλο. Επίσης, προστέθηκαν μερικοί νέοι αλγόριθμοι για γρήγορες λύσεις των ολοκληρωτικών εξισώσεων.

Μια καινοτομία στο SuperNEC είναι και το γραφικό περιβάλλον που βασίζεται στο Matlab, τόσο για τα αρχεία εισόδου όσο και για τα αρχεία εξόδου. Το γεγονός αυτό έκανε το πρόγραμμα πολύ πιο εύχρηστο σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση του NEC2.

Το NEC2 εκτελούσε τις προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών (Method of Moments, MOM). Με τη μέθοδο αυτή γίνεται διακριτοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιώντας μικρά αγώγιμα τμήματα (wire segments), συχνά στην μορφή δικτυώματος, όταν μοντελοποιούνται επιφάνειες. Προκειμένου η παραπάνω μέθοδος να παρέχει σωστά αποτελέσματα πρέπει τα μικρά αγώγιμα τμήματα να έχουν μέγεθος περίπου ίσο με το  $1/10$  του μήκους κύματος. Ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος στον υπολογιστή είναι ανάλογος του  $N^3$ , ενώ η μνήμη που απαιτείται είναι ανάλογη του  $N^2$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός των αγνώστων. [12],[13]

Η γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (UTD) είναι μια ηλεκτρομαγνητική μέθοδος που αφορά υψηλές συχνότητες. Η μέθοδος UTD συμπλήρωσε την μέθοδο των ροπών, έτσι ώστε τα υψηλής συχνότητας προβλήματα να μπορούν να επιλύονται με τη μέθοδο UTD, ενώ τα χαμηλότερης συχνότητας προβλήματα επιλύονται με την μέθοδο των ροπών.

Στην προσπάθεια να γεφυρωθεί το χάσμα ανάμεσα στο ηλεκτρικό μέγεθος των προβλημάτων που επιλύονται μόνο με την μέθοδο των ροπών και σε αυτά που επιλύονται με τη μέθοδο UTD, δημιουργήθηκε ένα νέο υβριδικό μοντέλο που αποτελείται και από τις δύο αυτές μεθόδους. Ο νέος αυτός υβριδικός κώδικας μπορεί να αναλύσει προβλήματα, στα οποία μικρά αγώγιμα τμήματα, διηλεκτρικές πλάκες, κύλινδροι, σφαίρες κτλ. μπορούν να συνυπάρχουν στο ίδιο πρόβλημα. Συνδυάζοντας τις δύο μεθόδους, έχει αυξηθεί το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο μπορούν να επιλυθούν διάφορα προβλήματα. [12],[13]

Το πρόγραμμα έχει μετατραπεί έτσι ώστε να μπορεί να εκτελείται παράλληλα σε διαφορετικούς υπολογιστές, συνδεδεμένους σε τοπικό δίκτυο με την βοήθεια του πακέτου PVM (Parallel Virtual Machine). Το όφελος από αυτή την προσαρμογή του προγράμματος είναι πολύ σημαντικό, γιατί διαφορετικοί υπολογιστές μπορούν να συνδεθούν για να λύσουν μεγάλα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα.

Το SNEC λοιπόν αποτελεί έναν υβριδικό συνδυασμό της MoM και της ομοιόμορφης θεωρίας περίθλασης (UTD). Οι βασικές δομικές μονάδες της MoM στο SNEC είναι τα στοιχειώδη τμήματα αγωγών (wire segments). Σε αυτά στηρίζεται η κατασκευή κεραιών σύρματος (wire antennas) διαφόρων τύπων και μορφών, καθώς και η δημιουργία αγωγικών επιφανειών. Η διέγερση των κεραιών στο SNEC πραγματοποιείται με την εφαρμογή κατάλληλης πηγής τάσης ή πηγής ρεύματος. Η μοντελοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής απόκρισης μιας δομής στο SNEC απαιτεί την επίλυση της εξίσωσης του Pocklington. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τις συναρτήσεις δέλτα του Dirac σαν συναρτήσεις βάρους και

διαφορετικές όσον αφορά στην ανάπτυξη της κατανομής του ρεύματος. Το ρεύμα σε κάθε στοιχειώδες αγωγίμο τμήμα στο SNEC δίνεται στην ακόλουθη μορφή:

$$I_i(z) = \alpha_i + \beta_i \sin(z - z_i) + \gamma_i \cos(z - z_i) \quad (3.1)$$

Οι τρεις συντελεστές  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  και  $\gamma_i$  σχετίζονται με την συνέχεια του ρεύματος από το ένα στοιχειώδες αγωγίμο τμήμα στο επόμενο, καθώς και με τις συνθήκες στα άκρα του αγωγού. Η εξίσωση (3.1) χρησιμοποιεί τρεις αγνώστους γεγονός το οποίο δείχνει ότι χρησιμοποιώντας πιο ακριβείς συναρτήσεις βάσης, η επίλυση γίνεται πιο πολύπλοκη αλλά με πιο γρήγορη σύγκλιση. Αφού υπολογιστεί η ρευματική κατανομή, στη συνέχεια υπολογίζεται το πεδίο που ακτινοβολεί η κεραία στο χώρο. Η προσέγγιση αυτή του μακρινού πεδίου είναι έγκυρη όταν το σημείο παρατήρησης του πεδίου βρίσκεται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από τη ρευματική κατανομή συγκρινόμενη με το μήκος κύματος και τις διαστάσεις της ρευματικής κατανομής. Όσο για τις δομικές μονάδες της UTD που είναι διαθέσιμες στον κώδικα, αυτές περιλαμβάνουν πολυεπίπεδες διηλεκτρικές πλάκες και ελλειπτικούς κυλίνδρους. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης είναι αξιόπιστα όταν οι διαστάσεις των παραπάνω δομών, οι οποίες μπορεί να παριστάνουν διηλεκτρικούς σκεδαστές (π.χ., τοίχους), είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος. Γενικά στο SNEC χρησιμοποιείται η MoM για την εξαγωγή των βασικών χαρακτηριστικών των κεραιών (ρευματική κατανομή, ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, διάγραμμα ακτινοβολίας, αντίσταση εισόδου). Σε περιπτώσεις όμως που στην υπό εξέταση δομή συμμετέχουν και στοιχειώδεις μονάδες της UTD, επιστρατεύεται ο υβριδικός χαρακτήρας του SNEC για την ολοκληρωμένη ανάλυση που απαιτείται [12],[13]. Για την ανάλυση των κεραιοσυστημάτων της πτυχιακής αυτής εργασίας, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μόνο το μοντέλο της MoM που διαθέτει, καθώς αυτά υλοποιούνται από γραμμικά τμήματα αγωγού (wire segments).

## 3.2 Βελτιστοποίηση μιας Επίπεδης Κεραίας ανεστραμμένου F (Planar Inverted F Antenna, PIFA)

### 3.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν τη δυνατότητα να επιλύσουν σύνθετα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα και αποτελούν δυναμικές, στοχαστικές διαδικασίες αναζήτησης βασισμένες στη φυσική επιλογή και εξέλιξη, θεωρία που ανέπτυξαν οι Δαρβίνος και Μέντελ. Στους γενετικούς αλγόριθμους ένα σύνολο πληθυσμού από πιθανές λύσεις οδηγείται σταδιακά στη βέλτιστη λύση. Μέσω μιας κατάλληλης διαδικασίας επιλογής καθορίζονται τα χαρακτηριστικά των γενεών που πρόκειται να διατηρηθούν, ώστε σταδιακά με συνδυασμό και μετάλλαξη αυτών να οδηγηθούμε στην καλύτερη δυνατή λύση. Παράλληλα η αναζήτηση πραγματοποιείται σε όλο το εύρος του χώρου λύσεων του τρέχοντος πληθυσμού.

Κάθε γενετικός αλγόριθμος αποτελείται από έναν πληθυσμό ατόμων, το κάθε ένα από τα οποία έχει μία γνωστή τιμή “καταλληλότητας”, για το εκάστοτε πρόβλημα. Ο πληθυσμός εξελίσσεται διαμέσου επόμενων γενεών, τα άτομα δηλαδή του τρέχοντος πληθυσμού είναι επιλεγμένα από τα άτομα της προηγούμενης γενιάς. Το γονίδιο, όπως συμβαίνει και στη φύση, αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο στη μέθοδο βελτιστοποίησης με τη χρήση γενετικών αλγόριθμων. Τα γονίδια αποτελούν την κωδικοποιημένη παράσταση των παραμέτρων βελτιστοποίησης ενώ τα χρωμοσώματα περιέχουν το σύνολο των γονιδίων. Τα χρωμοσώματα μπορούν να κωδικοποιηθούν ως ακολουθίες δυαδικών ή πραγματικών αριθμών ή συνδυασμό και των δύο. Στη βελτιστοποίηση με τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων ο πληθυσμός είναι ένα σύνολο από πιθανές λύσεις σε μορφή χρωμοσωμάτων. Χρησιμοποιείται από τον γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Οι επαναλήψεις κατά τη βελτιστοποίηση ονομάζονται γενιές. Η αναπαραγωγή η οποία αποτελείται από την επιλογή (selection), τον επιχιασμό και τη μετάλλαξη (crossover, mutation) συνεχίζεται, έως ότου να δημιουργηθεί μία νέα γενιά η οποία θα αντικαταστήσει την προηγούμενη. Τα χρωμοσώματα της εκάστοτε γενιάς με τα καλύτερα χαρακτηριστικά, θα παράγουν περισσότερα αντίγραφα τους στην επόμενη γενιά με αποτέλεσμα μία γενική μετατόπιση του πληθυσμού προς την βέλτιστη λύση. Η διαδικασία ολοκληρώνεται είτε θέτοντας ένα όριο του καλύτερου ατόμου που παράγεται από τη διαδικασία ή καθορίζοντας ένα μέγιστο αριθμό γενεών.

Σε περίπτωση που τους χρησιμοποιούμε για βελτιστοποίηση, κάθε άτομο αποτελεί ένα σημείο του πεδίου αναζήτησης και η καταλληλότητα του καθορίζεται από την τιμή της συνάρτησης κόστους, που είναι η αντικειμενική συνάρτηση η οποία καθορίζει τον στόχο βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση αυτή αναθέτει μία τιμή σε κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού. Η τιμή αυτή αποτελεί κριτήριο για το πόσο ικανοποιητική είναι η συγκεκριμένη λύση που αντιπροσωπεύει το κάθε χρωμόσωμα. Αν κάποιο σημείο (άτομο) είναι κατάλληλο, ο γενετικός αλγόριθμος τερματίζει και το σημείο αυτό αποτελεί την επιθυμητή λύση. Σε αντίθετη περίπτωση παράγεται η επόμενη γενιά.

Έπειτα από την διαδικασία αρχικοποίησης του πληθυσμού, όπου δημιουργείται η πρώτη γενιά, επιλέγονται με πιθανοτικά κριτήρια και σταθμισμένα από την συνάρτηση κόστους, ζευγάρια χρωμοσωμάτων από τον πληθυσμό τα οποία ονομάζονται γονείς. Για παράδειγμα ένα τυπικό σενάριο επιλογής γονέων αποτελεί η σταθμισμένη ρουλέτα, κατά την οποία σε κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού αντιστοιχίζεται ένα τμήμα της ρουλέτας. Το μέγεθος του τμήματος αυτού είναι αντίστοιχο της τιμής της σχετικής συνάρτησης κόστους του χρωμοσώματος. Η ρουλέτα περιστρέφεται κάθε φορά που αναζητούμε ένα γονέα. Χρωμοσώματα τα οποία κατέχουν μεγάλο τμήμα της ρουλέτας, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν και να περάσουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά. Οι απόγονοι δημιουργούνται από την εφαρμογή στοχαστικών τελεστών στο επιλεγμένο ζεύγος γονέων, όπως ο επιχιασμός και η μετάλλαξη. Ο επιχιασμός (crossover) αφορά την τυχαία επιλογή του σημείου του χρωμοσώματος όπου θα γίνει η αντιστοίχιση και η συνένωση του γενετικού υλικού των δύο γονέων. Αποτέλεσμα του επιχιασμού είναι τα δύο παιδιά να φέρουν χαρακτηριστικά και των δύο γονέων. Ο επιχιασμός πραγματοποιείται με πιθανότητα  $p_{cross}$  (συνήθως 0,6-0,8). Υπάρχουν και άλλοι τελεστές επανασύνδεσης ο επιχιασμός όμως είναι ο σημαντικότερος. Η μετάλλαξη (mutation) αλλάζει την τιμή ενός τυχαία επιλεγμένου γονιδίου του χρωμοσώματος και αποτελεί ένα μηχανισμό ο οποίος διασφαλίζει ότι η επιλογή δεν συγκλίνει πρώιμα σε ένα τοπικό μέγιστο. Επίσης διευρύνει την περιοχή αναζήτησης, καθώς εισάγει γενετικό υλικό το οποίο δεν υπάρχει στην προηγούμενη γενιά, ούτε είναι δυνατόν να προκύψει από τον τελεστή επιχιασμού. Η μετάλλαξη είναι περιορισμένης σημασίας σε σχέση με τον επιχιασμό και συνήθως πραγματοποιείται με πιθανότητα  $p_{mutation}$  (συνήθως 0,05).

Η αναπαραγωγή ακολουθεί τους κανόνες της φύσης. Νέα διανύσματα δημιουργούνται από τα καταλληλότερα διανύσματα της τρέχουσας γενιάς, χρησιμοποιώντας είτε μερική αντιγραφή του διανύσματος πατέρα (μετάλλαξη-mutation), είτε δύο κατάλληλα διανύσματα που έχουν επιλεγθεί ως γονείς και το καινούργιο διάνυσμα δημιουργείται από τον συνδυασμό τους (επιχιασμός-crossover).

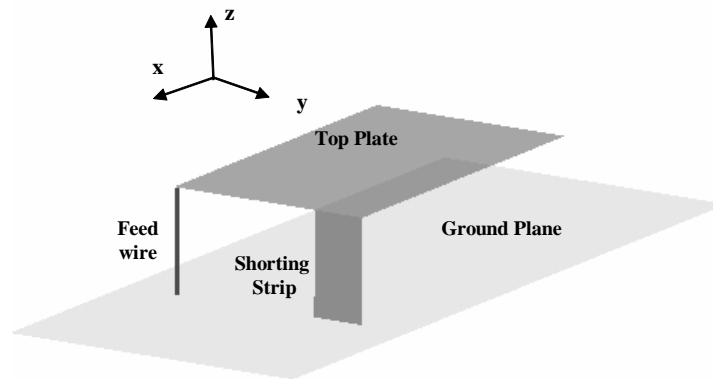
Η βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικών αλγόριθμων αποτελεί μια ισχυρή στοχαστική μέθοδο αναζήτησης, η οποία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν ο στόχος είναι η εύρεση ενός ολικού μέγιστου, σε ένα πολυδιάστατο πεδίο τιμών. [14]

### 3.2.2 Βελτιστοποίηση κεραίας PIFA στο πρόγραμμα Superneec με την χρήση γενετικών αλγορίθμων

Με την ολοένα αυξανόμενη απαίτηση σε κινητές επικοινωνίες ευρείας ζώνης, αποδίδεται περισσότερη προσοχή στο σχεδιασμό των νέων τερματικών. Τα παρόντα κινητά τερματικά αναμένονται να παρουσιάζουν αυξημένο λειτουργικό εύρος ζώνης και να διατηρούν συγχρόνως ένα χαμηλό γεωμετρικό προφίλ. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών ένα νέο κεραιοσύστημα για τερματικά, η επίπεδη κεραία ανεστραμμένου F ( Planar Inverted F Antenna, PIFA) έχει εμφανιστεί σαν ο κατάλληλος αντικαταστάτης των μονοπολικών και ελικοειδών κεραιών που κατασκευάστηκαν τα προηγούμενα χρόνια από τη βιομηχανία.

Η γεωμετρία της PIFA απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Η διάταξη αποτελείται από μια αγωγίμη ορθογώνια πλάκα (top plate) τοποθετημένη πάνω από επίπεδη βάση περιορισμένου μεγέθους (ground plane). Μεταξύ τους υπάρχει ένα τροφοδοτούμενο σύρμα (feed wire) και μια ορθογώνια κατασκευή (shorting strip) που βραχυκυκλώνει το κάτω με το πάνω μέρος της όλης διάταξης. Η επίδοση της κεραίας ρυθμίζεται αλλάζοντας τις διαστάσεις κάθε στοιχείου [15], το μέγεθος και το περίγραμμα της άνω αγωγίμης πλάκας [16-20], καθώς και το μέγεθος της επίπεδης βάσης. Αλλάζοντας τις διαστάσεις της πάνω πλάκας, το ύψος πάνω από την επίπεδη βάση και το μέγεθος της ίδιας της βάσης, παρατηρείται μια μεταβολή στη συχνότητα συντονισμού και στο εύρος ζώνης. [15]

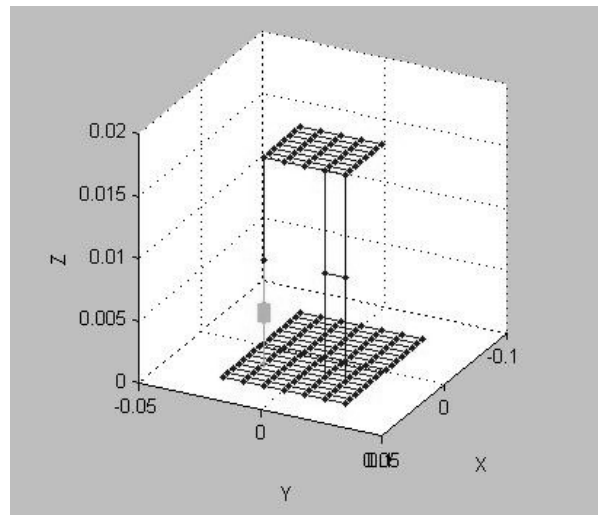




Σχήμα 3.1: Δομή της PIFA

Σε αυτό το σημείο λαμβάνει χώρα μια βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της PIFA αναφορικά με τις διαστάσεις της άνω αγωγίμης πλάκας, της αγωγίμης επίπεδης βάσης και της επιφάνειας βραχυκύκλωσης με τη χρησιμοποίηση της τεχνικής των γενετικών αλγορίθμων, λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση για ένα εκτεταμένο λειτουργικό εύρος ζώνης. Οι διαστάσεις της προτεινόμενης διάταξης εξαρτώνται μόνο από το μήκος κύματος στη συχνότητα υπό εξέταση και ως εκ τούτου οι ηλεκτρικές διαστάσεις διατηρούνται σταθερές. Η κεραία που αναπτύσσεται σε αυτήν την παράγραφο περιγράφεται αναλυτικά στο [21].

Η προσομοίωση και ο σχεδιασμός της προαναφερθείσας κεραίας γίνονται με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου SNEC, όπου τα συστατικά στοιχεία της MoM που είναι διαθέσιμα στον κώδικα είναι τα τμήματα αγωγού (wire segments). Ως εκ τούτου, η PIFA αποτελείται από τρία πλέγματα αγωγών σύρματος (που αναπαριστούν την άνω πλάκα, την επίπεδη βάση και την επιφάνεια βραχυκύκλωσης αντίστοιχα) και έναν τροφοδοτούμενο αγωγό σύρματος, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.2. Η τελική δομή στο SNEC υλοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές εισόδου που καθορίζει ο χρήστης για τις διαστάσεις της διάταξης να δίνονται συναρτήσει των αριθμών των τμημάτων αγωγού. Δεδομένου λοιπόν του ότι το μήκος τμήματος (segment length, *seglen*) είναι κλάσμα του μήκους κύματος  $\lambda$ , το ηλεκτρικό μέγεθος της PIFA είναι σταθερό. Το σκεπτικό αυτό προέκυψε από την αναγκαιότητα σχεδίασης της PIFA σύμφωνα με τους περιορισμούς που θέτει το SNEC.



Σχήμα 3.2: Υλοποίηση της PIFA στο SNEC

Για να βρεθεί η βέλτιστη διάταξη σχετικά με το λειτουργικό εύρος ζώνης, χρησιμοποιείται η τεχνική των Γενετικών Αλγορίθμων. Στην εν λόγω διαδικασία βελτιστοποίησης, ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι ενσωματωμένος στο SNEC [12, 13]. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι που συμμετέχουν στο γενετικό αλγόριθμο και τα διαστήματα μεταβολής τους.

Παράμετρος	Διάστημα Μεταβολής	Αποτέλεσμα Γενετικού Αλγορίθμου
Μήκος άνω πλάκας	$2seglen - 10seglen$	$7seglen$
Πλάτος άνω πλάκας	$3seglen - 10seglen$	$4seglen$
Μήκος βάσης	$2seglen - 20seglen$	$15seglen$
Πλάτος βάσης	$3seglen - 20seglen$	$6seglen$
Ύψος αγωγού	$1seglen - 3seglen$	$2seglen$
Πλάτος επιφάνειας βραχυκύκλωσης	$1seglen - 9seglen$	$1seglen$

Πίνακας 3.1: Παράμετροι και αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου για την PIFA

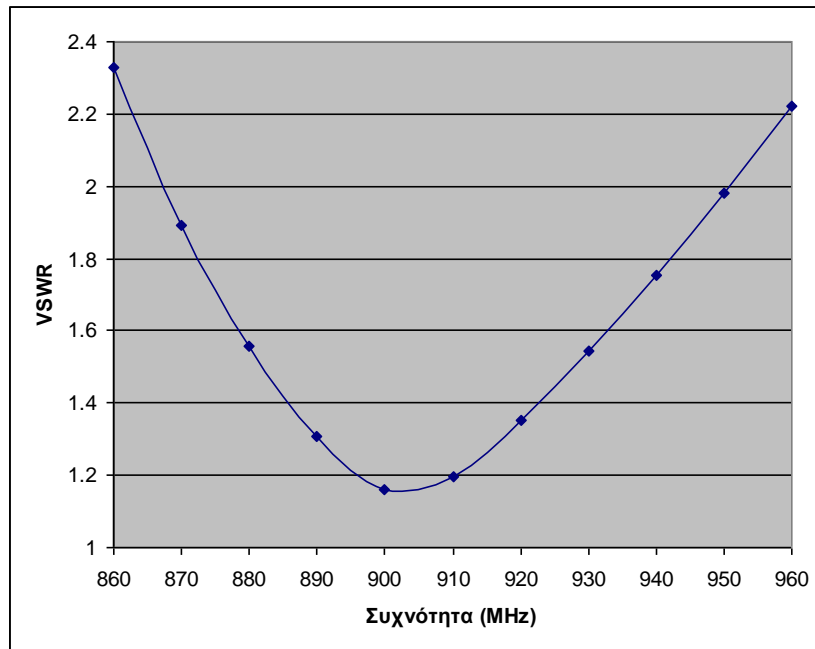
Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται με σκοπό τη βελτιστοποίηση της αντίστασης εισόδου είναι :

$$of = \left(\frac{VSWR_{DES}}{VSWR}\right)^2 \quad (3.2)$$

όπου  $VSWR_{DES}$  και  $VSWR$  είναι ο επιθυμητός λόγος στάσιμου κύματος και ο υπολογισθείς αντίστοιχα. Η απαίτηση που τίθεται είναι  $VSWR_{DES}=1$ . Για τον υπολογισμό του  $VSWR$  λαμβάνεται υπόψη τιμή χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ω. Απαιτείται τέλειος συντονισμός σε μια συχνότητα ώστε να προκύψει επαρκές εύρος ζώνης εκατέρωθεν αυτής. Ο συνολικός πληθυσμός αποτελείται από 250 γενιές και κάθε γενιά περιλαμβάνει 60 χρωμοσώματα. Η στρατηγική επιλογής που χρησιμοποιείται είναι η αποδεκάτιση πληθυσμού, ενώ το σχήμα ζευγαρώματος είναι η συνένωση ατόμων με γειτονικές τιμές επίδοσης (adjacent fitness pairing). Το σημείο της διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία και κάθε χρωμόσωμα χωρίζεται σε επίπεδο γονιδίων. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι ίση με 0.15 [13, 22]. Η όλη διαδικασία της βελτιστοποίησης λαμβάνει χώρα στα 900 MHz.

Όπως προειπώθηκε, οι διαστάσεις της κεραίας δίνονται σε αριθμό segments. Κάθε segment έχει μήκος  $seglen=0.025\lambda$ , για λόγους σύγκλισης του αλγορίθμου. Η ακτίνα κάθε segment είναι ίση με 0.004λ. Τα τελικά αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Η τιμή του  $VSWR$  στα 900 MHz είναι 1.1613.

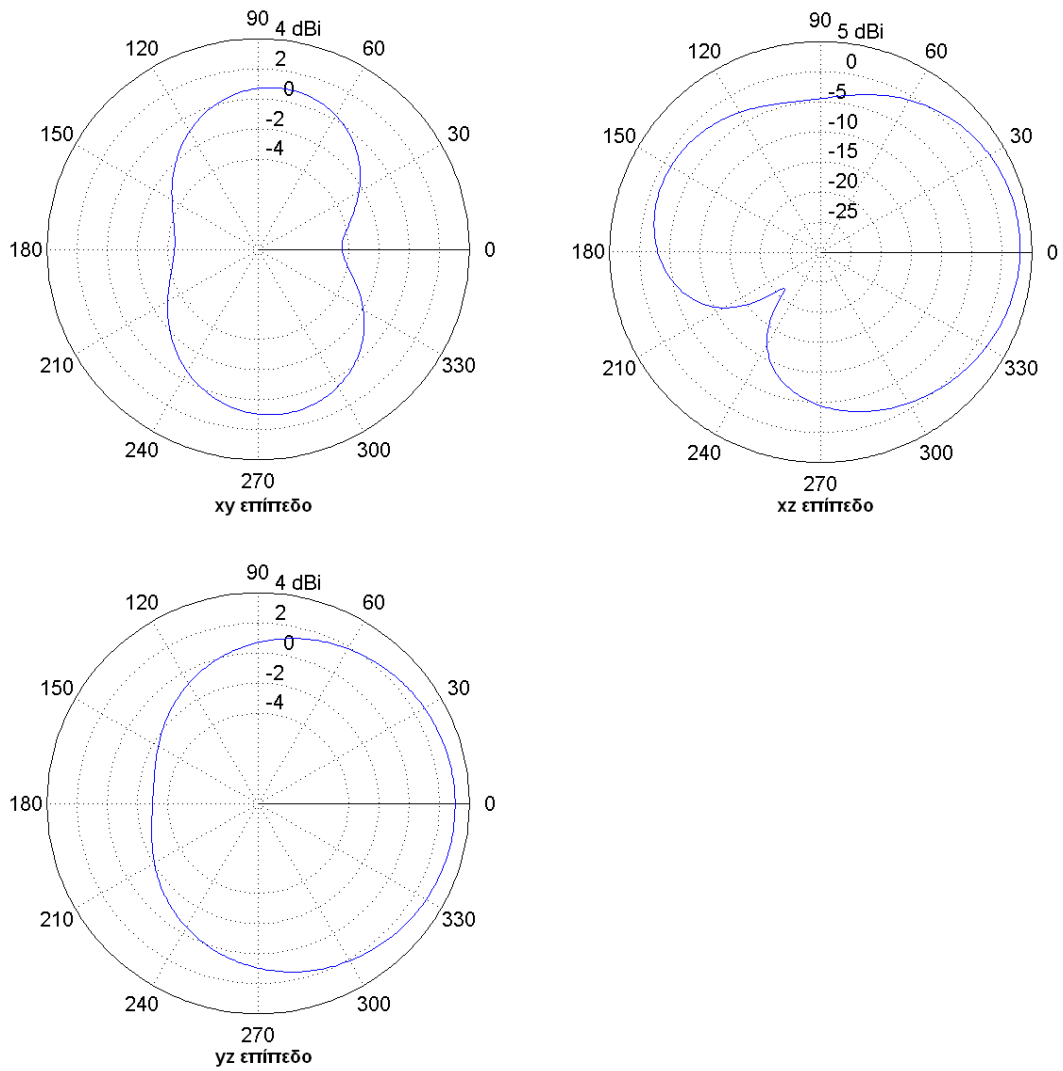
Η κανονική λειτουργία της PIFA σχετικά με το επιθυμητό εύρος ζώνης υποτίθεται ότι επιτυγχάνεται σε συχνότητες όπου ο λόγος στάσιμου κύματος  $VSWR$  κάτω από 2 ( $S_{11}<10dB$ ). Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή του  $VSWR$  στη συχνοτική μπάντα των 900 MHz.



Σχήμα 3.3: Μεταβολή του VSWR στη συχνοτική μπάντα των 900 MHz

Από το προηγούμενο γράφημα, η PIFA εμφανίζεται να λειτουργεί άκρως ικανοποιητικά στη συχνότητα των 900 MHz, ενώ παράλληλα επιδεικνύει ένα εκτεταμένο λειτουργικό εύρος ζώνης. Η τιμή αυτή είναι 82.5 MHz και αντιστοιχεί σε ποσοστό 9.1%.

Τα διαγράμματα μακρινού πεδίου της PIFA στα 900 MHz απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4. Το μέγιστο κέρδος υπολογίζεται στις κατευθύνσεις ( $\varphi=0^\circ, \theta=0^\circ$ ) και ( $\varphi=90^\circ, \theta=0^\circ$ ). Η τιμή του (3.1 dBi) είναι κατάλληλη για κινητές επικοινωνίες. Στον Πίνακα 3.2 παρατίθενται οι τιμές των κερδών για τις συχνότητες που εμπεριέχονται στο προαναφερθέν λειτουργικό εύρος ζώνης, οι οποίες επιβεβαιώνουν την ποιότητα της προτεινόμενης διάταξης.



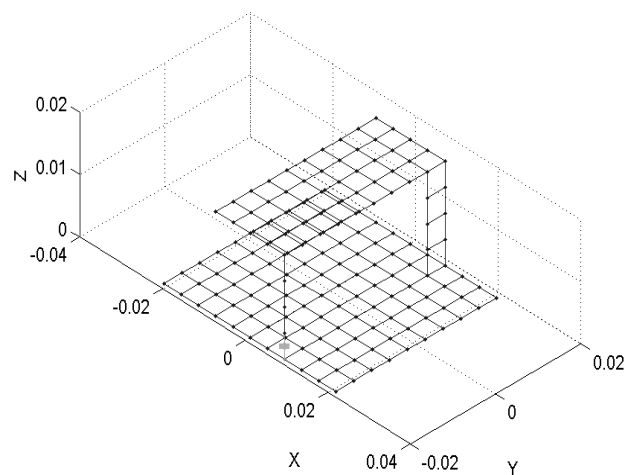
Σχήμα 3.4: Διαγράμματα ακτινοβολίας της RIFA στα επίπεδα xy, xz και yz στα 900 MHz

Συχνότητα (MHz)	Μέγιστο κέρδος
870	2.81
880	2.91
890	3.01
900	3.10
910	3.19

920	3.27
930	3.35
940	3.43
950	3.50

Πίνακας 3.2: Κέρδη σε κάθε συχνότητα υπό εξέταση

Τέλος παρουσιάζονται τα στοιχεία της απλής PIFA, η οποία και απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Ο Πίνακας 3.3 περιλαμβάνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απλής PIFA, επίσης εκφρασμένα σε αριθμό segments και σε cm.



Σχήμα 3.5: Αναπαράσταση της απλής PIFA στο SNEC

Παράμετρος	Τιμή	Τιμή (cm) $\lambda=33.3$ cm
Μήκος άνω πλάκας	<i>4seglen</i>	3,3
Πλάτος άνω πλάκας	<i>9seglen</i>	7,49
Μήκος βάσης	<i>10seglen</i>	8,33

<b>Πλάτος βάσης</b>	<i>9seglen</i>	7,49
<b>Ύψος αγωγού</b>	<i>4seglen</i>	3,3
<b>Πλάτος επιφάνειας βραχυκύκλωσης</b>	<i>1seglen</i>	0,83

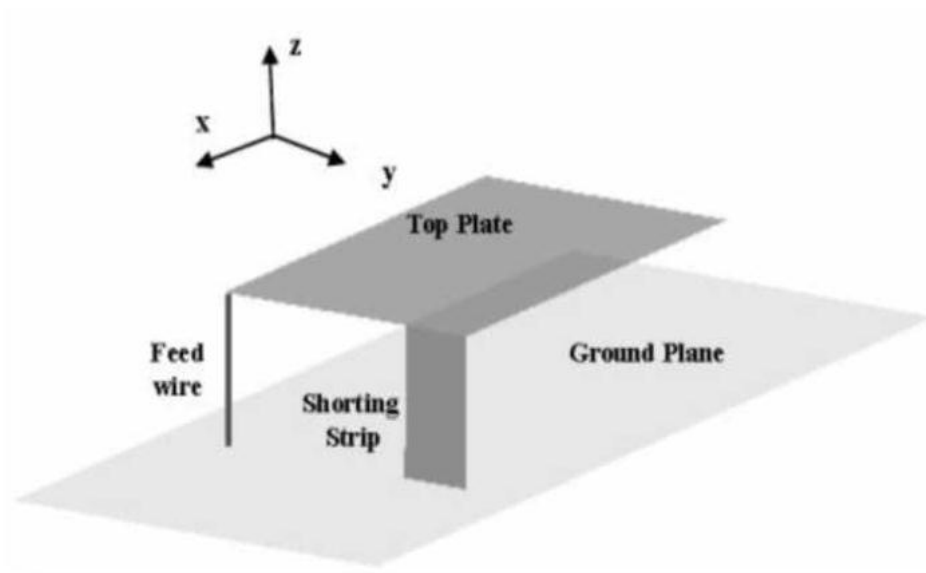
Πίνακας 3.3: Παράμετροι για την απλή PIFA

## Κεφάλαιο 4: Μελέτη παράγοντα διάταξης και διαγράμματος ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας PIFA 2 - στοιχείων

### 4.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί ο παράγοντας διάταξης μιας στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων σε απόσταση  $d$  στον άξονα  $y$  και θα γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων με την βοήθεια του προγράμματος Super nec.

Η διάταξη της κεραίας PIFA (single PIFA) η οποία θα υλοποιηθεί στο Super nec είναι η εξής:



Σχήμα 4.1: Διάταξη απλής κεραίας PIFA (single PIFA) η οποία θα χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση στο πρόγραμμα Super nec



και τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στον πίνακα 3.3 για συχνότητα 1800MHz.

Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$  συναρτήσει της γωνίας  $\varphi$  και για  $\theta=90^{\circ}$  (Σχήμα (1.1)) για την απλή κεραία PIFA δίνονται από την προσομοίωση για την πιο πάνω κεραία σε **dBi**.

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας της απλής – μονής κεραίας PIFA έχει υπολογιστεί από το Supernec σε dBi. Τα dBi είναι μονάδα μέτρησης του κέρδους μιας κεραίας σε σύγκριση με τη ισοτροπική κεραία. Δηλαδή πόσο κέρδος έχει η κεραία που μελετάμε σε σχέση με το κέρδος που παρουσιάζει η ισοτροπική κεραία για το ίδιο περιβάλλον ακτινοβολίας. Έτσι και εμείς θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα στην παρούσα εργασία σε dBi και θα καταλήξουμε στα σχετικά συμπεράσματα.

Από την θεωρία των κεραίων έχουμε τα εξής:

Η μέση τιμή της πυκνότητας ισχύος:

$$\widetilde{P}_{av}(\vec{r}) = \frac{1}{2} Re\{\vec{E}(\vec{r})X\vec{H}(\vec{r})^*\} \quad (4.1)$$

και επειδή βρισκόμαστε στο μακρινό πεδίο της κεραίας όπου δημιουργείται εγκάρσιο πεδίο, ισχύει  $E_{\theta}=n H_{\varphi}$ .

Ακόμη αν θεωρήσουμε ότι η κεραία ακτινοβολεί υπεράνω αγωγίμου εδάφους τότε σύμφωνα με την μέθοδο των ειδώλων, ο όρος  $\frac{1}{2}$  στη σχέση (4.1) παραλείπεται και έτσι η σχέση (4.1), δεδομένου ότι το  $E_{\theta}$  είναι πραγματικός αριθμός, μπορεί να γραφτεί στην μορφή:

$$\widetilde{P}_{av}(\vec{r}) = \frac{1}{2} Re\{\vec{E}(\vec{r})X\vec{H}(\vec{r})^*\} = \frac{1}{2} Re\{\hat{r}E_{\theta}H_{\varphi}^*\} = \frac{1}{n} |E_{\theta}|^2 \quad (4.2)$$

και σε dBi

$$P_{av}(dBi) = E_{\theta}(dBi) + E_{\theta}(dBi) - 10\log(n) \quad (4.3)$$

όπου  $n = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$  η κυματική αντίσταση του μέσου διάδοσης.

Τέλος καταλήγουμε στην ένταση ακτινοβολίας της κεραίας PIFA που μελετούμε και η οποία εκφράζει την ισχύ που ακτινοβολείται ανά μονάδα στερεάς γωνίας μέσω της σχέσης:

$$U(\theta = 90^{\circ}, \varphi) = r^2 |\widetilde{P}_{av}(\vec{r})| \quad (4.4)$$

και επειδή  $r$  η απόσταση από την κεραία η οποία μπορεί να είναι οποιαδήποτε σταθερά μπορούμε να την παραλείψουμε αφού αυτό δεν θα επηρεάσει τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας που μας ενδιαφέρει. Έτσι έχουμε :

$$U(\theta = 90^\circ, \varphi) \approx |\widetilde{P}_{av}(\vec{r})| = \frac{1}{n} |E_\theta|^2 \quad (4.5)$$

και σε dBi

$$U(\theta = 90^\circ, \varphi)(dBi) = E_\theta(dBi) + E_\theta(dBi) - 10\log(120\pi) \quad (4.6)$$

Πηγαίνοντας τώρα στην θεωρία των στοιχειοκεραιών και στο σχήμα (1.2) όπου οι 2 κεραίες τοποθετούνται επί του άξονα  $y$ , παίρνουμε τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας που μελετούμε, ο οποίος δίνεται από τις σχέσεις (1.3), (1.4) όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο (1.2):

$$S(\theta = 90^\circ, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp(jkr_m \cos\psi_m) = c_o \exp(jkr_o \cos\psi_o) \\ + c_1 \exp(jkr_1 \cos\psi_1) \quad (4.7)$$

Όπου:  $k = 2\pi/\lambda =$  κυματικός αριθμός του μέσου διάδοσης

$c_m =$  ρευματικός συντελεστής του στοιχείου  $m$

$M = 2 =$  το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας.

$r_o = 0$  από σχήμα (1.2)

$r_1 = d =$  απόσταση των 2 κεραιών στον άξονα τον  $y$ .

$\cos\psi_m = \cos\theta_m \cos\theta + \sin\theta_m \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_m)$

Εδώ να αναφέρουμε ότι η παρουσία ενός σκεδαστή, (που στην διάταξη μας είναι η κεραία 1 για την κεραία 2 και η κεραία 2 για την κεραία 1 αντίστοιχα) στην κοντινή περιοχή μιας κεραίας, προκαλεί αλλαγή της κατανομής του ρεύματος, του πεδίου ακτινοβολίας και της αντίστασης εισόδου της κεραίας σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της όταν αυτή βρίσκεται μόνη στο χώρο.

Οπότεν ορίζεται το μέγεθος της *αμοιβαίας αντίστασης* (mutual coupling) μεταξύ των δύο κεραιών και ορίζεται ως ο λόγος της επαγόμενης τάσης στα άκρα της μιας κεραίας προς το

ρεύμα στο σημείο τροφοδότησης της άλλης κεραίας και λόγω του θεωρήματος της αμοιβαιότητας έχουμε :

$$Z_{21} = \frac{V_{21}}{I_{1i}} = \frac{V_{12}}{I_{2i}} = Z_{12} \quad (4.8)$$

Ακόμη για την τροφοδοσία των 2 κεραιών PIFA που θα χρησιμοποιήσουμε ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (4.9)$$

$$V_2 = Z_{22}I_2 + Z_{21}I_1 \quad (4.10)$$

Όπου:  $V_1$  = η τάση που εφαρμόζεται στην κεραία 1

$V_2$  = η τάση που εφαρμόζεται στην κεραία 2

$Z_{11}$  = ίδια αντίσταση της κεραίας 1

$Z_{22}$  = ίδια αντίσταση της κεραίας 2

$I_1$  = ρεύμα που επάγεται στους ακροδέκτες της κεραίας 1

$I_2$  = ρεύμα που επάγεται στους ακροδέκτες της κεραίας 2

$Z_{12} = Z_{21}$  = αμοιβαία αντίσταση μεταξύ των κεραιών 1 και 2 (θεώρημα της αμοιβαιότητας) [1] , [2]

Η τιμή της ίδιας αντίστασης  $Z_{11}$  και  $Z_{22}$  υπολογίζεται όταν η κεραία είναι μόνη της στο χώρο και επειδή οι κεραίες που χρησιμοποιούμε είναι πανομοιότυπες, τότε ισχύει  $Z_{11}=Z_{22}$ . Ακόμη επειδή η τάση τροφοδοσίας που τους εφαρμόζεται έχει την ίδια πλάτους, αλλά και την ίδια φάση, δηλαδή  $V_1=V_2$ , επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων (4.9) και (4.10) καταλήγουμε στο συμπέρασμα:

$$I_1=I_2 \quad (4.11)$$

Όμως τα ρεύματα  $I_1$  και  $I_2$  δίνονται από την σχέση:

$$I_m = c_m I_o \quad m=0,1,2, \dots M-1 \quad (4.12)$$

Σύμφωνα με την σχέση (4.11) καταλήγουμε να έχουμε  $c_0 = c_1 \neq 0$  (για ευκολία στις πράξεις αντικαθιστούμε:  $c_0 = c_1 = 1$ )

Να σημειώσουμε ότι τα πιο πάνω ισχύουν μόνο για στοιχειοκεραία 2 στοιχείων όπου το σύστημα των εξισώσεων (4.9) και (4.10) είναι 2x2 και σε καμία άλλη περίπτωση στοιχειοκεραίας.

Οπότε η τελική έκφραση για τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας (antenna factor) θα πάρει την μορφή:

$$S(\theta = 90^\circ, \varphi) = 1 + \exp(jkdc\cos\psi_1) \quad (4.13)$$

Αλλά σύμφωνα και με το σχήμα (1.1):

$$\cos\psi_1 = \cos 90^\circ \cos \theta + \sin 90^\circ \sin \theta \cos(90^\circ - 90^\circ) = \sin \theta \quad (4.14)$$

οπότε η σχέση (4.7) καταλήγει:

$$S(\theta = 90^\circ, \varphi) = 1 + \exp(jkdsin \theta) = 1 + \cos(kdsin \theta) + jsin(kdsin \theta) \quad (4.15)$$

Έτσι καταλήγουμε στην ένταση ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων η οποία δίνεται από την σχέση:

$$U(\theta = 90^\circ, \varphi) = U_o(\theta = 90^\circ, \varphi) |S(\theta = 90^\circ, \varphi)|^2 \quad (4.16)$$

και σε dBi

$$U(\theta = 90^\circ, \varphi)(dBi) = U_o(\theta = 90^\circ, \varphi)(dBi) + 10\log(|S(\theta = 90^\circ, \varphi)|) + 10\log(|S(\theta = 90^\circ, \varphi)|) \quad (4.17)$$

Όπου  $U_o$  η ένταση ακτινοβολίας της απλής κεραίας PIFA που μελετήθηκε πιο πάνω και η οποία δίνεται από την σχέση (4.6).

Πιο κάτω ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των πιο πάνω αποτελεσμάτων με την βοήθεια του μαθηματικού πακέτου Microsoft Excel:

## 4.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων με την βοήθεια του μαθηματικού πακέτου Microsoft Excel

Τα αποτελέσματα τα οποία παίρνουμε από την θεωρητική ανάλυση της στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων η οποία παρουσιάστηκε πιο πάνω γίνεται στην Microsoft Excel με άμεση εφαρμογή των σχέσεων της παραγράφου 4.1 και για την συχνότητα των 1800MHz (κινητές επικοινωνίες).

$$f = 1800 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1800 \times 10^6} = 0.167 \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 37.68$$

$$d = \lambda = 0.167 \text{ m}$$

$\phi$ (°)	$E_\theta(\theta=90^\circ, \phi)$ (dBi)	$U_o(\theta=90^\circ, \phi)$ (dBi) = $P_{av}$	$S(\theta=90^\circ, \phi)$	$U(\theta=90^\circ, \phi)$ (dBi)
0	1.49	-22.783	2-1.54186403228396E-15j	-16.763
1	1.5	-22.763	1.99397580746305+0.10959969971758j	-16.756

2	1.5	-22.763	1.97598309965478+0.217846251260497j	-16.795
3	1.51	-22.743	1.94626016339059+0.323406405595205j	-16.841
4	1.51	-22.743	1.90519976231277+0.424986341320414j	-16.934
5	1.51	-22.743	1.85334266117654+0.521350460454521j	-17.053
6	1.51	-22.743	1.79136874904601+0.611339106415864j	-17.201
7	1.51	-22.743	1.72008594477834+0.693884883920007j	-17.378
8	1.51	-22.743	1.64041711245954+0.768027292528716j	-17.583
9	1.51	-22.743	1.553385253002+0.832925423888545j	-17.820
10	1.51	-22.743	1.46009727001402+0.887868516237423j	-18.089
11	1.5	-22.763	1.36172663259512+0.932284207348486j	-18.412
12	1.5	-22.763	1.25949527440629+0.965744377441983j	-18.751
13	1.49	-22.783	1.15465507694712+0.987968525396674j	-19.148
14	1.48	-22.803	1.04846928540971+0.998824673489733j	-19.587
15	1.47	-22.823	0.942194197967362+0.998327846577147j	-20.072
16	1.46	-22.843	0.837061454302887+0.986636219853148j	-20.605
17	1.45	-22.863	0.734261227192928+0.964045073960233j	-21.195
18	1.44	-22.883	0.634926592817519+0.930978736259951j	-21.846
19	1.42	-22.923	0.540119322077813+0.887980721679153j	-22.588
20	1.41	-22.943	0.450817297607511+0.83570231505775j	-23.393
21	1.4	-22.963	0.367903720457933+0.774889858876135j	-24.296
22	1.38	-23.003	0.292158227763414+0.706371025366251j	-25.337
23	1.36	-23.043	0.224249999195648+0.631040360240173j	-26.526
24	1.34	-23.083	0.164732886804142+0.549844386725424j	-27.905
25	1.33	-23.103	0.11404256096304+0.463766553575257j	-29.522

26	1.31	-23.143	0.0724956255596257+0.373812299682568j	-31.530
27	1.29	-23.183	0.0402906191103177+0.280994491462631j	-34.121
28	1.26	-23.243	0.017510785886954+0.186319467988531j	-37.800
29	1.24	-23.283	0.00412847294586316+0.0907739037546675j	-44.115
30	1.22	-23.323	0.0000109855880706666-0.00468732924577478j	-69.905
31	1.2	-23.363	0.00492771549980442-0.0991521488398601j	-43.427
32	1.17	-23.423	0.0185583427351739-0.191760979829765j	-37.728
33	1.15	-23.463	0.040501904770091-0.281715113634637j	-34.378
34	1.12	-23.523	0.0702865229078362-0.368283654963397j	-32.044
35	1.1	-23.563	0.107379578063701-0.450809030901405j	-30.244
36	1.07	-23.623	0.151198134009536-0.528711066927019j	-28.818
37	1.04	-23.683	0.20111941604771-0.601489661244521j	-27.638
38	1.02	-23.723	0.256491166275162-0.668726112973863j	-26.622
39	0.99	-23.783	0.316641712517389-0.730083180828618j	-25.767
40	0.96	-23.843	0.380889606063411-0.785303966703137j	-25.025
41	0.93	-23.903	0.44855270291652-0.834209732944494j	-24.375
42	0.9	-23.963	0.518956583806781-0.876696772970654j	-23.802
43	0.87	-24.023	0.591442229133291-0.912732462370231j	-23.294
44	0.84	-24.083	0.665372885802441-0.942350621819614j	-22.842
45	0.82	-24.123	0.740140083139936-0.965646324287252j	-22.420
46	0.79	-24.183	0.815168774275696-0.98277027732693j	-22.061
47	0.76	-24.243	0.889921597293032-0.993922907099682j	-21.739
48	0.73	-24.303	0.963902266725017-0.999348264446588j	-21.453
49	0.7	-24.363	1.03665812046724-0.999327865219323j	-21.197

50	0.67	-24.423	1.10778185971891-0.994174567526012j	-20.968
51	0.64	-24.483	1.17691253008697-0.98422657792717j	-20.766
52	0.61	-24.543	1.24373580047243-0.969841667267429j	-20.586
53	0.58	-24.603	1.30798360283643-0.951391665080103j	-20.427
54	0.55	-24.663	1.36943320049408-0.92925728965271j	-20.288
55	0.52	-24.723	1.4279057553207-0.903823359160085j	-20.166
56	0.49	-24.783	1.48326446532414-0.875474417990028j	-20.061
57	0.46	-24.843	1.53541234360391-0.844590801700189j	-19.971
58	0.43	-24.903	1.5842897079682-0.811545154111854j	-19.895
59	0.4	-24.963	1.62987144760308-0.77669940098754j	-19.831
60	0.38	-25.003	1.67216412938095-0.740402176640201j	-19.760
61	0.35	-25.063	1.71120300184825-0.702986692734681j	-19.720
62	0.32	-25.123	1.74704894983108-0.664769032488939j	-19.690
63	0.3	-25.163	1.77978544711661-0.626046848458767j	-19.649
64	0.27	-25.223	1.80951554896681-0.58709843806721j	-19.637
65	0.25	-25.263	1.83635896044579-0.548182167971598j	-19.613
66	0.22	-25.323	1.86044921081778-0.509536216183951j	-19.617
67	0.2	-25.363	1.88193095871128-0.471378599500021j	-19.607
68	0.18	-25.403	1.9009574474345-0.433907453165192j	-19.603
69	0.15	-25.463	1.91768812484376-0.397301529723634j	-19.625
70	0.13	-25.503	1.93228643756401-0.36172088457015j	-19.632
71	0.11	-25.543	1.94491780518113-0.327307716761565j	-19.644
72	0.09	-25.583	1.95574777629406-0.294187335058735j	-19.660
73	0.07	-25.623	1.96494036504439-0.262469220877434j	-19.680



74	0.06	-25.643	1.97265656393423-0.232248161748726j	-19.682
75	0.04	-25.683	1.97905302639106-0.203605430955329j	-19.708
76	0.02	-25.723	1.98428091062654-0.17660999115619j	-19.737
77	0.01	-25.743	1.98848487484253-0.151319701980783j	-19.748
78	-0.01	-25.783	1.99180221273575-0.127782513719451j	-19.781
79	-0.02	-25.803	1.99436211751293-0.106037631316406j	-19.795
80	-0.03	-25.823	1.99628506221922-0.086116634855552j	-19.811
81	-0.04	-25.843	1.99768228407212-0.0680445445912293j	-19.828
82	-0.05	-25.863	1.99865536064788-0.0518408202987769j	-19.846
83	-0.06	-25.883	1.99929586615605-0.0375202862918868j	-19.864
84	-0.07	-25.903	1.99968509663054-0.0250939748700907j	-19.883
85	-0.07	-25.903	1.99989385363252-0.014569882220146j	-19.883
86	-0.08	-25.923	1.99998227697652-0.00595363190425826j	-19.903
87	-0.08	-25.923	1.99999971803103+0.000750957965071857j	-19.903
88	-0.09	-25.943	1.99998464628677+0.00554140692712942j	-19.923
89	-0.09	-25.943	1.99996458311032+0.00841620609369307j	-19.923
90	-0.09	-25.943	1.99995605788908+0.00937455550541395j	-19.923
91	-0.09	-25.943	1.99996458311032+0.00841620609369307j	-19.923
92	-0.09	-25.943	1.99998464628677+0.00554140692712942j	-19.923
93	-0.08	-25.923	1.99999971803103+0.000750957965071857j	-19.903
94	-0.08	-25.923	1.99998227697652-0.00595363190425826j	-19.903
95	-0.07	-25.903	1.99989385363252-0.014569882220146j	-19.883
96	-0.07	-25.903	1.99968509663054-0.0250939748700907j	-19.883
97	-0.06	-25.883	1.99929586615605-0.0375202862918859j	-19.864

98	-0.05	-25.863	1.99865536064788-0.0518408202987769j	-19.846
99	-0.04	-25.843	1.99768228407212-0.0680445445912293j	-19.828
100	-0.03	-25.823	1.99628506221922-0.086116634855552j	-19.811
101	-0.02	-25.803	1.99436211751293-0.106037631316406j	-19.795
102	-0.01	-25.783	1.99180221273575-0.12778251371945j	-19.781
103	0.01	-25.743	1.98848487484253-0.151319701980783j	-19.748
104	0.02	-25.723	1.98428091062654-0.17660999115619j	-19.737
105	0.04	-25.683	1.97905302639106-0.203605430955329j	-19.708
106	0.06	-25.643	1.97265656393423-0.232248161748726j	-19.682
107	0.07	-25.623	1.96494036504439-0.262469220877434j	-19.680
108	0.09	-25.583	1.95574777629406-0.294187335058735j	-19.660
109	0.11	-25.543	1.94491780518113-0.327307716761565j	-19.644
110	0.13	-25.503	1.93228643756401-0.361720884570149j	-19.632
111	0.15	-25.463	1.91768812484376-0.397301529723634j	-19.625
112	0.18	-25.403	1.9009574474345-0.433907453165192j	-19.603
113	0.2	-25.363	1.88193095871128-0.471378599500022j	-19.607
114	0.22	-25.323	1.86044921081778-0.509536216183951j	-19.617
115	0.25	-25.263	1.83635896044579-0.548182167971598j	-19.613
116	0.27	-25.223	1.80951554896681-0.587098438067211j	-19.637
117	0.3	-25.163	1.77978544711661-0.626046848458766j	-19.649
118	0.32	-25.123	1.74704894983108-0.664769032488939j	-19.690
119	0.35	-25.063	1.71120300184825-0.70298669273468j	-19.720
120	0.38	-25.003	1.67216412938095-0.740402176640201j	-19.760
121	0.4	-24.963	1.62987144760308-0.77669940098754j	-19.831

122	0.43	-24.903	1.5842897079682-0.811545154111854j	-19.895
123	0.46	-24.843	1.53541234360391-0.84459080170019j	-19.971
124	0.49	-24.783	1.48326446532414-0.875474417990028j	-20.061
125	0.52	-24.723	1.4279057553207-0.903823359160085j	-20.166
126	0.55	-24.663	1.36943320049408-0.92925728965271j	-20.288
127	0.58	-24.603	1.30798360283643-0.951391665080103j	-20.427
128	0.61	-24.543	1.24373580047243-0.969841667267429j	-20.586
129	0.64	-24.483	1.17691253008697-0.984226577927169j	-20.766
130	0.67	-24.423	1.10778185971891-0.994174567526012j	-20.968
131	0.7	-24.363	1.03665812046725-0.999327865219323j	-21.197
132	0.73	-24.303	0.963902266725017-0.999348264446588j	-21.453
133	0.76	-24.243	0.889921597293033-0.993922907099682j	-21.739
134	0.79	-24.183	0.815168774275696-0.98277027732693j	-22.061
135	0.82	-24.123	0.740140083139937-0.965646324287252j	-22.420
136	0.84	-24.083	0.66537288580244-0.942350621819614j	-22.842
137	0.87	-24.023	0.591442229133292-0.912732462370232j	-23.294
138	0.9	-23.963	0.518956583806781-0.876696772970654j	-23.802
139	0.93	-23.903	0.44855270291652-0.834209732944494j	-24.375
140	0.96	-23.843	0.380889606063412-0.785303966703138j	-25.025
141	0.99	-23.783	0.316641712517389-0.730083180828618j	-25.767
142	1.02	-23.723	0.256491166275162-0.668726112973863j	-26.622
143	1.04	-23.683	0.20111941604771-0.60148966124452j	-27.638
144	1.07	-23.623	0.151198134009536-0.528711066927019j	-28.818
145	1.1	-23.563	0.107379578063701-0.450809030901405j	-30.244

146	1.12	-23.523	0.0702865229078362-0.368283654963397j	-32.044
147	1.15	-23.463	0.0405019047700913-0.281715113634638j	-34.378
148	1.17	-23.423	0.0185583427351739-0.191760979829765j	-37.728
149	1.2	-23.363	0.00492771549980453-0.0991521488398614j	-43.427
150	1.22	-23.323	0.0000109855880706666-0.00468732924577478j	-69.905
151	1.24	-23.283	0.00412847294586305+0.0907739037546666j	-44.115
152	1.26	-23.243	0.0175107858869541+0.186319467988531j	-37.800
153	1.29	-23.183	0.0402906191103175+0.28099449146263j	-34.121
154	1.31	-23.143	0.0724956255596261+0.373812299682569j	-31.530
155	1.33	-23.103	0.11404256096304+0.463766553575257j	-29.522
156	1.34	-23.083	0.164732886804141+0.549844386725423j	-27.905
157	1.36	-23.043	0.224249999195648+0.631040360240173j	-26.526
158	1.38	-23.003	0.292158227763413+0.70637102536625j	-25.337
159	1.4	-22.963	0.367903720457933+0.774889858876135j	-24.296
160	1.41	-22.943	0.450817297607509+0.835702315057749j	-23.393
161	1.42	-22.923	0.540119322077814+0.887980721679154j	-22.588
162	1.44	-22.883	0.634926592817519+0.93097873625995j	-21.846
163	1.45	-22.863	0.734261227192929+0.964045073960233j	-21.195
164	1.46	-22.843	0.837061454302887+0.986636219853148j	-20.605
165	1.47	-22.823	0.94219419796736+0.998327846577147j	-20.072
166	1.48	-22.803	1.04846928540971+0.998824673489733j	-19.587
167	1.49	-22.783	1.15465507694712+0.987968525396675j	-19.148
168	1.5	-22.763	1.25949527440629+0.965744377441983j	-18.751
169	1.5	-22.763	1.36172663259512+0.932284207348486j	-18.412

170	1.51	-22.743	1.46009727001402+0.887868516237422j	-18.089
171	1.51	-22.743	1.553385253002+0.832925423888546j	-17.820
172	1.51	-22.743	1.64041711245954+0.768027292528716j	-17.583
173	1.51	-22.743	1.72008594477834+0.693884883920007j	-17.378
174	1.51	-22.743	1.79136874904601+0.611339106415866j	-17.201
175	1.51	-22.743	1.85334266117654+0.521350460454521j	-17.053
176	1.51	-22.743	1.90519976231277+0.424986341320415j	-16.934
177	1.51	-22.743	1.94626016339059+0.323406405595205j	-16.841
178	1.5	-22.763	1.97598309965478+0.217846251260498j	-16.795
179	1.5	-22.763	1.99397580746305+0.10959969971758j	-16.756
180	1.49	-22.783	2+7.70932016141979E-16j	-16.763
181	1.49	-22.783	1.99397580746305-0.109599699717581j	-16.776
182	1.48	-22.803	1.97598309965478-0.217846251260496j	-16.835
183	1.47	-22.823	1.94626016339059-0.323406405595203j	-16.921
184	1.46	-22.843	1.90519976231277-0.424986341320414j	-17.034
185	1.44	-22.883	1.85334266117654-0.52135046045452j	-17.193
186	1.43	-22.903	1.79136874904601-0.611339106415865j	-17.361
187	1.41	-22.943	1.72008594477834-0.693884883920006j	-17.578
188	1.4	-22.963	1.64041711245954-0.768027292528716j	-17.803
189	1.38	-23.003	1.553385253002-0.832925423888545j	-18.080
190	1.36	-23.043	1.46009727001402-0.887868516237423j	-18.389
191	1.35	-23.063	1.36172663259512-0.932284207348486j	-18.712
192	1.32	-23.123	1.25949527440629-0.965744377441983j	-19.111
193	1.3	-23.163	1.15465507694712-0.987968525396674j	-19.528

194	1.28	-23.203	1.04846928540971-0.998824673489733j	-19.987
195	1.26	-23.243	0.942194197967362-0.998327846577147j	-20.492
196	1.23	-23.303	0.837061454302888-0.986636219853148j	-21.065
197	1.21	-23.343	0.734261227192928-0.964045073960233j	-21.675
198	1.18	-23.403	0.63492659281752-0.930978736259951j	-22.366
199	1.15	-23.463	0.540119322077813-0.887980721679153j	-23.128
200	1.13	-23.503	0.450817297607511-0.83570231505775j	-23.953
201	1.1	-23.563	0.367903720457932-0.774889858876134j	-24.896
202	1.07	-23.623	0.292158227763414-0.706371025366251j	-25.957
203	1.04	-23.683	0.224249999195648-0.631040360240174j	-27.166
204	1	-23.763	0.164732886804142-0.549844386725424j	-28.585
205	0.97	-23.823	0.114042560963041-0.463766553575258j	-30.242
206	0.94	-23.883	0.0724956255596256-0.373812299682568j	-32.270
207	0.9	-23.963	0.0402906191103178-0.280994491462632j	-34.901
208	0.87	-24.023	0.0175107858869539-0.186319467988531j	-38.580
209	0.83	-24.103	0.00412847294586327-0.090773903754668j	-44.935
210	0.8	-24.163	0.0000109855880707777+0.00468732924577611j	-70.745
211	0.76	-24.243	0.00492771549980442+0.0991521488398601j	-44.307
212	0.72	-24.323	0.0185583427351738+0.191760979829765j	-38.628
213	0.68	-24.403	0.040501904770091+0.281715113634637j	-35.318
214	0.64	-24.483	0.0702865229078358+0.368283654963396j	-33.004
215	0.61	-24.543	0.107379578063702+0.450809030901406j	-31.224
216	0.57	-24.623	0.151198134009536+0.528711066927018j	-29.818
217	0.53	-24.703	0.201119416047711+0.601489661244521j	-28.658

218	0.48	-24.803	0.256491166275161+0.668726112973862j	-27.702
219	0.44	-24.883	0.31664171251739+0.730083180828619j	-26.867
220	0.4	-24.963	0.380889606063411+0.785303966703137j	-26.145
221	0.36	-25.043	0.448552702916519+0.834209732944494j	-25.515
222	0.32	-25.123	0.518956583806781+0.876696772970654j	-24.962
223	0.28	-25.203	0.59144222913329+0.912732462370231j	-24.474
224	0.24	-25.283	0.665372885802441+0.942350621819614j	-24.042
225	0.19	-25.383	0.740140083139936+0.965646324287252j	-23.680
226	0.15	-25.463	0.815168774275697+0.98277027732693j	-23.341
227	0.11	-25.543	0.889921597293032+0.993922907099682j	-23.039
228	0.07	-25.623	0.963902266725018+0.999348264446588j	-22.773
229	0.02	-25.723	1.03665812046724+0.999327865219323j	-22.557
230	-0.02	-25.803	1.10778185971891+0.994174567526012j	-22.348
231	-0.06	-25.883	1.17691253008697+0.98422657792717j	-22.166
232	-0.1	-25.963	1.24373580047243+0.969841667267428j	-22.006
233	-0.14	-26.043	1.30798360283643+0.951391665080103j	-21.867
234	-0.18	-26.123	1.36943320049408+0.92925728965271j	-21.748
235	-0.22	-26.203	1.4279057553207+0.903823359160085j	-21.646
236	-0.26	-26.283	1.48326446532414+0.875474417990028j	-21.561
237	-0.3	-26.363	1.53541234360391+0.844590801700189j	-21.491
238	-0.34	-26.443	1.5842897079682+0.811545154111854j	-21.435
239	-0.38	-26.523	1.62987144760308+0.776699400987541j	-21.391
240	-0.42	-26.603	1.67216412938095+0.740402176640203j	-21.360
241	-0.45	-26.663	1.71120300184825+0.702986692734679j	-21.320

242	-0.49	-26.743	1.74704894983108+0.664769032488939j	-21.310
243	-0.52	-26.803	1.77978544711661+0.626046848458767j	-21.289
244	-0.56	-26.883	1.80951554896681+0.587098438067211j	-21.297
245	-0.59	-26.943	1.83635896044579+0.548182167971598j	-21.293
246	-0.63	-27.023	1.86044921081778+0.50953621618395j	-21.317
247	-0.66	-27.083	1.88193095871128+0.471378599500022j	-21.327
248	-0.69	-27.143	1.9009574474345+0.433907453165193j	-21.343
249	-0.72	-27.203	1.91768812484376+0.397301529723634j	-21.365
250	-0.75	-27.263	1.93228643756401+0.361720884570149j	-21.392
251	-0.77	-27.303	1.94491780518113+0.327307716761565j	-21.404
252	-0.8	-27.363	1.95574777629406+0.294187335058735j	-21.440
253	-0.83	-27.423	1.96494036504439+0.262469220877435j	-21.480
254	-0.85	-27.463	1.97265656393423+0.232248161748726j	-21.502
255	-0.87	-27.503	1.97905302639106+0.203605430955329j	-21.528
256	-0.89	-27.543	1.98428091062654+0.17660999115619j	-21.557
257	-0.91	-27.583	1.98848487484253+0.151319701980783j	-21.588
258	-0.93	-27.623	1.99180221273575+0.127782513719451j	-21.621
259	-0.95	-27.663	1.99436211751293+0.106037631316406j	-21.655
260	-0.97	-27.703	1.99628506221922+0.086116634855552j	-21.691
261	-0.98	-27.723	1.99768228407212+0.0680445445912302j	-21.708
262	-0.99	-27.743	1.99865536064788+0.0518408202987778j	-21.726
263	-1.01	-27.783	1.99929586615605+0.0375202862918859j	-21.764
264	-1.02	-27.803	1.99968509663054+0.0250939748700898j	-21.783
265	-1.02	-27.803	1.99989385363252+0.014569882220146j	-21.783



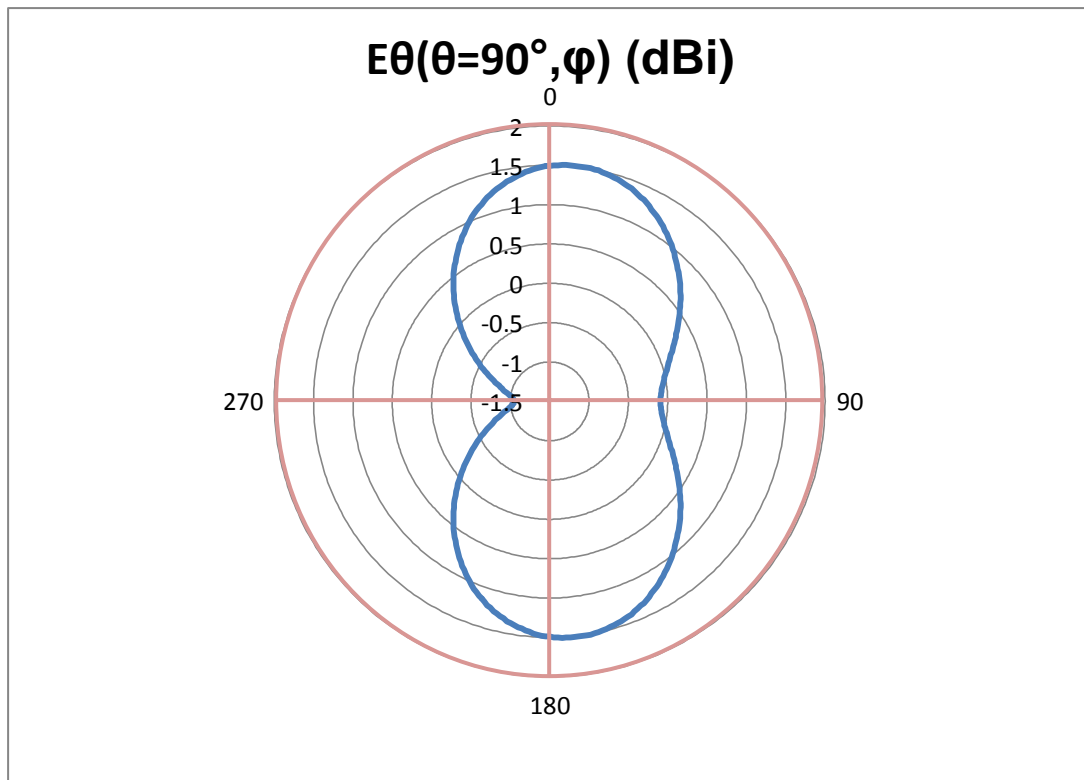
266	-1.03	-27.823	1.99998227697652+0.00595363190425826j	-21.803
267	-1.04	-27.843	1.99999971803103-0.000750957965071857j	-21.823
268	-1.04	-27.843	1.99998464628677-0.00554140692712942j	-21.823
269	-1.04	-27.843	1.99996458311032-0.00841620609369307j	-21.823
270	-1.04	-27.843	1.99995605788908-0.00937455550541395j	-21.823
271	-1.04	-27.843	1.99996458311032-0.00841620609369307j	-21.823
272	-1.04	-27.843	1.99998464628677-0.00554140692712942j	-21.823
273	-1.04	-27.843	1.99999971803103-0.000750957965071857j	-21.823
274	-1.03	-27.823	1.99998227697652+0.00595363190425737j	-21.803
275	-1.02	-27.803	1.99989385363252+0.014569882220146j	-21.783
276	-1.02	-27.803	1.99968509663054+0.0250939748700898j	-21.783
277	-1.01	-27.783	1.99929586615605+0.0375202862918868j	-21.764
278	-0.99	-27.743	1.99865536064788+0.0518408202987769j	-21.726
279	-0.98	-27.723	1.99768228407212+0.0680445445912293j	-21.708
280	-0.97	-27.703	1.99628506221922+0.0861166348555511j	-21.691
281	-0.95	-27.663	1.99436211751293+0.106037631316407j	-21.655
282	-0.93	-27.623	1.99180221273575+0.127782513719451j	-21.621
283	-0.91	-27.583	1.98848487484253+0.151319701980783j	-21.588
284	-0.89	-27.543	1.98428091062654+0.176609991156189j	-21.557
285	-0.87	-27.503	1.97905302639106+0.203605430955329j	-21.528
286	-0.85	-27.463	1.97265656393423+0.232248161748727j	-21.502
287	-0.83	-27.423	1.96494036504439+0.262469220877434j	-21.480
288	-0.8	-27.363	1.95574777629406+0.294187335058735j	-21.440
289	-0.77	-27.303	1.94491780518113+0.327307716761565j	-21.404

290	-0.75	-27.263	1.93228643756401+0.36172088457015j	-21.392
291	-0.72	-27.203	1.91768812484376+0.397301529723634j	-21.365
292	-0.69	-27.143	1.9009574474345+0.433907453165192j	-21.343
293	-0.66	-27.083	1.88193095871128+0.471378599500021j	-21.327
294	-0.63	-27.023	1.86044921081778+0.50953621618395j	-21.317
295	-0.59	-26.943	1.83635896044579+0.548182167971598j	-21.293
296	-0.56	-26.883	1.80951554896681+0.58709843806721j	-21.297
297	-0.52	-26.803	1.77978544711661+0.626046848458766j	-21.289
298	-0.49	-26.743	1.74704894983108+0.664769032488938j	-21.310
299	-0.45	-26.663	1.71120300184824+0.702986692734681j	-21.320
300	-0.42	-26.603	1.67216412938095+0.740402176640201j	-21.360
301	-0.38	-26.523	1.62987144760308+0.77669940098754j	-21.391
302	-0.34	-26.443	1.5842897079682+0.811545154111853j	-21.435
303	-0.3	-26.363	1.53541234360391+0.844590801700189j	-21.491
304	-0.26	-26.283	1.48326446532413+0.875474417990028j	-21.561
305	-0.22	-26.203	1.4279057553207+0.903823359160085j	-21.646
306	-0.18	-26.123	1.36943320049408+0.92925728965271j	-21.748
307	-0.14	-26.043	1.30798360283644+0.951391665080102j	-21.867
308	-0.1	-25.963	1.24373580047242+0.969841667267429j	-22.006
309	-0.06	-25.883	1.17691253008697+0.98422657792717j	-22.166
310	-0.02	-25.803	1.10778185971891+0.994174567526012j	-22.348
311	0.02	-25.723	1.03665812046725+0.999327865219323j	-22.557
312	0.07	-25.623	0.963902266725019+0.999348264446588j	-22.773
313	0.11	-25.543	0.889921597293031+0.993922907099682j	-23.039

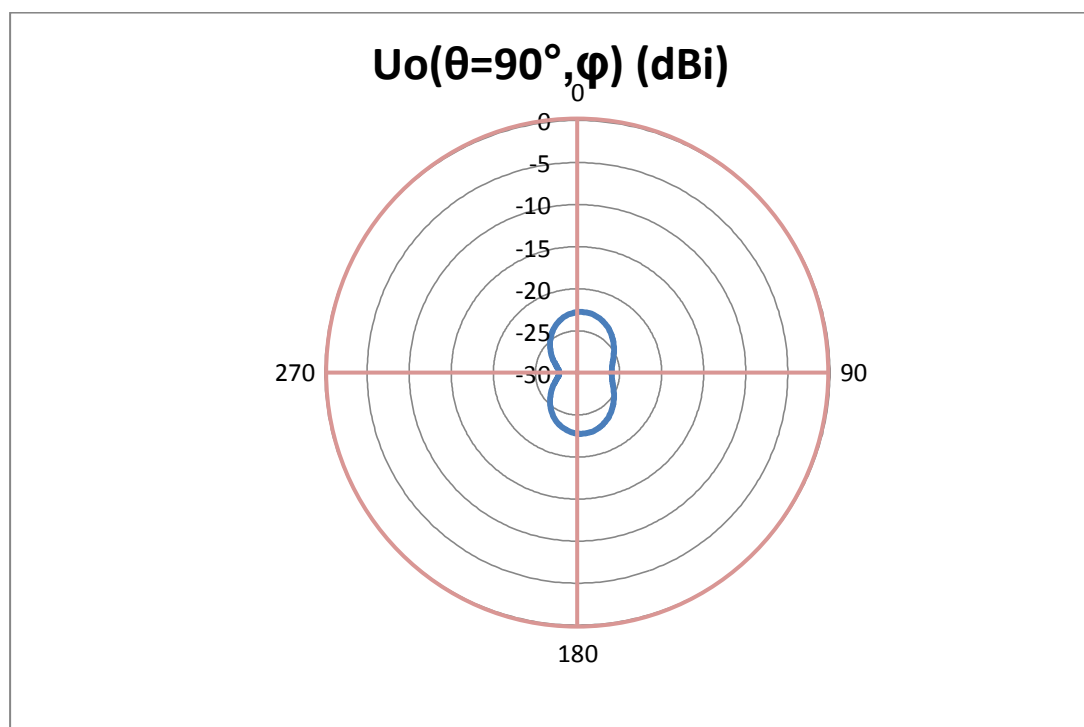
314	0.15	-25.463	0.815168774275697+0.98277027732693j	-23.341
315	0.19	-25.383	0.740140083139938+0.965646324287253j	-23.680
316	0.24	-25.283	0.665372885802442+0.942350621819615j	-24.042
317	0.28	-25.203	0.591442229133289+0.912732462370231j	-24.474
318	0.32	-25.123	0.518956583806781+0.876696772970653j	-24.962
319	0.36	-25.043	0.448552702916521+0.834209732944495j	-25.515
320	0.4	-24.963	0.380889606063412+0.785303966703138j	-26.145
321	0.44	-24.883	0.316641712517391+0.73008318082862j	-26.867
322	0.48	-24.803	0.256491166275161+0.668726112973862j	-27.702
323	0.53	-24.703	0.20111941604771+0.601489661244521j	-28.658
324	0.57	-24.623	0.151198134009537+0.52871106692702j	-29.818
325	0.61	-24.543	0.107379578063703+0.450809030901408j	-31.224
326	0.64	-24.483	0.0702865229078354+0.368283654963395j	-33.004
327	0.68	-24.403	0.0405019047700906+0.281715113634636j	-35.318
328	0.72	-24.323	0.0185583427351741+0.191760979829766j	-38.628
329	0.76	-24.243	0.00492771549980464+0.0991521488398623j	-44.307
330	0.8	-24.163	0.0000109855880707777+0.00468732924577788j	-70.745
331	0.83	-24.103	0.00412847294586327-0.0907739037546684j	-44.935
332	0.87	-24.023	0.017510785886954-0.186319467988531j	-38.580
333	0.9	-23.963	0.0402906191103173-0.28099449146263j	-34.901
334	0.94	-23.883	0.072495625559625-0.373812299682566j	-32.270
335	0.97	-23.823	0.114042560963041-0.463766553575258j	-30.242
336	1	-23.763	0.164732886804142-0.549844386725425j	-28.585
337	1.04	-23.683	0.224249999195647-0.631040360240172j	-27.166

338	1.07	-23.623	0.292158227763413-0.70637102536625j	-25.957
339	1.1	-23.563	0.36790372045793-0.774889858876133j	-24.896
340	1.13	-23.503	0.450817297607511-0.83570231505775j	-23.953
341	1.15	-23.463	0.540119322077813-0.887980721679153j	-23.128
342	1.18	-23.403	0.634926592817518-0.93097873625995j	-22.366
343	1.21	-23.343	0.734261227192926-0.964045073960232j	-21.675
344	1.23	-23.303	0.837061454302889-0.986636219853149j	-21.065
345	1.26	-23.243	0.942194197967362-0.998327846577147j	-20.492
346	1.28	-23.203	1.04846928540971-0.998824673489733j	-19.987
347	1.3	-23.163	1.15465507694712-0.987968525396675j	-19.528
348	1.32	-23.123	1.25949527440629-0.965744377441984j	-19.111
349	1.35	-23.063	1.36172663259512-0.932284207348486j	-18.712
350	1.36	-23.043	1.46009727001402-0.887868516237423j	-18.389
351	1.38	-23.003	1.553385253002-0.832925423888546j	-18.080
352	1.4	-22.963	1.64041711245953-0.768027292528718j	-17.803
353	1.41	-22.943	1.72008594477834-0.693884883920006j	-17.578
354	1.43	-22.903	1.79136874904601-0.611339106415864j	-17.361
355	1.44	-22.883	1.85334266117654-0.521350460454522j	-17.193
356	1.46	-22.843	1.90519976231277-0.424986341320416j	-17.034
357	1.47	-22.823	1.94626016339059-0.323406405595208j	-16.921
358	1.48	-22.803	1.97598309965478-0.217846251260496j	-16.835
359	1.49	-22.783	1.99397580746305-0.109599699717581j	-16.776

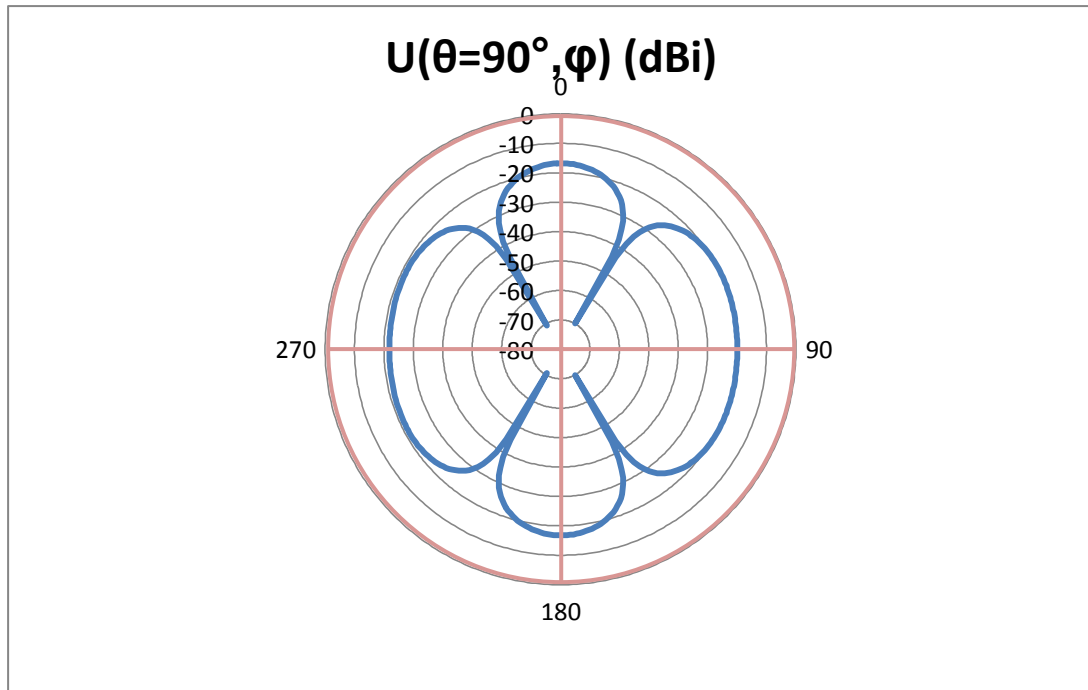
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα των εξισώσεων της παραγράφου 4.1 από μετρήσεις στο πρόγραμμα Supermec και με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  απλής κεραίας PIFA από μετρήσεις στο πρόγραμμα Superneec και με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel



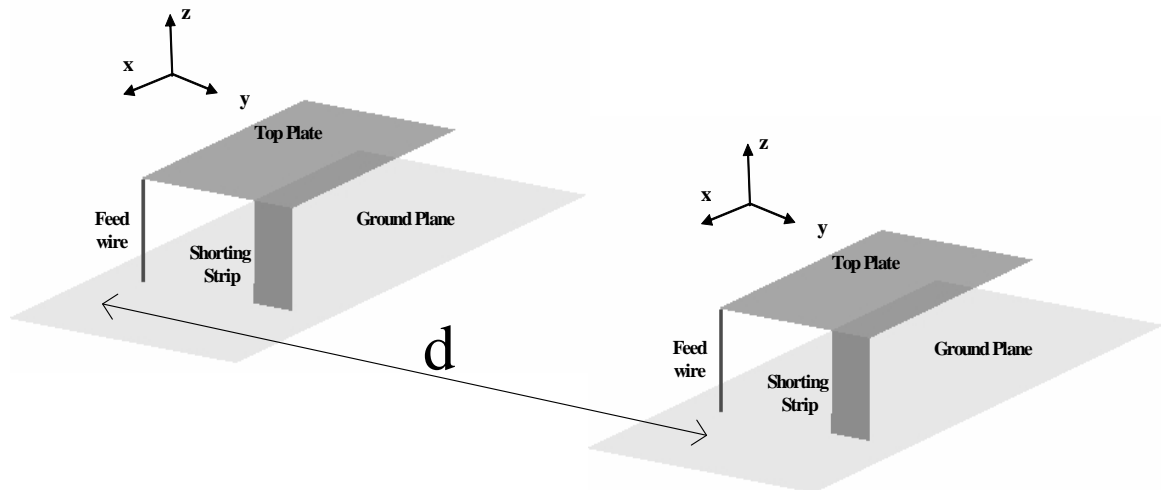
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $U_o(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  απλής κεραίας PIFA με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $U(\theta=90^\circ, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) με τη βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel

4.3 Αποτελέσματα από προσομοίωση της στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων στο Supernec και σύγκριση με τα αποτελέσματα από την θεωρία των στοιχειοκεραιών:

Για να επαληθεύσουμε την θεωρία των στοιχειοκεραιών στην περίπτωση στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων εφαρμόζουμε στο πρόγραμμα Supernec την πιο κάτω διάταξη:



Σχήμα 4.5: Διάταξη Στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων η οποία θα χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση στο πρόγραμμα Supernec

Ακολουθώς κάνουμε την προσομοίωση και επαληθεύουμε τις απαντήσεις μας με την εφαρμογή των σχέσεων της παραγράφου (4.1) στο λογισμικό Microsoft Excel για ίδια τιμή της συχνότητας ( $f=1800\text{MHz}$ ) και για διάφορες τιμές της απόστασης των στοιχείων ( $d$ ).

Επειδή όμως το Supernec μας δίνει τιμές για το  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$  σε dBi για την στοιχειοκεραία PIFA, θα μετατρέψουμε και εμείς την τιμή της έντασης ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων ( $U(\theta=90^{\circ},\varphi)$  (dBi)) μέσω της σχέσης (4.6), δηλαδή:

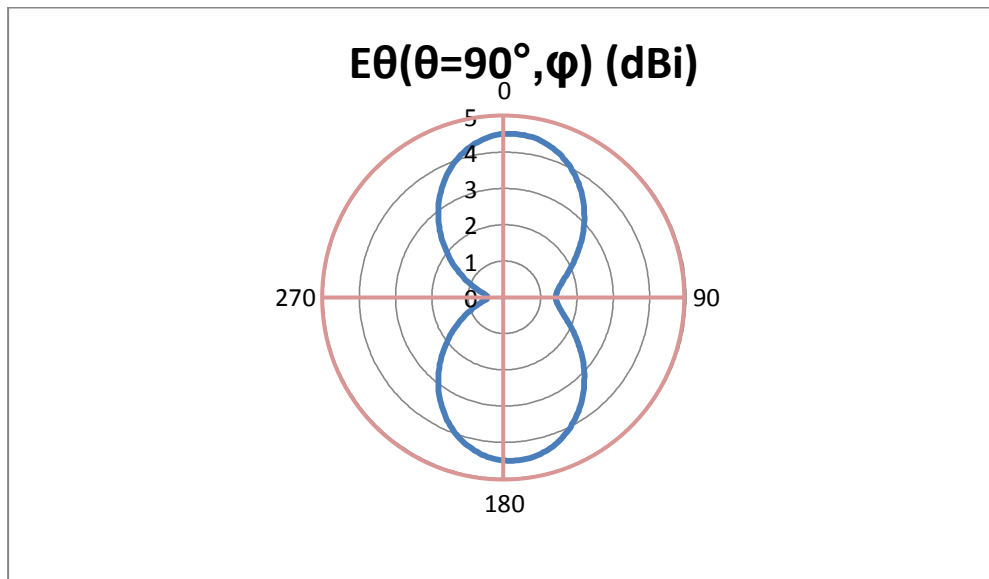
$$U(\theta = 90^{\circ}, \varphi)(dBi) = E_{\theta}(dBi) + E_{\theta}(dBi) - 10 \log(120\pi) \Rightarrow$$

$$E_{\theta}(dBi) = \frac{U(\theta=90^{\circ},\varphi)(dBi)+10 \log(120\pi)}{2} \quad (4.18)$$

οπότεν προκύπτουν και τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$d=\lambda/4$  ( $=0.04175\text{m}$ ):

*Από θεωρία στοιχειοκεραιών:*

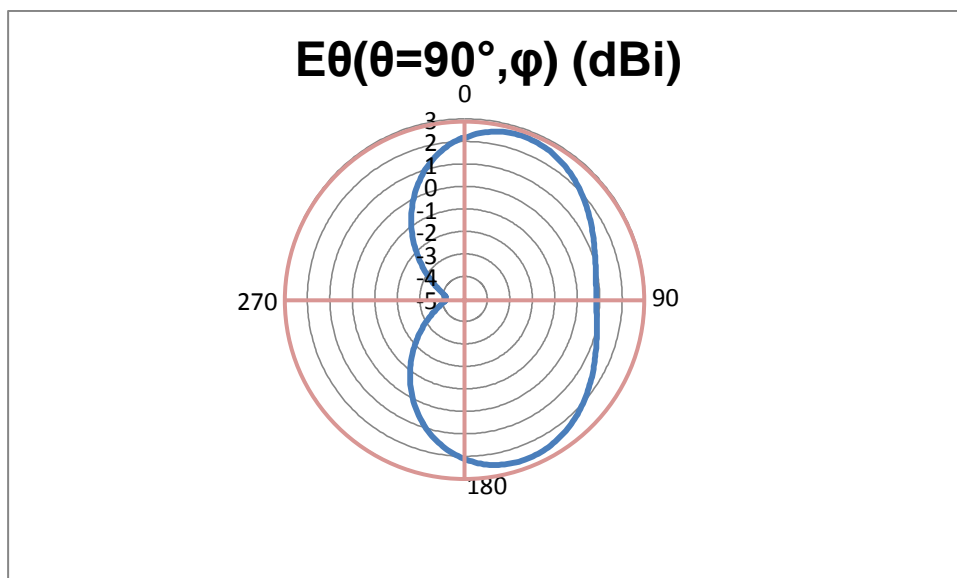


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda/4$  με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel

*Από προσομοίωση στο Sypernec:*

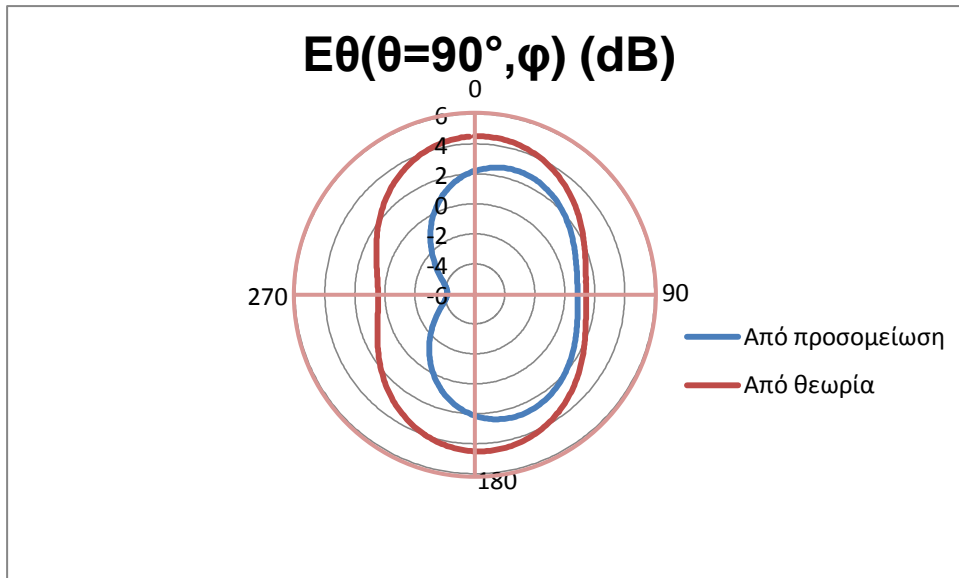
$Z_{in}=32.327-9.093i$

$VSWR=1.6314$



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ},\varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda/4$  με δεδομένα από προσομοίωση στο Sypernec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel

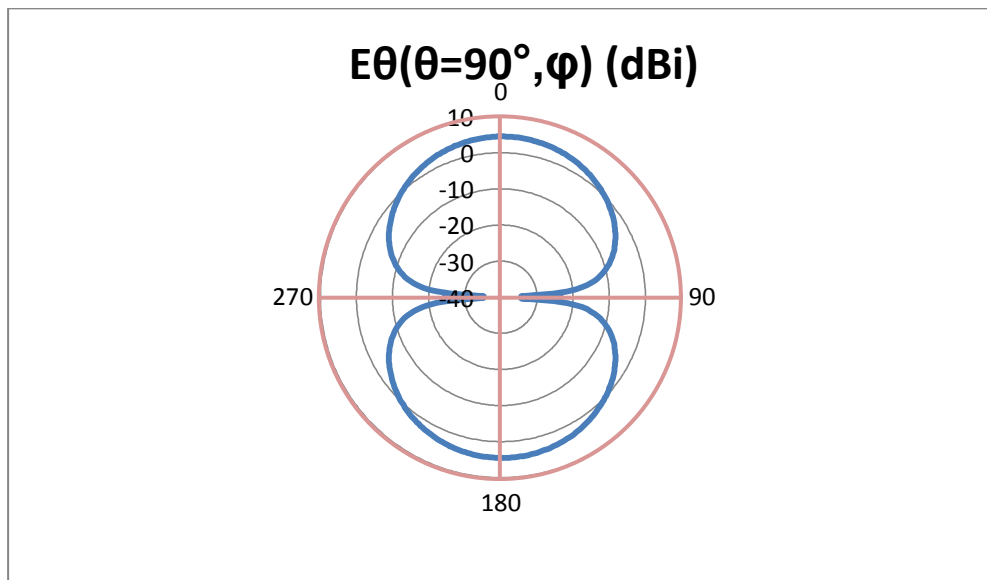




Σχήμα 4.8: Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda/4$  με προσομοίωση στο Supremec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών

**$d=\lambda/2$  (=0.0835m):**

*Από θεωρία στοιχειοκεραιών:*

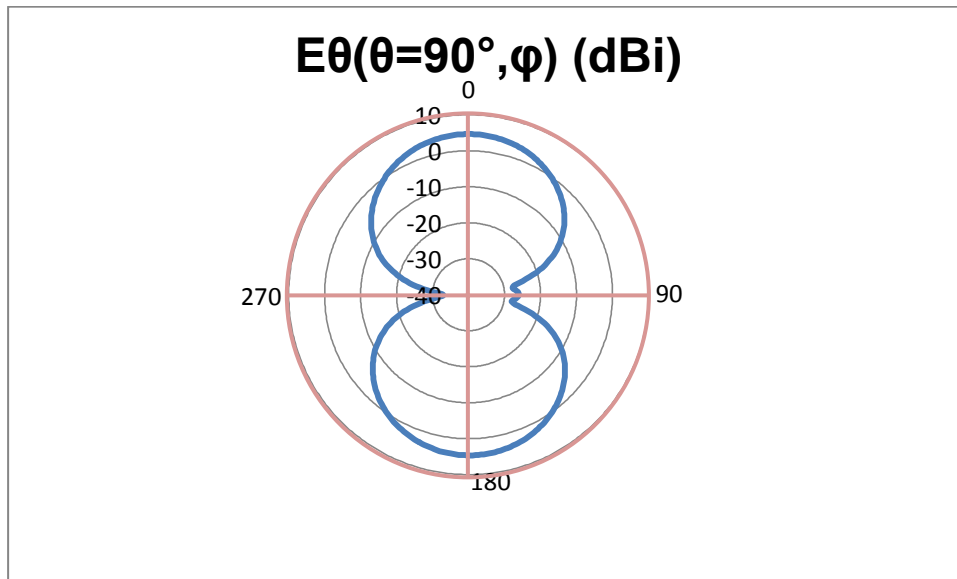


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda/2$  με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel

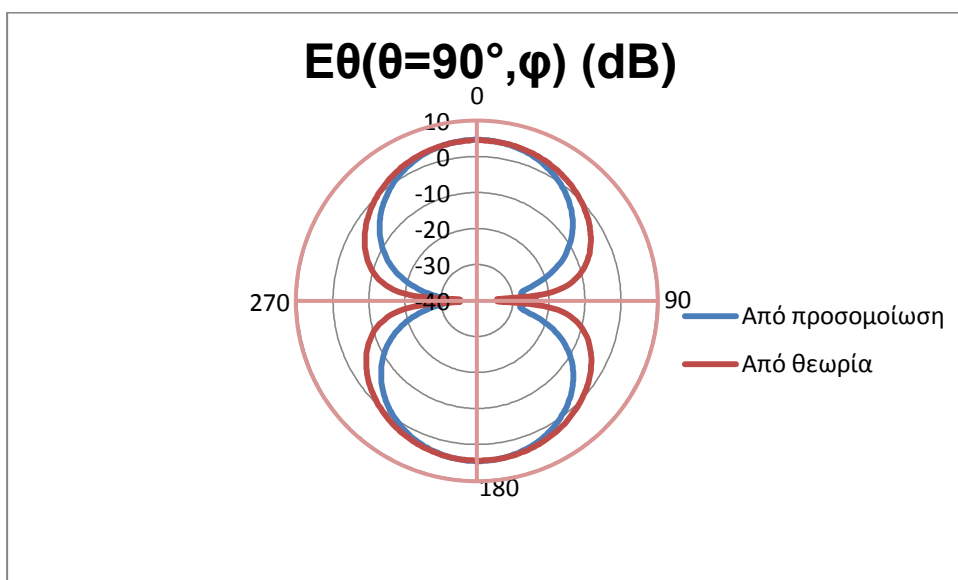
*Από προσομοίωση στο Superneec:*

$Z_{in}=42.443-16.906i$

VSWR=1.4908



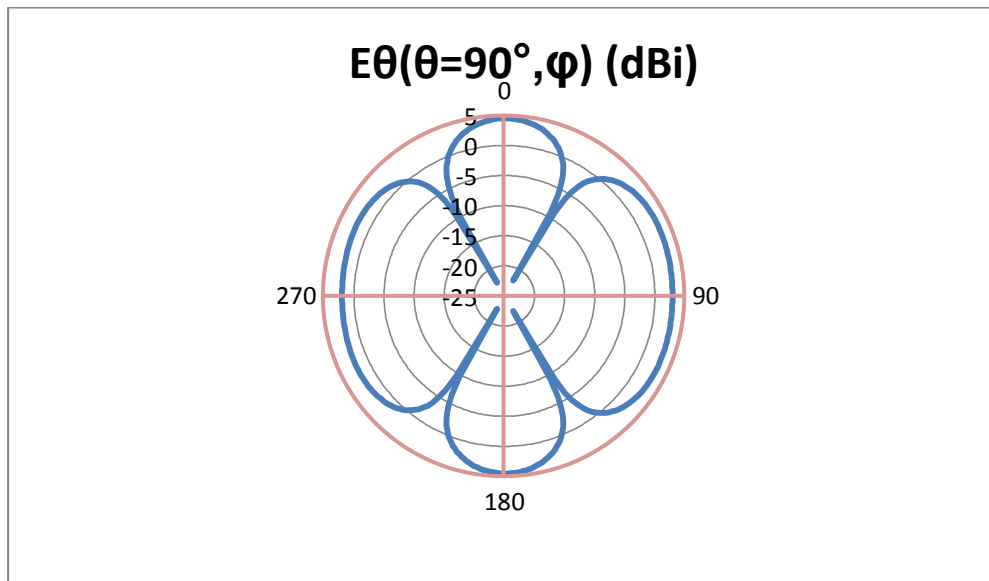
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda/2$  με δεδομένα από προσομοίωση στο Superneec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel



Σχήμα 4.11: Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda/2$  με προσομοίωση στο Superneec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών

**$d=\lambda$  (=0.167m):**

*Από θεωρία στοιχειοκεραιών:*

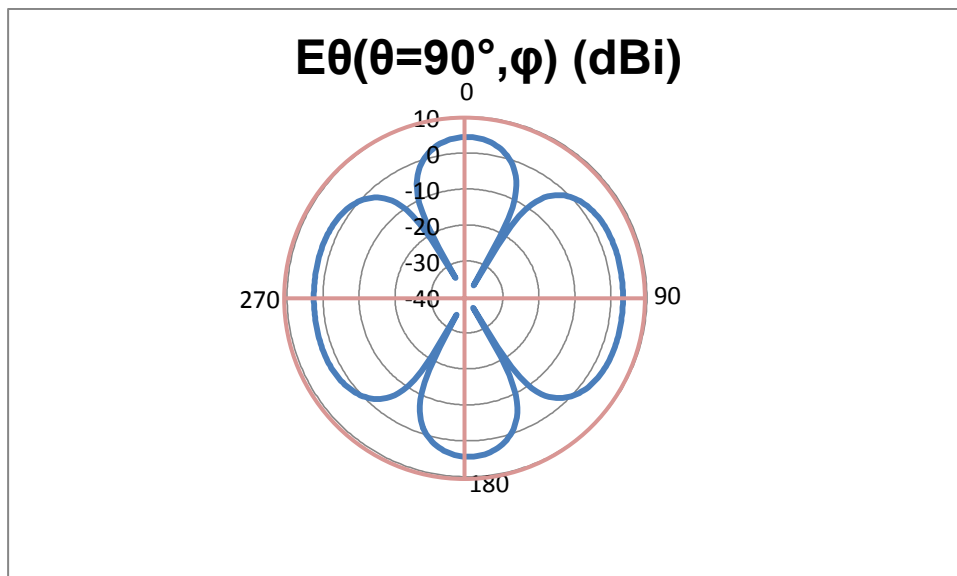


Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}$  ( $\theta=90^{\circ}, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda$  με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel

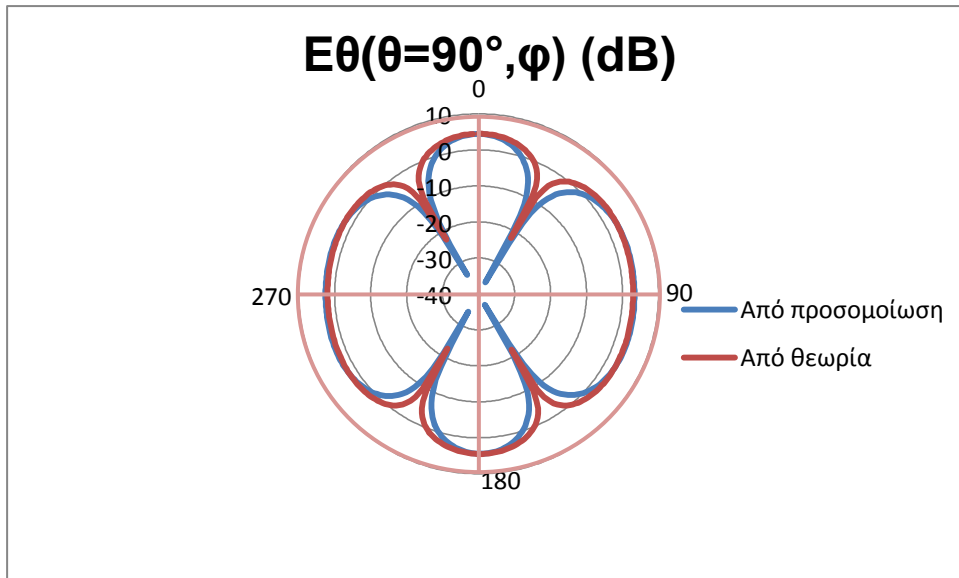
*Από προσομοίωση στο Sypernec:*

$$Z_{in}=41.981+3.5027i$$

$$VSWR=1.2101$$



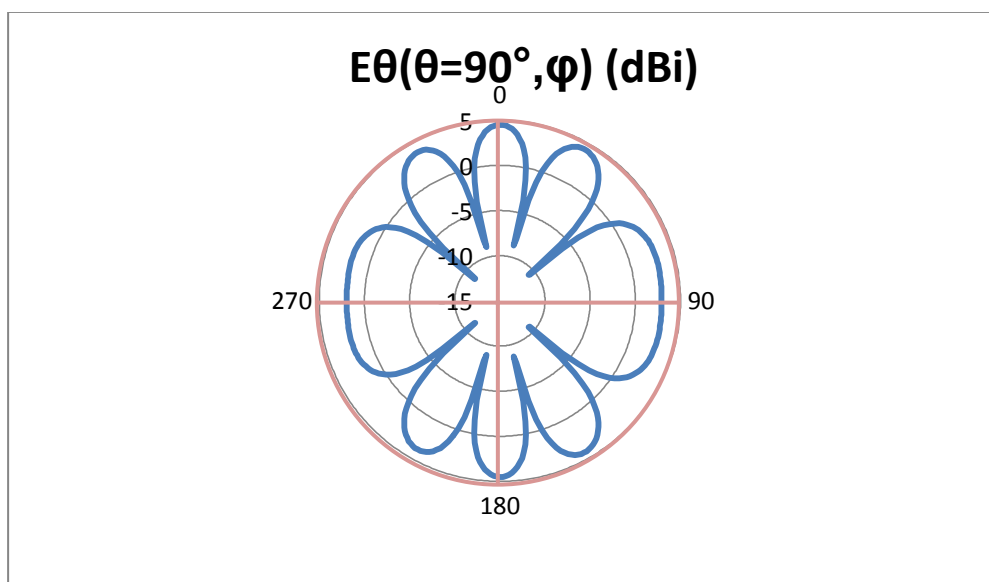
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}$  ( $\theta=90^{\circ}, \varphi$ ) στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda$  με δεδομένα από προσομοίωση στο Sypernec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel



Σχήμα 4.14: Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=\lambda$  με προσομοίωση στο Supremec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών

**$d=2\lambda$  (=0.334m):**

*Από θεωρία στοιχειοκεραιών:*

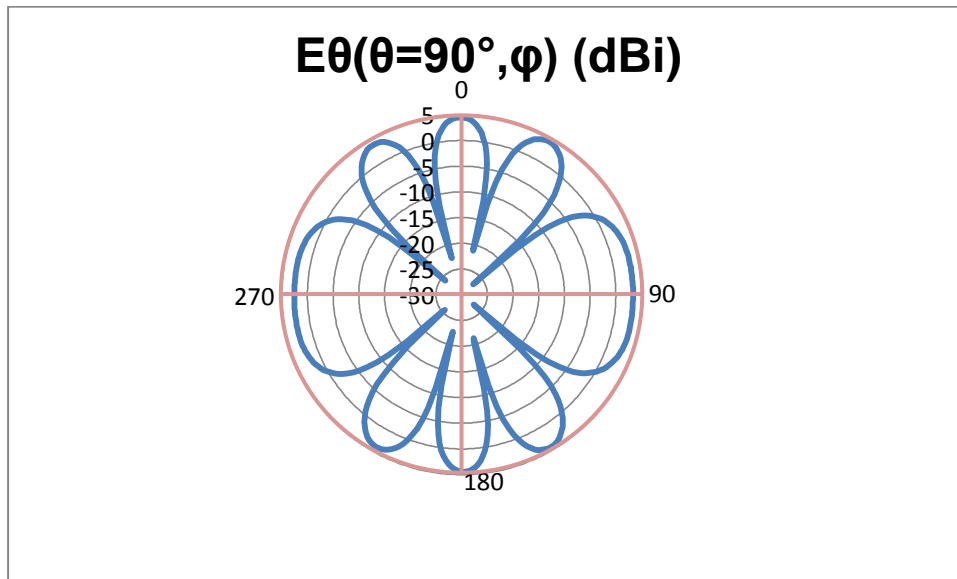


Σχήμα 4.15: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=2\lambda$  με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel

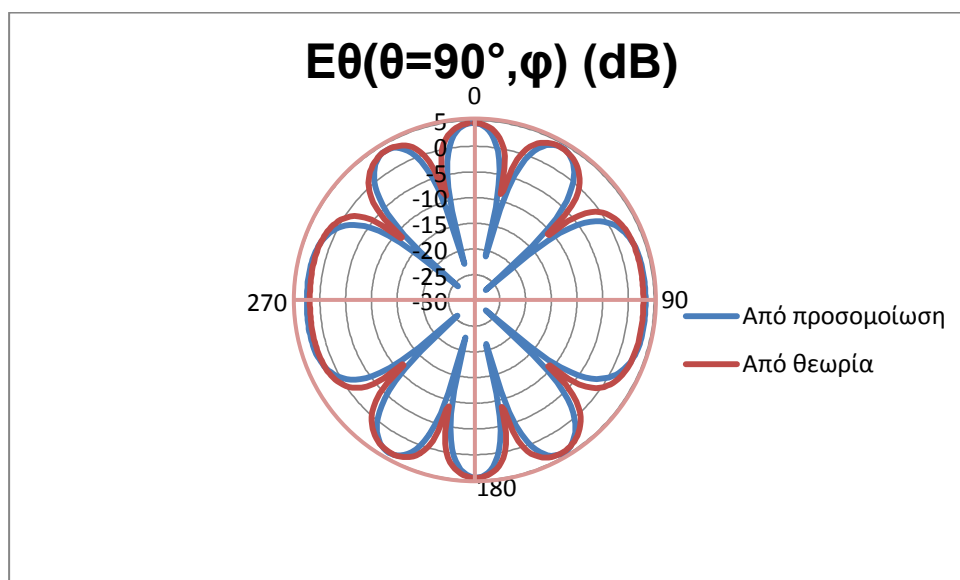
**Από προσομοίωση στο Superneec:**

$Z_{in}=41.889-0.09i$

$VSWR=1.1936$



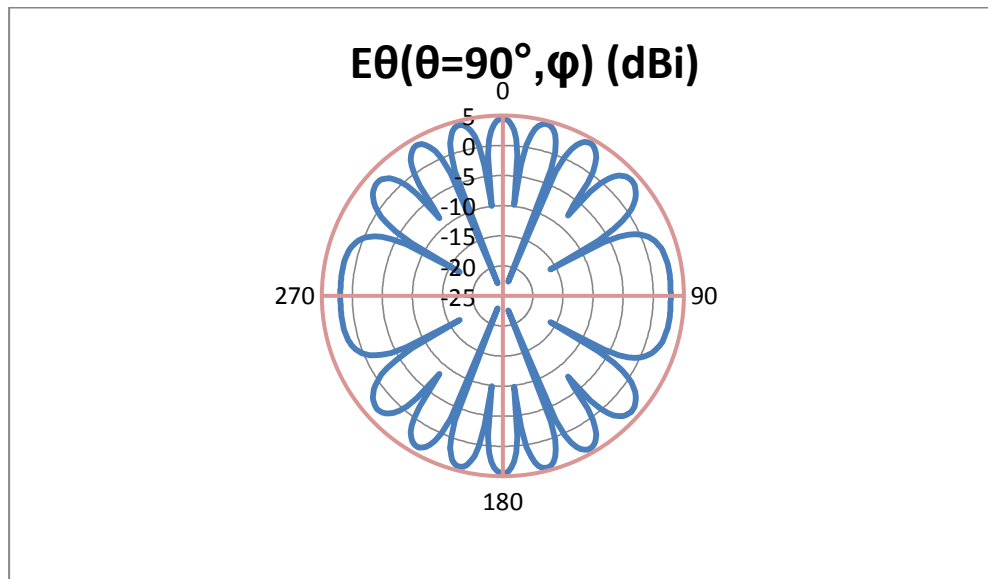
Σχήμα 4.16: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=2\lambda$  με δεδομένα από προσομοίωση στο Superneec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel



Σχήμα 4.17: Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=2\lambda$  με προσομοίωση στο Superneec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών

**$d=4\lambda$  (=0.668m):**

*Από θεωρία στοιχειοκεραιών:*

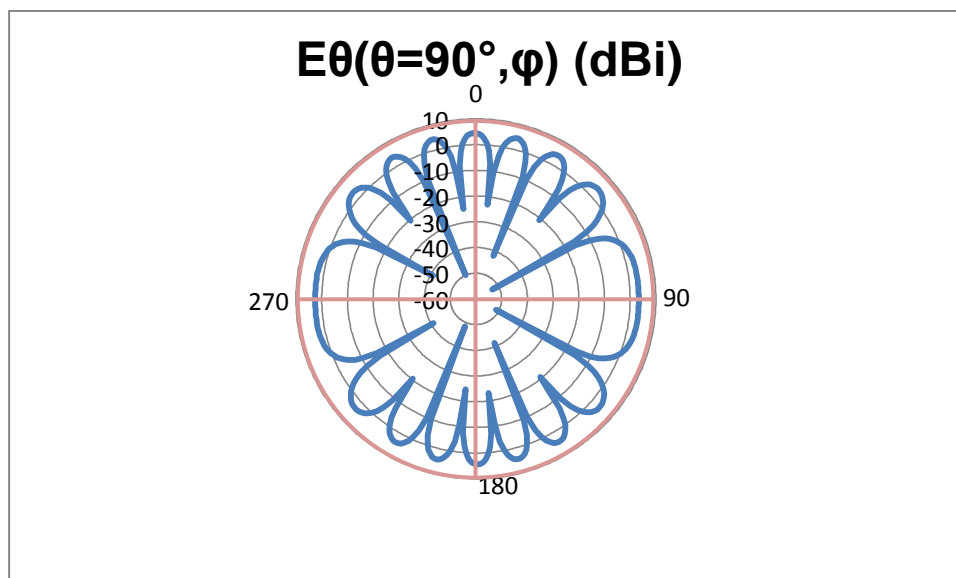


Σχήμα 4.18: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=4\lambda$  με την θεωρία των στοιχειοκεραιών και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel

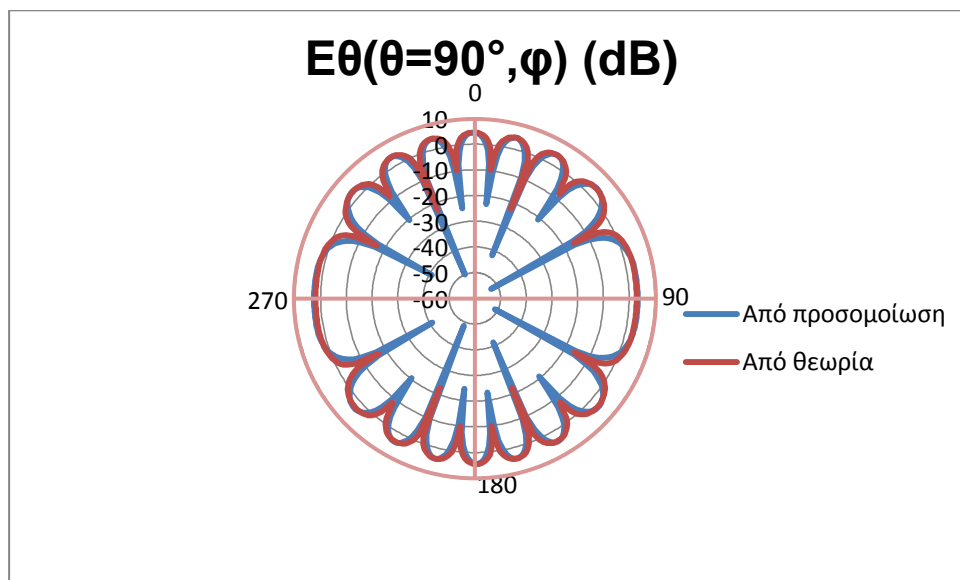
*Από προσομοίωση στο Sypernec:*

$Z_{in}=41.889-1.5947i$

$VSWR=1.1977$



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=4\lambda$  με δεδομένα από προσομοίωση στο SuperNec και την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel



Σχήμα 4.20: Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας  $E_{\theta}(\theta=90^{\circ}, \varphi)$  στοιχειοκεραίας PIFA (2 στοιχείων) για  $d=4\lambda$  με προσομοίωση στο Supermec και με εφαρμογή της θεωρίας των στοιχειοκεραιών

## Κεφάλαιο 5: Μελέτη παράγοντα διάταξης και Διαγράμματος ακτινοβολίας Στοιχειοκεραίας PIFA M - Στοιχείων μέσω της αμοιβαίας αντίστασης

### 5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, για στοιχειοκεραία PIFA 2 στοιχείων οι ρευματικοί συντελεστές των επαγόμενων ρευμάτων στα στοιχεία της στοιχειοκεραίας είναι ίσοι, και αυτό προκύπτει από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (4.9) και (4.10).

Αυτό όμως δεν ισχύει και για στοιχειοκεραία M-στοιχείων, γιατί το σύστημα το οποίο προκύπτει στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} + I_3 Z_{13} + \dots + I_M Z_{1M} \\
 V_2 &= I_1 Z_{21} + I_2 Z_{22} + I_3 Z_{23} + \dots + I_M Z_{2M} \\
 V_3 &= I_1 Z_{31} + I_2 Z_{32} + I_3 Z_{33} + \dots + I_M Z_{3M} \\
 &\dots \\
 V_M &= I_1 Z_{M1} + I_2 Z_{M2} + I_3 Z_{M3} + \dots + I_M Z_{MM}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_M \end{aligned}} \right\} \quad (5.1)$$

[1], [2]

οπότεν είναι φανερό ότι οι ρευματικοί συντελεστές των στοιχείων δεν προκύπτουν ίσοι στην περίπτωση αυτή και δεν μπορεί να μελετηθεί θεωρητικά ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας M – στοιχείων.

Παρατηρώντας όμως το σύστημα των εξισώσεων (5.1) αν μπορέσουμε με κάποιο τρόπο να υπολογίσουμε τις τιμές των αμοιβαίων αντιστάσεων  $Z_{ij}$  και αφού για την διάταξη μας έχουμε όμοιες κεραίες με ίδια τροφοδοσία οπότεν ισχύει:

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_M$$

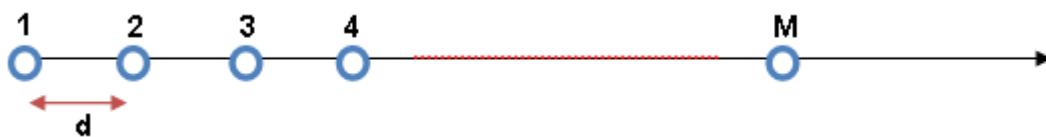


$Z_{11}=Z_{22}=Z_{33}=Z_{44}=Z_{MM}$  = ίδια αντίσταση κεραίας PIFA

τότε θα είναι δυνατή η επίλυση του συστήματος και η εύρεση των ρευμάτων  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_M$  και αντίστοιχα των ρευματικών συντελεστών  $c_m$ , όπου  $m=1,2,3,\dots,M$  και  $M$  τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας.

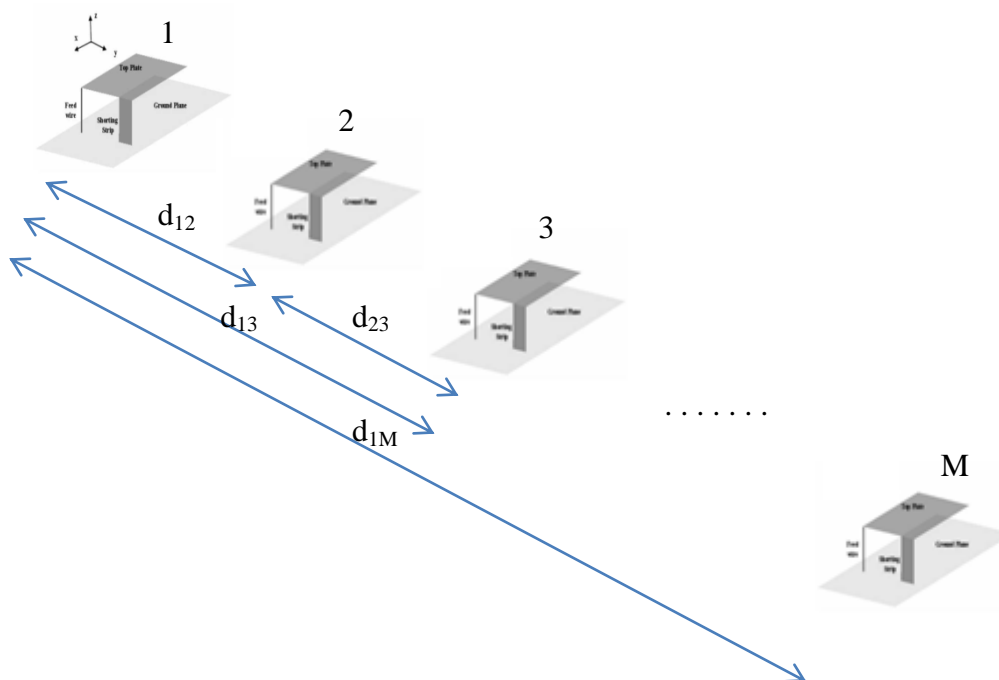
Έτσι από τις σχέσεις (1.1) - (1.4) θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας PIFA  $M$ -στοιχείων με δεδομένο το διάγραμμα ακτινοβολίας της μίας PIFA.

Θεωρούμε την διάταξη της στοιχειοκεραίας μας την εξής:



Σχήμα 5.1: Διάταξη στοιχειοκεραίας με άξονα τον άξονα των  $y$

και για στοιχειοκεραία PIFA :



Σχήμα 5.2: Διάταξη στοιχειοκεραίας PIFA που μελετάται με άξονα τον άξονα των  $y$

Με την βοήθεια του προγράμματος Super nec αν πάρουμε την αντίσταση εισόδου  $Z_{in}$  στοιχειοκεραίας PIFA 2-στοιχείων για διάφορες τιμές του  $d$ , ικανοποιητικές ώστε να τοποθετήσουμε τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας, τότε θα είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την αμοιβαία αντίσταση  $Z_{ij}$  για οποιαδήποτε 2 στοιχεία της στοιχειοκεραίας και σε όποια απόσταση αυτά είναι τοποθετημένα προκύπτοντας έτσι τα ζητούμενα στοιχεία του συστήματος (5.1).

Η σχέση για την αντίσταση εισόδου της κεραίας PIFA 1 είναι ως γνωστό:

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} \quad (5.2)$$

και με εφαρμογή των (4.9) και (4.11) στην (5.2) έχουμε:

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2}{I_1} = Z_{11} + Z_{12} \Rightarrow Z_{12} = Z_{in} - Z_{11} \quad (5.3)$$

## 5.2 Υπολογισμός της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ 2 στοιχείων μιας στοιχειοκεραίας PIFA

Από προσομοίωση στο SUPERNEC υπολογίσαμε την τιμή της ίδιας αντίστασης κεραίας PIFA ( $Z_{11}=Z_{22}=\dots Z_{MM}$ ) και της αντίστασης εισόδου ( $Z_{in}$ ) του 1<sup>ου</sup> στοιχείου στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων για διάφορες τιμές του  $d$  και σύμφωνα και με την σχέση (5.3) προκύπτει:

$$Z_{11}=Z_{22}=Z_{33}=\dots+Z_{MM} = 41.889-3.2728i \text{ (VSWR}=1.2102)$$

$$f=1800\text{MHz}$$

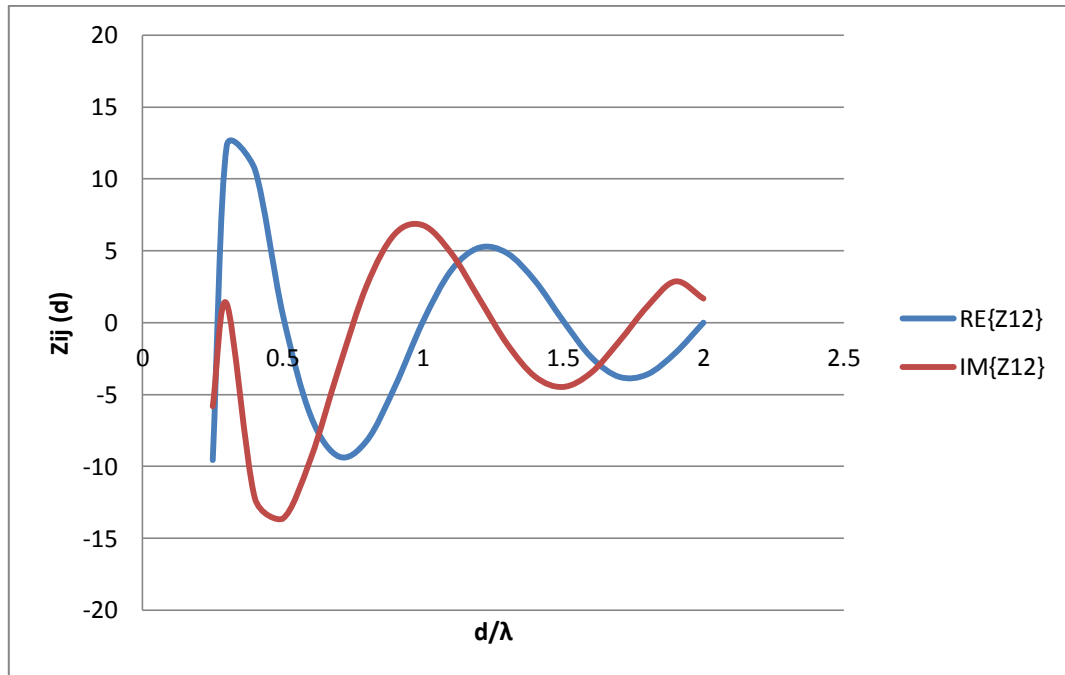
$$\lambda=0.167\text{m}$$

<b>d (m)</b>	<b>d x λ (m)</b>	<b>RE {Zin}</b>	<b>IM {Zin}</b>	<b>RE {Z12}</b>	<b>IM {Z12}</b>
0.1λ	0.0167	x	x	x	x
0.2λ	0.0334	x	x	x	x
0.25λ	0.04175	32.327	-9.093	-9.562	-5.8202
0.3λ	0.0501	54.191	-1.9677	12.302	1.3051
0.4λ	0.0668	52.572	-15.471	10.683	-12.1982
0.5λ	0.0835	42.443	-16.906	0.554	-13.6332
0.6λ	0.1002	35.368	-12.7	-6.521	-9.4272
0.7λ	0.1169	32.572	-6.4397	-9.317	-3.1669
0.8λ	0.1336	33.691	-0.6514	-8.198	2.6214
0.9λ	0.1503	37.448	2.9103	-4.441	6.1831
1λ	0.167	41.981	3.5027	0.092	6.7755
1.1λ	0.1837	45.514	1.5806	3.625	4.8534
1.2λ	0.2004	47.102	-1.5853	5.213	1.6875
1.3λ	0.2171	46.723	-4.7603	4.834	-1.4875
1.4λ	0.2338	44.777	-7.0351	2.888	-3.7623
1.5λ	0.2505	42.009	-7.745	0.12	-4.4722
1.6λ	0.2672	39.48	-6.746	-2.409	-3.4732
1.7λ	0.2839	38.115	-4.5677	-3.774	-1.2949
1.8λ	0.3006	38.294	-2.142	-3.595	1.1308
1.9λ	0.3173	39.787	-0.4009	-2.102	2.8719
2λ	0.334	41.889	-1.5947	0	1.6781

Πίνακας 5.1: Υπολογισμός αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ 2 στοιχείων στοιχειοκεραίας PIFA με δεδομένο το Zin από το Super nec για διάφορες τιμές του d και με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel

Να αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι οι τιμές των αποστάσεων 0.1λ και 0.2λ δεν λήφθηκαν υπόψη για τον υπολογισμό της αμοιβαίας αντίστασης γιατί οι αποστάσεις είναι πολύ μικρές οπότεν για να γίνει η προσομοίωση στο Super nec θα έπρεπε οι δύο κεραίες PIFA από τις

οποίες παίρνουμε και τα αποτελέσματα να επικαλύπτονται, έτσι οι μετρήσεις μας δεν θα ήταν αξιόπιστες. Η πρώτη μέτρηση στην οποία οι δύο κεραίες δεν επικαλύπτονται είναι η τιμή  $0.25\lambda$  από την οποία ξεκινά και το διάγραμμα που προκύπτει από τον πίνακα 5.1:



Σχήμα 5.3: Αμοιβαία αντίσταση εισόδου μεταξύ 2 στοιχείων στοιχειοκεραίας PIFA συναρτήσει της απόστασης που βρίσκονται τα στοιχεία

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Από την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καταλήγουμε στα πιο κάτω συμπεράσματα :

- 1) Γίνεται σαφές από τα πιο πάνω αποτελέσματα ότι η θεωρία των στοιχειοκεραιών επαληθεύεται και για τις κεραίες PIFA, αφού τα διαγράμματα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας PIFA 2 στοιχείων που προέκυψαν από την θεωρία προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα διαγράμματα που προκύπτουν από την προσομοίωση στο Superneec όπως ξεκάθαρα φαίνεται και στην σχήματα 4.6 έως 4.20.
- 2) Οι ελάχιστες αποκλίσεις που παρατηρούνται στην μορφή των διαγραμμάτων της παραγράφου (4.3) οφείλονται στην αμοιβαία αντίσταση (mutual coupling) που επάγεται μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Η απόκλιση αυτή είναι σαφώς μεγαλύτερη στις κοντινές αποστάσεις των 2 στοιχείων της στοιχειοκεραίας PIFA που μελετάμε ( $d=\lambda/4, \lambda/2$ ) και ελάχιστη για μεγαλύτερες αποστάσεις ( $d=\lambda, 2\lambda, 4\lambda$ ). Αυτό οφείλεται στο ότι η αμοιβαία αντίσταση επηρεάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας όσο πιο κοντά μεταξύ τους είναι τα στοιχεία της προσθέτοντας μεγαλύτερες απώλειες. Το γεγονός αυτό δεν φαίνεται από την θεωρία των στοιχειοκεραιών και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αγνοήσαμε την αμοιβαία αντίσταση για στοιχειοκεραία 2 στοιχείων όπως εξηγήσαμε και στην παράγραφο (4.1) πράγμα το οποίο όμως λαμβάνεται υπόψη από την προσομοίωση.
- 3) Μία άλλη παρατήρηση που προκύπτει είναι ότι η αμοιβαία αντίσταση μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας επηρεάζει όπως αναφέρθηκε και την αντίσταση εισόδου στα στοιχεία της στοιχειοκεραίας και η μεταβολή αυτή φαίνεται και από τα στοιχεία της προσομοίωσης που πήραμε στην παράγραφο (4.3) αφού η αντίσταση εισόδου ( $Z_{in}$ ) μεταβάλλεται έντονα για μικρές τιμές της απόστασης ( $d=\lambda/4, \lambda/2$ ) και σχεδόν καθόλου όσο προχωράμε σε μεγαλύτερες αποστάσεις ( $d=2\lambda, 4\lambda$ ).
- 4) Τις τιμές 0.1λ και 0.2λ δεν τις χρησιμοποιήσαμε στους υπολογισμούς μας στον πίνακα 5.1 για τον λόγο ότι οι αποστάσεις είναι πολύ κοντινές και οι κεραίες επικαλύπτονται και επόμενος οι τιμές της αντίστασης εισόδου από την προσομοίωση δεν ήταν ακριβείς.

- 5) Υπολογίζοντας την τιμή της αμοιβαίας αντίστασης  $Z_{ij}$  για οποιαδήποτε 2 στοιχεία της στοιχειοκεραίας PIFA από την παράγραφο (5.2) της διάταξης του σχήματος (5.2) θα έχουμε την δυνατότητα με την επίλυση τους συστήματος (5.1) να υπολογίσουμε τους ρευματικούς συντελεστές των  $M$  στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Έτσι θα μπορούμε να υπολογίσουμε τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας και να καταλήξουμε σε οποιοδήποτε διάγραμμα ακτινοβολίας επιθυμούμε, μεταβάλλοντας τις αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων της αφού η διέγερση των στοιχείων θα παραμένει σταθερή.
- 6) Συνεχίζοντας ακόμη παραπέρα την μελέτη που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία αν μεταβάλουμε την φάση στην διέγερση των στοιχείων της στοιχειοκεραίας PIFA που αναλύσαμε τότε θα ήταν δυνατή και η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας. Έτσι έκτος από την ευχέρεια δημιουργίας οποιουδήποτε διαγράμματος ακτινοβολίας επιθυμούμε, με στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας θα ήταν δυνατόν να δημιουργηθεί μια ευφυής στοιχειοκεραία PIFA (smart antenna).

## Βιβλιογραφία

- [1] Χ.Καψάλης, Π.Κωττής ΚΕΡΑΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ 2008
- [2] CONSTANTINE A. BALANIS, ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN SECOND EDITION, John Wiley & Sons, Inc 1982, 1997
- [3] Πισιμίσης Δημήτρης, ΕΞΥΠΙΝΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ, Διπλωματική εργασία
- [4] H. F. AbuTarboush, R. Nilavalan, D. Budimir and H. S. AI-Raweshidy, Compact Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for WiMAX Application, Brunel University 2009
- [5] Kanchan Mishra (03010242), Deepak Garg (03010214), Mohit Jaju (03010222), Design of a Compact PIFA for PCS Applications, Department of Electronics and Communication Engineering-Indian Institute of Technology, Guwahati (India)
- [6] Αμανατίδου-Τοτικίδου Άννα, ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ΥΠΕΡΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ, Διπλωματική εργασία
- [7] Κόλλια Λ. Ελένη, Σχεδίαση και ανάλυση UWB κεραιών με τη χρήση του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης SuperNEC. Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της κεραίας με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, Διπλωματική εργασία
- [8] Kin-Lu Wong, Planar Antennas for Wireless Communications, John Wiley & Sons, Inc 2003
- [9] Julian Rosu, PIFA – Planar Inverted F Antenna, YO3DAC / VA3IUL
- [10] Dalia Mohammed Nashaat, Hala A. Elsadek, Member, IEEE, and Hani Ghali, Member, IEEE, Single Feed Compact Quad-Band PIFA Antenna for Wireless Communication Applications, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 53, NO. 8, AUGUST 2005
- [11] Qiong Wang Dirk Plettemeier, Hui Zhang, Klaus Wolf and Eckhard Ohlmer, Design and Diversity Performance of Optimized Dual-Element PIFA antennas for MIMO Handsets, Downloaded on June 07,2010 at 12:17:25 UTC from IEEE Xplore
- [12] A. Fourie and D. Nitch, “SuperNEC: antenna and indoor-propagation simulation program,” IEEE Antennas and Propagat. Mag., vol. 42, no. 3, pp. 31-48, June 2000
- [13] ] SuperNec v. 2.4 Reference Manuals
- [14] Γεωργία Ι. Βερυκάκη, Χρυσούλα Α. Παπαγιάννη, Βελτιστοποίηση Σχεδίασης Ευφούς Κεραίας Με Τη Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων, Διπλωματική εργασία
- [15] K. L. Virga and Y. Rahmat – Samii, “Low – Profile Enhanced – Bandwidth PIFA Antennas for Wireless Communications Packaging,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, no 10, pp.1879 – 1888, Oct. 1997
- [16] Y. B. Kwon, J. I. Moon and S. O. Park, “An Internal Triple – Band Planar Inverted – F Antenna,” IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett., vol. 2, pp. 341 – 344, 2003
- [17] Z. D. Liu, P.S. Hall and D. Wake, “Dual – Frequency Planar Inverted – F Antenna,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 45, no. 10, pp. 1451 – 1458, Oct. 1997
- [18] D. Qi, B. Li and H. Liu, “Compact Triple – Band Planar Inverted – F Antenna for Mobile Handsets,” Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 41, no 6, pp. 483 – 486, June 2004
- [19] P. Salonen, M. Keskilamni and M. Kivikoski, “New Slot Configurations for Dual – Band Planar Inverted – F Antenna,” Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 28, no 5, pp.

293 – 298, Mar. 2001

- [20] M. F. Abedin and M. Ali, “Modifying the Ground Plane and Its Effect on Planar Inverted – F Antennas (PIFAs) for Mobile Phone Handsets,” *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 2, pp. 226 – 229, 2003
- [21] N. K. Kouveliotis, S. C. Panagiotou, P. K. Varlamos, T. D. Dimousios and C. N. Capsalis, “Optimizing a PIFA using a Genetic Algorithms Approach,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications.*, vol. 22, pp. 453 – 461, 2008
- [22] Orchard, B., “Optimising Algorithms for Antenna Design”, MSc Dissertation, University of the Witwatersrand, 2002
- [23] Stylianos C. Panagiotou , Nikolaos K. Kouveliotis, Themistoklis D. Dimousios, Pantelis K. Varlamos, Stelios A. Mitilineos and Christos N. Capsalis, A PIFA – PARASITIC OPTIMIZATION UTILIZING THE GENETIC ALGORITHMS TECHNIQUE, National Technical University of Athens School of Electrical and Computer Engineering
- [24] T. D. Dimousios, C. D. Nikolopoulos, S. A. Mitilineos, C. N. Capsalis, A NEW LOW-PROFILE AND COST SPA-PIFA FOR MOBILE 2.4GHZ ISM APPLICATIONS, *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 24, 881–891, 2010
- [25] C. D. Nikolopoulos, C. I. Tsitouri, T. D. Dimousios, and C. N. Capsalis, A Compact Single Feed, Low Cost Broadband Switched-beam Antenna for Mobile Wimax Applications, Division of Information Transmission Systems and Material Technology School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, Greece
- [26] C.D.Nikolopoulos, C.N.Capsalis, The Impact of Corrugations in optimized Planar Inverted F Antennas (PIFA’s), School of Electrical and Computer Engineering Division of Information Transmission Systems and Material Technology National Technical University of Athens, Greece
- [27] Preston, S. L., D. V. Thiel, T. A. Smith, S. G. O’Keefe, and J. W. Lu, \Basestation tracking in mobile communications using a switched parasitic antenna array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 46, No. 6, 841{844, June 1998.