



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

***Μελέτη και προσομοίωση του φαινομένου των  
πτυχώσεων ή σχισμών στη συμπεριφορά των  
χαρακτηριστικών της κεραίας PIFA και  
βελτιστοποίησή της με χρήση γενετικών  
αλγορίθμων στη συχνότητα του προτύπου DVB-T***

Διπλωματική Εργασία

Στραβοσκούφης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

***Μελέτη και προσομοίωση του φαινομένου των  
πτυχώσεων ή σχισμών στη συμπεριφορά των  
χαρακτηριστικών της κεραίας PIFA και  
βελτιστοποίησή της με χρήση γενετικών  
αλγορίθμων στη συχνότητα του προτύπου DVB-T***

Διπλωματική Εργασία

Στραβοσκούφης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την ..../..../2012

.....  
Καψάλης Χρήστος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωττής Παναγιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φικιώρης Γεώργιος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....  
Κωνσταντίνος Δ. Στραβοσκούφης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών  
Ε.Μ.Π.

**Copyright © Κωνσταντίνος Δ. Στραβοσκούφης, 2012**  
**Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.**

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

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

## Περίληψη

Η ραγδαία ανάπτυξη των ασυρμάτων επικοινωνιών που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια καθώς και των υπηρεσιών και εφαρμογών που συνεχώς αναπτύσσονται, έχουν δημιουργήσει μεγαλύτερες απαιτήσεις από τις κεραίες των τερματικών. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί κεραίες που παρουσιάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως μεγάλο εύρος ζώνης, καλή προσαρμογή (χαμηλό λόγο στάσιμων κυμάτων) στη συχνότητα ενδιαφέροντος, και υψηλή απολαβή, ειδικά για κινητές λήψεις. Η επίπεδη κεραία ανεστραμμένου-F (PIFA) αποτελεί μια καλή επιλογή ικανοποιώντας αρκετές από τις παραπάνω απαιτήσεις έχοντας επιπροσθέτως, χαμηλό κόστος και πολυπλοκότητα κατασκευής. Επίσης, για να είναι δυνατή η βελτίωση κάποιων χαρακτηριστικών των υπό χρήση κεραιών έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, όπως η προσθήκη σχισμών ή πτυχώσεων.

Η ψηφιακή τηλεόραση αντικαθιστά πλέον την παλιά αναλογική, προσφέροντας πολλές επιπλέον δυνατότητες στο χρήστη. Η υπηρεσία που προσφέρει είναι καλύτερης ποιότητας σε εικόνα και ήχο, ενώ λόγω συμπίεσης του τηλεοπτικού προγράμματος εξοικονομείται εύρος ζώνης. Ενόψει, βέβαια και του switch-off της αναλογικής εκπομπής σήματος (στο σταθμό βάσης του Υμηττού έγινε τον Αύγουστο του 2012), η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση (DVB-T) αποτελεί ελκυστικό τομέα για ανάπτυξη νέων συστημάτων κεραιών. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι με την εξοικονόμηση εύρους ζώνης που θα προκύψει μένει κενό ένα διάστημα της ζώνης συχνοτήτων 470 – 862 MHz που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα, το οποίο καλείται ψηφιακό μερίσμα και για την Ευρώπη έχει προβλεφτεί να καλύπτει τις συχνότητες 790 – 862 MHz.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να αναπτυχθεί μια δομή κεραίας PIFA, η οποία μπορεί να λαμβάνει στη ζώνη συχνοτήτων 470 – 862 MHz, την οποία χρησιμοποιεί το πρότυπο DVB-T. Επίσης, η προσπάθεια αυτή έγινε για την κάλυψη του ψηφιακού μερίσματος (790 – 862 MHz στην Ευρώπη, 698 – 862 MHz στην Αμερική και την Ασία). Για να επιτευχθεί αυτό μελετήθηκε και η επίδραση από την προσθήκη σχισμών ή πτυχώσεων στη διάταξη, και το πώς αυτή επηρεάζει χαρακτηριστικά όπως το εύρος ζώνης, την προσαρμογή και την απολαβή. Για την υλοποίηση της κεραίας χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα SuperNEC, ενώ η βελτιστοποίηση έγινε με χρήση του ενσωματωμένου στο SuperNEC, λογισμικού γενετικών αλγόριθμων GA Optimiser.

Στο κεφάλαιο 1, λοιπόν, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τις PIFA, ενώ παραθέτονται και κάποιες εφαρμογές τους.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται το πρότυπο της επίγεια ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T), δίνεται έμφαση στο κομμάτι του ψηφιακού μερίσματος, ενώ περιγράφονται και οι γνωσιακές ραδιοεπικοινωνίες (cognitive radios)

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η εφαρμογή σχισμών ή πτυχώσεων σε κεραίες (Corrugations).

Στα κεφάλαια 4 και 5 περιγράφονται οι γενετικοί αλγόριθμοι και η λειτουργία του SuperNEC, αντίστοιχα.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, και αναλύονται ανά περίπτωση οι επιδράσεις των σχισμών (corrugations) στην κεραία PIFA.

**Λέξεις κλειδιά :** Επίπεδη Κεραία Ανεστραμμένου-F, Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση, Ψηφιακό Μέρισμα, Γνωσιακές Ραδιοεπικοινωνίες, Πτυχώσεις και Σχισμές σε κεραίες, Γενετικοί Αλγόριθμοι

## Abstract

The rapid growth of wireless communications has been made in recent years, as well as services and applications constantly being developed, have created a greater demand on the antennas of terminals. Therefore there have been deployed antennas with specific characteristics such as wide bandwidth, good impedance matching (low standing wave ratio) in the frequency of interest, and high gain, especially for mobile receivers. The Planar Inverted-F Antenna (PIFA) is a good choice to satisfy many of these requirements having additionally, low manufacturing cost and complexity. Also, various techniques such as the addition of slots or corrugations have been developed, in order to improve some characteristics of antennas.

Digital TV now replaces old analog transmission, offering several additional features to the user. The new service offer better picture and sound quality, while compressing the data of the television program saves bandwidth. Furthermore, waiting the switch-off of analogue broadcasting signal (at the base station of Hymettus it happened in August of 2012), the digital terrestrial television (DVB-T) is an attractive area for development of new antenna systems. This is reinforced by the fact that due to the bandwidth savings white spaces or an entire, narrow, empty band in spectrum will occur among frequencies 470 - 862 MHz used so far, which is called digital dividend and in Europe is predicted to cover the frequencies 790 - 862 MHz.

In this diploma thesis an attempt was made to develop a PIFA structure, which operate in the band of 470 - 862 MHz, used by the DVB-T standard. Also, an attempt was made to cover the digital dividend (790 - 862 MHz in Europe, 698 - 862 MHz in the Americas and Asia). To achieve this, we studied the effect of adding slots or corrugations in the layout, and how this affects characteristics such as bandwidth, impedance matching and gain. To implement the antenna, SuperNEC platform was used, while optimization was performed using the built-in SuperNEC, software genetic algorithms GA Optimiser.

In chapter 1, the theoretical background of PIFA is presented, while some applications are mentioned.

In Chapter 2, the model of digital terrestrial television (DVB-T) is explained, emphasizing the part of the digital dividend and explaining cognitive radios.

In Chapter 3 the implementation of slots and corrugation in antennas is examined, through various applications

In Chapters 4 and 5 the genetic algorithms and function of SuperNEC are described, respectively.

Chapter 6 presents the results obtained from the optimizations and simulations as well, the effects on the antenna PIFA of the slots (or corrugations) is analyzed in each case.

**Key Words:** Planar Inverted F Antenna (PIFA), DVB-T, Digital Dividend, Cognitive Radios, Corrugations and Slots in Antennas, Genetic Algorithms





## **Ευχαριστίες**

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Χρήστο Καψάλη, τόσο για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του που τις παρέχει απλόχερα, όσο και για τις απαραίτητες γνώσεις για την ολοκλήρωση της εργασίας, που μου παρείχε στα μαθήματά του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Χρήστο Νικολόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Μ.Π., που ήταν κάθε στιγμή διαθέσιμος να απαντήσει κάθε απορία μου και να λύσει όποιο πρόβλημα μπορεί να παρουσιαζόταν με υπομονή.

Ακόμα ένα ευχαριστώ πάει στους φίλους μου και σε όλους τους δικούς μου ανθρώπους που με υπομένουν και με συμβουλεύουν συνεχώς.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τους γονείς μου που μου παρείχαν κάθε υλική και ηθική υποστήριξη και βοήθησαν με τον τρόπο αυτό τα μέγιστα στην περάτωση των σπουδών μου.

Κωνσταντίνος Δ. Στραβοσκούφης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός  
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.



# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	5
Abstract .....	7
Ευχαριστίες .....	9
Ευρετήριο Σχημάτων .....	15
Ευρετήριο Πινάκων .....	21
<b>Κεφάλαιο 1.....</b>	<b>23</b>
<b>Επίπεδη Κεραία Ανεστραμμένου F (Planar Inverted F Antenna- PIFA).....</b>	<b>23</b>
1.1 Εισαγωγή .....	23
1.2 Ιστορική Αναδρομή .....	23
1.3 Γεωμετρία κεραίας PIFA (Planar Inverted F Antenna) .....	26
1.4 Λειτουργία PIFA .....	27
1.4.1 Γενικά στοιχεία .....	27
1.4.2 Κατανομή Ηλεκτρικού Πεδίου .....	27
1.4.3 Κατανομή Ηλεκτρικού Ρεύματος .....	28
1.4.4 Συχνότητα Συντονισμού .....	28
1.4.5 Προσαρμογή .....	29
1.4.6 Διάγραμμα Ακτινοβολίας.....	29
1.4.7 Τεχνικές Αύξησης του Εύρους Ζώνης .....	29
1.4.8 Πλεονεκτήματα Χρήσης PIFA.....	29
1.5 Εφαρμογές PIFA .....	30
1.5.1 PIFA με 4 σχισμές για WiMAX εφαρμογές.....	30
1.5.2 PIFA με βραχίονες για εφαρμογές WiMAX.....	32
1.5.3 Απλά τροφοδοτούμενη PIFA τετραπλής ζώνης για ασύρματες εφαρμογές .....	35
1.5.4 Ενσωματωμένη PIFA τριπλής ζώνης για ασύρματα τερματικά .....	38
1.5.5 Κεραία PIFA χαμηλού κόστους, μεταγωγής για εφαρμογές WiMAX .....	41
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>	<b>43</b>
<b>Επίγεια Ψηφιακή Μετάδοση Βίντεο-(Digital Video Broadcasting Terrestrial, DVB-T).....</b>	<b>43</b>
2.1 Εισαγωγή .....	43
2.2 Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση .....	43
2.3 Το πρότυπο DVB-T .....	45
2.3.1 Ιστορική Αναδρομή για το DVB.....	45
2.3.2 Το πρότυπο DVB-T .....	47
2.3.3 Τρόπος Λειτουργίας του DVB-T .....	49
2.3.4 Επιλογή Σχήματος Διαμόρφωσης και Ρυθμού Κωδικοποίησης .....	51
2.3.5 Επιλογή Διαστήματος Φύλαξης .....	53
2.3.6 Επιλογή μεταξύ Ιεραρχικού και Μη-Ιεραρχικού τρόπου Μετάδοσης.....	55
2.3.7 Τύποι Δικτύων στην Ψηφιακή Τηλεόραση .....	56
2.4 Ψηφιακό Μέρισμα .....	58
2.4.1 Εισαγωγή στη ζώνη UHF .....	58
2.4.2 Το ψηφιακό μέρισμα και οι πιθανές χρήσεις του .....	59
2.4.3 Τεχνικοί κανονισμοί για τη χρήση των συχνοτήτων 790-862 MHz .....	59
2.5 Γνωσιακές Ραδιοεπικοινωνίες (Cognitive Radios) .....	60
2.5.1 Εισαγωγή.....	60

2.5.2 Χρησιμοποίηση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων .....	60
2.5.3 Δυναμική Εκχώρηση Φάσματος .....	61
2.5.4 Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών (Cognitive Radios) .....	62
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>	<b>65</b>
<b>Χρήση σχισμών ή πτυχώσεων σε διατάξεις κεραιών .....</b>	<b>65</b>
3.1 Εισαγωγή.....	65
3.2 Σχισμές σε κεραιές PIFA.....	65
3.2.1 Πλεονεκτήματα σχισμών σε PIFA .....	65
3.2.2 Σχισμές σε PIFA περιμετρικά της άνω και κάτω πλάκας για τη συχνότητα των 2.4 GHz ....	66
3.2.3 Σχισμές σε PIFA περιμετρικά της άνω και κάτω πλάκας για τη συχνότητα των 790 MHz ..	69
3.2.4 Εφαρμογή σχισμών στην κάτω πλάκα μιας PIFA.....	70
3.3 Πτυχωτή κοανοειδής κεραία με οριζόντιες και κάθετες αυλακώσεις .....	72
3.4 Σύνοψη.....	73
<b>Κεφάλαιο 4.....</b>	<b>75</b>
<b>Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms).....</b>	<b>75</b>
4.1 Εισαγωγή.....	75
4.2 Δημιουργία Αρχικού Πληθυσμού .....	77
4.3 Υπολογισμός Καταλληλότητας (Fitness).....	78
4.4 Φυσική Επιλογή.....	79
4.5 Επιλογή Ζευγαρώματος .....	80
4.5.1 Μέθοδος της Ρουλέτας.....	81
4.5.2 Μέθοδος Επιλογής Τουρνουά .....	82
4.6 Παραγωγή Απογόνων .....	83
4.7 Μετάλλαξη.....	86
4.8 Ολοκλήρωση της διαδικασίας .....	86
4.9 Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι στο SuperNEC .....	87
4.9.1 GA Input GUI (Graphical User Interface).....	87
4.9.2 Genetic Algorithm Output.....	92
<b>Κεφάλαιο 5.....</b>	<b>95</b>
<b>SuperNEC .....</b>	<b>95</b>
5.1 Εισαγωγή.....	95
5.2 Ιστορική Διαδρομή .....	95
5.3 Τα Προηγμένα Χαρακτηριστικά του SuperNEC .....	96
5.4 Input User Interface .....	96
5.5 Συγγραφή Νέων Δομών (Assemblies) Από Τον Χρήστη .....	99
5.6 Ρυθμίσεις Προσομοίωσης .....	100
5.7 Έλεγχος της Δομής.....	102
5.8 Output User Interface .....	104

<b>Κεφάλαιο 6.....</b>	<b>109</b>
<b>Βελτιστοποίηση κεραίας PIFA με χρήση γενετικών αλγορίθμων και επίδραση των σχισμών σε αυτή .....</b>	<b>109</b>
6.1 Εισαγωγή.....	109
6.2 Υλοποίηση PIFA στο SuperNEC.....	109
6.3 Προσθήκη σχισμών ή πτυχώσεων (corrugations) στη διάταξη .....	110
6.3.1 Σχισμές (Corrugations) με πλάτος 1, μήκος 1, απόσταση 1.....	110
6.3.2 Σχισμές (Corrugations) με πλάτος 1, μήκος 2, απόσταση 1.....	111
6.3.3 Σχισμές (Corrugations) με πλάτος 1, μήκος 1, απόσταση 2.....	112
6.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	114
6.4.1 Segment Length = 0.05λ.....	114
6.4.2 Segment Length = 0.02λ.....	123
6.4.3 Segment Length = 0.015λ.....	131
6.4.4 Segment Length = 0.01λ.....	140
6.4.5 Segment Length = 0.01λ (Μία ακόμα περίπτωση) .....	149
6.5 Σύνοψη.....	158
Βιβλιογραφία .....	159



## Ευρετήριο Σχημάτων

<b>Κεφάλαιο 1.....</b>	<b>23</b>
<b>Επίπεδη Κεραία Ανεστραμμένου F (Planar Inverted F Antenna- PIFA).....</b>	<b>23</b>
Σχήμα 1.1 Η δικωνική κεραία που παρουσίασε ο Lodge (1898) .....	23
Σχήμα 1.2 Η βελτιωμένη δικωνική κεραία του Carter (1939).....	24
Σχήμα 1.3 Κεραία που η κατασκευή της στηρίχτηκε στην έρευνα του Lindenblad .....	24
Σχήμα 1.4 Diamond Dipole-Master (1947).....	24
Σχήμα 1.5 Η πρώτη εσωτερική κεραία διπλής ζώνης, διδυμη σπειροειδής κεραία (Z. Ying-1998, Ericsson).....	25
Σχήμα 1.6 PIFA διπλής ζώνης με διακλαδώσεις (Z. Ying-1998, Ericsson) .....	25
Σχήμα 1.7 Planar Inverted F Antenna (πλάγια όψη) .....	26
Σχήμα 1.8 Τριοδιάστατη απεικόνιση PIFA .....	26
Σχήμα 1.9 Απεικόνιση μεγεθών στην PIFA .....	28
Σχήμα 1.10 Κεραία PIFA με τέσσερις οχισμές (slots) – Σχέδιο και η υλοποιημένη διάταξη .....	30
Σχήμα 1.11 Συντελεστής ανάκλασης της PIFA με 4 slots σε συνάρτηση με τη συχνότητα 31	
Σχήμα 1.12 Διαγράμματα ακτινοβολίας για 2.6, 3.6 και 5.6 GHz.....	32
Σχήμα 1.13 Τριοδιάστατη απεικόνιση της προτεινόμενης κεραίας με καταγραφή των διαστάσεων.....	32
Σχήμα 1.14 Η απόκριση συχνότητας για την άνω πλάκα μόνο .....	33
Σχήμα 1.15 Απόκριση συχνότητας για το βραχίονα 1 (Arm 1).....	33
Σχήμα 1.16 Απόκριση συχνότητας μετά την προσθήκη του βραχίονα 2 (Arm 2).....	34
Σχήμα 1.17 Πρωτότυπο της προτεινόμενης κεραίας.....	34
Σχήμα 1.18 Απόκριση συχνότητας της προσομοίωσης και των μετρήσεων .....	34
Σχήμα 1.19 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα (a) 2.4GHz, (b) 3.7 GHz, (c) 5.2 GHz .....	35
Σχήμα 1.20 Γεωμετρικές διαστάσεις της προτεινόμενης PIFA με χωρητικό φορτίο .....	36
Σχήμα 1.21 Φωτογραφία των κατασκευασμένων κεραίων (τετραπλής, τριπλής και διπλή ζώνης).....	36
Σχήμα 1.22 Συντελεστής ανάκλασης της διάταξης για μονή ζώνη.....	37
Σχήμα 1.23 Συντελεστής ανάκλασης με μια οχισμή U για διπλή ζώνη .....	37
Σχήμα 1.24 Συντελεστής ανάκλασης με δύο οχισμές U για τριπλή ζώνη.....	38
Σχήμα 1.25 Συντελεστής ανάκλασης με τρεις οχισμές U για τετραπλή ζώνη .....	38
Σχήμα 1.26 Γεωμετρία της διάταξης (a) Τριοδιάστατη απεικόνιση (b)Κάτοψη.....	39
Σχήμα 1.27 Κατανομή ρεύματος στην επιφάνεια στα (a) 950 MHz (b) 1860 MHz.....	40
Σχήμα 1.28 Διαστάσεις και αρχιτεκτονική της Cross-PIFA .....	41
Σχήμα 1.29 Ο λόγος στάσιμων (VSWR) της βελτιστοποιημένης διάταξης μεταγωγής δέσμης .....	42
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>	<b>43</b>
<b>Επίγεια Ψηφιακή Μετάδοση Βίντεο-(Digital Video Broadcasting Terrestrial, DVB-T).....</b>	<b>43</b>
Σχήμα 2.1 Τα πρότυπα της ψηφιακής τηλεόρασης στον κόσμο.....	45

Σχήμα 2.2 Ιστορική εξέλιξη DVB.....	46
Σχήμα 2.3 MPEG transport stream .....	48
Σχήμα 2.4 Μπλοκ Διάγραμμα ενός Διαμορφωτή DVB-T .....	48
Σχήμα 2.5 Διαγράμματα αστερισμών για τις μεθόδους διαμόρφωσης του προτύπου DVB-T .....	52
Σχήμα 2.6 Κατανομή ραδιοφάσματος .....	58
Σχήμα 2.7 Κατανομή καναλιών στις συχνότητες 470-862 MHz.....	59
Σχήμα 2.8 FFD Διαυλοποίηση 5 MHz block size / 30 MHz.....	60
Σχήμα 2.9 Δίκτυο WRAN βασισμένο στο IEEE 802.22 .....	61
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>	<b>65</b>
<b>Χρήση σχισμών ή πτυχώσεων σε διατάξεις κεραιών.....</b>	<b>65</b>
Σχήμα 3.1 Υλοποίηση PIFA με σχισμές στο SuperNEC .....	66
Σχήμα 3.2 Σχισμές εσωτερικά της αρχικής διάταξης.....	67
Σχήμα 3.3 Σχισμές εξωτερικά της αρχικής διάταξης .....	67
Σχήμα 3.4 VSWR για σχισμές (corrugations) περίπτωση 1 (case 1).....	68
Σχήμα 3.5 VSWR για σχισμές (corrugations) περίπτωση 2 (case 2).....	68
Σχήμα 3.6 VSWR για τη βελτιστοποιημένη PIFA με σχισμές .....	69
Σχήμα 3.7 PIFA με σχισμές υλοποιημένη στο SuperNEC στη συχνότητα των 790 MHz με μήκος τμήματος 0.1*λ.....	69
Σχήμα 3.8 VSWR για την πτυχωτή PIFA στα 790 MHz.....	70
Σχήμα 3.9 Συμβατική PIFA μονής ζώνης στα 900 MHz (διαστάσεις σε mm).....	71
Σχήμα 3.10 PIFA μονής ζώνης με μαιανδρικό επίπεδο γείωσης.....	71
Σχήμα 3.11 VSWR της PIFA μονής ζώνης με συμβατικό επίπεδο γείωσης.....	71
Σχήμα 3.12 VSWR της PIFA μονής ζώνης με μαιανδρικό επίπεδο γείωσης .....	72
Σχήμα 3.13 Μήκος της κοανοειδούς κεραίας σε συνάρτηση με την κατευθυντικότητα.....	73
Σχήμα 3.14 Η πτυχωτή κοανοειδής κεραία και το διάγραμμα ακτινοβολίας της .....	73
<b>Κεφάλαιο 4.....</b>	<b>75</b>
<b>Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms).....</b>	<b>75</b>
Σχήμα 4.1 - Διάγραμμα ροής ενός γενετικού αλγόριθμου .....	77
Σχήμα 4.2 - Η ρουλέτα για μια ομάδα επιλογής 4 γονέων .....	81
Σχήμα 4.3 - Η ρουλέτα για μια ομάδα επιλογής 8 γονέων .....	82
Σχήμα 4.4 - Ένα παράδειγμα της μεθόδου επιλογής τουρνουά .....	83
Σχήμα 4.5 - Το GA Input GUI του SuperNEC .....	87
Σχήμα 4.6 - Το παράθυρο GA Settings .....	88
Σχήμα 4.7 - Το παράθυρο GA cost settings .....	90
Σχήμα 4.8 - Το παράθυρο GA Model Settings.....	91
Σχήμα 4.9 - Η μορφή του GA Output Viewer.....	93
Σχήμα 4.10 - Το παράθυρο GA Output .....	94



<b>Κεφάλαιο 5.....</b>	<b>95</b>
<b>SuperNEC .....</b>	<b>95</b>
Σχήμα 5.1- Το SuperNEC input user interface .....	97
Σχήμα 5.2- Το παράθυρο του Assembly Editor .....	99
Σχήμα 5.3- Το παράθυρο Simulation Settings .....	101
Σχήμα 5.4 - Απόσταση τμημάτων .....	104
Σχήμα 5.5 - Σφάλματα στις αποστάσεις τμημάτων .....	104
Σχήμα 5.6 - Προειδοποιήσεις και σφάλματα στις αποστάσεις τμημάτων .....	104
Σχήμα 5.7 - Το SuperNEC Output Interface .....	105
Σχήμα 5.8 - Ένα 2D διάγραμμα ακτινοβολίας .....	106
Σχήμα 5.9- Ένα 3D διάγραμμα ακτινοβολίας .....	106
Σχήμα 5.10- Παράδειγμα απεικόνισης στο Near-Field Viewer .....	107
Σχήμα 5.11 - Παράδειγμα απεικόνισης στο Structure Viewer .....	107
<b>Κεφάλαιο 6.....</b>	<b>109</b>
<b>Βελτιστοποίηση κεραιάς PIFA με χρήση γενετικών αλγορίθμων και επίδραση των σχισμών σε αυτή .....</b>	<b>109</b>
Σχήμα 6.1 Υλοποίηση κεραιάς PIFA στο SuperNEC και οι μεταβλητές .....	110
Σχήμα 6.2 Εφαρμογή Σχισμών (Corrugations) εσωτερικά της διάταξης.....	110
Σχήμα 6.3 Σχισμές (Corrugations) εξωτερικά της διάταξης.....	111
Σχήμα 6.4 Δομή Corrugated PIFA 111 ( με σχισμές μήκους και πλάτους 1).....	111
Σχήμα 6.5 Εξωτερικές σχισμές (Corrugations) με μήκος (βάθος) 2 segments.....	112
Σχήμα 6.6 Δομή Corrugated PIFA 121 με σχισμές βάθους 2 και πλάτους 1 segment ..	112
Σχήμα 6.7 Εξωτερικές σχισμές με μεταξύ τους απόσταση 2 segments .....	113
Σχήμα 6.8 Δομή Corrugated PIFA 211 με σχισμές βάθους και πλάτους 1 segment με απόσταση μεταξύ τους 2 segments (περίπτωση 3).....	113
Σχήμα 6.9 Η υλοποίηση της βελτιστοποιημένης Normal PIFA στο SuperNEC για segment length=0.05λ.....	115
Σχήμα 6.10 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας της Normal PIFA για segment length=0.05λ .....	115
Σχήμα 6.11 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο xz σε επίπεδη μορφή για τη Normal PIFA με segment length=0.05λ .....	116
Σχήμα 6.12 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο xz σε πολικές συντεταγμένες για τη Normal PIFA με segment length=0.05λ.....	116
Σχήμα 6.13 Ο λόγος στάσιμων κυμάτων της Normal PIFA με segment length=0.05λ... 117	117
Σχήμα 6.14 Απώλειες ανάκλασης για Normal PIFA με segment length=0.05λ .....	117
Σχήμα 6.15 Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	118
Σχήμα 6.16 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	118
Σχήμα 6.17 Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	118
Σχήμα 6.18 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	119
Σχήμα 6.19 Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	119
Σχήμα 6.20 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	119

Σχήμα 6.21 <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	120
Σχήμα 6.22 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	120
Σχήμα 6.23 <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	120
Σχήμα 6.24 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	121
Σχήμα 6.25 <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	121
Σχήμα 6.26 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	121
Σχήμα 6.27 Βελτιστοποιημένη δομή <i>Normal PIFA</i> για <i>segment length=0.02λ</i> .....	123
Σχήμα 6.28 Λόγος στάσιμων κυμάτων για βελτιστοποιημένη <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.02λ</i> .....	124
Σχήμα 6.29 Απώλειες ανάκλασης για βελτιστοποιημένη <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.02λ</i> .....	124
Σχήμα 6.30 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.02λ</i> .....	125
Σχήμα 6.31 Διάγραμμα ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.02λ</i> στο επίπεδο <i>xz</i> σε επίπεδη μορφή.....	125
Σχήμα 6.32 Διάγραμμα ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.02λ</i> στο επίπεδο <i>xz</i> σε πολικές συντεταγμένες.....	126
Σχήμα 6.33 <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	126
Σχήμα 6.34 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	127
Σχήμα 6.35 <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	127
Σχήμα 6.36 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	127
Σχήμα 6.37 <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	128
Σχήμα 6.38 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	128
Σχήμα 6.39 <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	128
Σχήμα 6.40 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	129
Σχήμα 6.41 <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	129
Σχήμα 6.42 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	129
Σχήμα 6.43 <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	130
Σχήμα 6.44 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	130
Σχήμα 6.45 Βελτιστοποιημένη δομή <i>Normal PIFA</i> για <i>segment length=0.015λ</i> .....	132
Σχήμα 6.46 Λόγος στάσιμων κυμάτων για βελτιστοποιημένη <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.015λ</i> .....	133
Σχήμα 6.47 Απώλειες ανάκλασης για βελτιστοποιημένη <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.015λ</i> .....	133
Σχήμα 6.48 Διάγραμμα ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.015λ</i> στο επίπεδο <i>xz</i> σε πολικές συντεταγμένες.....	134
Σχήμα 6.49 Διάγραμμα ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.015λ</i> στο επίπεδο <i>xz</i> σε επίπεδη μορφή.....	134
Σχήμα 6.50 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.015λ</i> .....	134
Σχήμα 6.51 <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	135
Σχήμα 6.52 <i>VSWR</i> για <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	135
Σχήμα 6.53 <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	135

Σχήμα 6.54 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	136
Σχήμα 6.55 <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	136
Σχήμα 6.56 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	136
Σχήμα 6.57 <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	137
Σχήμα 6.58 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	137
Σχήμα 6.59 <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	137
Σχήμα 6.60 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	138
Σχήμα 6.61 <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	138
Σχήμα 6.62 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	138
Σχήμα 6.63 Βελτιστοποιημένη δομή <i>Normal PIFA</i> για <i>segment length=0.01λ</i> .....	141
Σχήμα 6.64 Λόγος στάσιμων κυμάτων για βελτιστοποιημένη <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> .....	141
Σχήμα 6.65 Απώλειες ανάκλασης για βελτιστοποιημένη <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> .....	142
Σχήμα 6.66 Διάγραμμα ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> στο επίπεδο xz σε πολικές συντεταγμένες .....	142
Σχήμα 6.67 Διάγραμμα ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> στο επίπεδο xz σε επίπεδη μορφή .....	143
Σχήμα 6.68 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> .....	143
Σχήμα 6.69 <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	144
Σχήμα 6.70 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	144
Σχήμα 6.71 <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	144
Σχήμα 6.72 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	145
Σχήμα 6.73 <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	145
Σχήμα 6.74 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	145
Σχήμα 6.75 <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	146
Σχήμα 6.76 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	146
Σχήμα 6.77 <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	146
Σχήμα 6.78 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	147
Σχήμα 6.79 <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	147
Σχήμα 6.80 VSWR για <i>Corrugated PIFA</i> 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	147
Σχήμα 6.81 Βελτιστοποιημένη δομή <i>Normal PIFA</i> για <i>segment length=0.01λ</i> .....	150
Σχήμα 6.82 Λόγος στάσιμων κυμάτων για βελτιστοποιημένη <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> .....	150
Σχήμα 6.83 Απώλειες ανάκλασης για βελτιστοποιημένη <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> .....	151
Σχήμα 6.84 Διάγραμμα ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> στο επίπεδο xz σε πολικές συντεταγμένες .....	151
Σχήμα 6.85 Διάγραμμα ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> στο επίπεδο xz σε επίπεδη μορφή .....	152
Σχήμα 6.86 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας για <i>Normal PIFA</i> με <i>segment length=0.01λ</i> .....	152

Σχήμα 6.87 <i>Corrugated PIFA 111</i> με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	153
Σχήμα 6.88 VSWR για <i>Corrugated PIFA 111</i> με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	153
Σχήμα 6.89 <i>Corrugated PIFA 111</i> με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	153
Σχήμα 6.90 VSWR για <i>Corrugated PIFA 111</i> με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1).....	154
Σχήμα 6.91 <i>Corrugated PIFA 121</i> με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	154
Σχήμα 6.92 VSWR για <i>Corrugated PIFA 121</i> με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	154
Σχήμα 6.93 <i>Corrugated PIFA 121</i> με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	155
Σχήμα 6.94 VSWR για <i>Corrugated PIFA 121</i> με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2).....	155
Σχήμα 6.95 <i>Corrugated PIFA 211</i> με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	155
Σχήμα 6.96 VSWR για <i>Corrugated PIFA 211</i> με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	156
Σχήμα 6.97 <i>Corrugated PIFA 211</i> με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	156
Σχήμα 6.98 VSWR για <i>Corrugated PIFA 211</i> με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3).....	156

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 Διαστάσεις PIFA με 4 slots .....	31
Πίνακας 1.2 Εύρος τιμών και αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου .....	42
Πίνακας 2.1 Πρότυπα για το DVB ανάλογα με την υπηρεσία .....	46
Πίνακας 2.2 Χρήσιμοι ρυθμοί μετάδοσης στο πρότυπο DVB-T .....	51
Πίνακας 2.3 C/N τιμές για όλες τις υλοποιήσεις του DVB-T για σταθερή (FX), φορητή σε εξωτερικούς χώρους (PO), φορητή σε εσωτερικούς χώρους (PI) και κινητή (MO) λήψη .....	53
Πίνακας 2.4 Πίνακας τιμών για το διαστήμα φύλαξης σε κανάλι 8 MHz .....	55
Πίνακας 3.1 Αριθμητικά αποτελέσματα για διάφορους τύπους σχισμών στη συχνότητα των 2.4 GHz .....	67
Πίνακας 5.1 Προειδοποιήσεις και σφάλματα στο SuperNEC για μεμονωμένα τμήματα .....	103
Πίνακας 5.2 Προειδοποιήσεις και σφάλματα στο SuperNEC για ενώσεις τμημάτων .....	103
Πίνακας 5.3 Προειδοποιήσεις και σφάλματα στο SuperNEC για αποστάσεις τμημάτων .....	103
Πίνακας 6.1 Συνοπτική περιγραφή των δομών που χρησιμοποιήθηκαν .....	114
Πίνακας 6.2 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για $segment\ length=0.05\lambda$ .....	114
Πίνακας 6.3 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για $segment\ length=0.05\lambda$ .....	114
Πίνακας 6.4 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές με $segment\ length=0.05\lambda$ .....	122
Πίνακας 6.5 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για $segment\ length=0.02\lambda$ .....	123
Πίνακας 6.6 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για $segment\ length=0.02\lambda$ .....	123
Πίνακας 6.7 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές που μελετήθηκαν για $segment\ length =0.02\lambda$ .....	131
Πίνακας 6.8 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για $segment\ length=0.015\lambda$ .....	132
Πίνακας 6.9 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για $segment\ length=0.015\lambda$ .....	132
Πίνακας 6.10 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές που μελετήθηκαν για $segment\ length =0.015\lambda$ .....	139
Πίνακας 6.11 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για $segment\ length=0.01\lambda$ .....	140
Πίνακας 6.12 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για $segment\ length=0.01\lambda$ .....	140
Πίνακας 6.13 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές που μελετήθηκαν για $segment\ length =0.01\lambda$ .....	148
Πίνακας 6.14 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για $segment\ length=0.01\lambda$ .....	149
Πίνακας 6.15 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για $segment\ length=0.01\lambda$ .....	149

**Πίνακας 6.16 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές που μελετήθηκαν για  
segment length =0.01λ..... 157**

# Κεφάλαιο 1

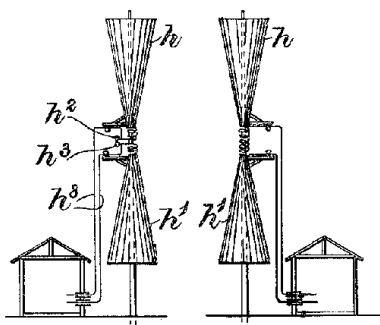
## Επίπεδη Κεραία Ανεστραμμένου F (Planar Inverted F Antenna- PIFA)

### 1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας των ασυρμάτων επικοινωνιών βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη, με αποτέλεσμα την αυξανόμενη ανάγκη της αγοράς για κεραίες οι οποίες θα είναι αρκετά αποδοτικές αλλά συγχρόνως και οικονομικές. Μέσα από τέτοιες αναζητήσεις προέκυψε η ιδέα της κεραίας ανεστραμμένου F, η οποία ήταν αρχικά μια πολύ καλή εναλλακτική επιλογή αντί ενός μονοπόλου ή μιας ελικοειδούς κεραίας. Σήμερα, πλέον οι PIFA χρησιμοποιούνται, ως μέρος της τεχνολογίας των τερματικών, σε αρκετές ασύρματες εφαρμογές ευριζωνικότητας ή κινητής τηλεφωνίας.

### 1.2 Ιστορική Αναδρομή

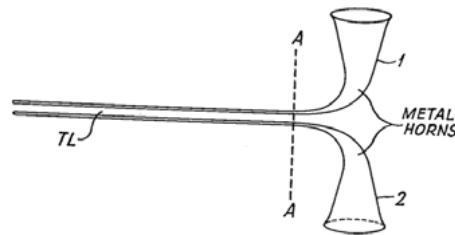
Οι κεραίες PIFA ανήκουν στην οικογένεια των Ultra-WideBand (UWB) κεραιών, οι οποίες έχουν τις ρίζες τους στους μεταδότες τύπου “spark-gap”. Η αρχή, ουσιαστικά, γίνεται το 1898, όταν ο Oliver Lodge διατυπώνει τη λογική του «συντονισμού» του πομπού και του δέκτη στην ίδια συχνότητα με σκοπό τη μεγιστοποίηση του λαμβανόμενου σήματος. Στηριζόμενος σε αυτή τη λογική ο Lodge, εισάγει κεραίες που ήταν πολύ κοντά στα σημερινά δεδομένα, όπως τα σφαιρικά δίπολα, τα επίπεδα τετραγωνικά δίπολα και τα τριγωνικά δίπολα. Επίσης, κάνει για πρώτη φορά αναφορά στη μονοπολική κεραία θεωρώντας ως επίπεδο αναφοράς τη γη.



Σχήμα 1.1 Η δικωνική κεραία που παρουσίασε ο Lodge (1898)

Με το πέρασμα του χρόνου και την τεχνολογική πρόοδο τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα λειτουργούσαν πλέον σε υψηλότερες συχνότητες. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη στροφή του ερευνητικού ενδιαφέροντος για την τηλεοπτική κάλυψη αύξησε το ενδιαφέρον για κεραίες μεγαλύτερου εύρους ζώνης από αυτό που χρησιμοποιούνταν για σήματα εικόνας. Έτσι, λοιπόν το 1939 ο Carter βελτιώνει τις αρχικές δομές του Lodge με μια λέπτυνση στην τροφοδοσία (tapered feed). Με τον τρόπο αυτό έγινε ένα σημαντικό βήμα για την

ευρυζωνική μετάβαση μεταξύ γραμμής τροφοδοσίας και ακτινοβολητή.  
[1]



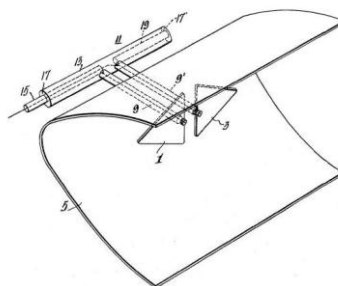
Σχήμα 1.2 Η βελτιωμένη δικωνική κεραία του Carter (1939)

Μεγάλη πρόοδος για το αντικείμενο των κεραιών επετεύχθη το 1941 από τον Nils Lindenblad με την ομοαξονική κοανοκεραία που εισήγαγε. Το καινούργιο στοιχείο, λοιπόν που έκανε την εμφάνισή του ήταν η προσθήκη ενός περιβλήματος στο διπολικό στοιχείο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τον μετασχηματισμό της σύνθετης αντίστασης και την ευρύτερη μετάδοση. Η καινοτομία της χρήσης του ομοαξονικού στοιχείου ήταν επιστέγασμα της εκτεταμένης έρευνας που είχε προηγηθεί σχετικά με την τηλεόραση. Γι' αυτό το λόγο η συγκεκριμένη κεραία ήταν αυτή που είχε ξεχωρίσει ανάμεσα στις υπόλοιπες UWB κεραιές της εποχής.



Σχήμα 1.3 Κεραία που η κατασκευή της στηρίχτηκε στην έρευνα του Lindenblad

Αργότερα και καθώς τα ευρυζωνικά τερματικά χρησιμοποιούνταν ολοένα και περισσότερο, το ενδιαφέρον άρχισε να μετατοπίζεται στο χαμηλό κόστος και στην ευκολία κατασκευής των κεραιών. Έτσι κάνει την εμφάνιση του το 1947 το τριγωνικό δίπολο του Master, μια κεραία που αργότερα μετονομάστηκε και εξελίχθηκε στο “diamond dipole”.



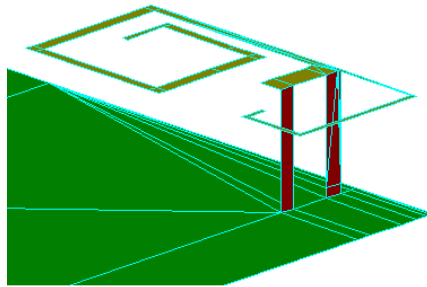
Σχήμα 1.4 Diamond Dipole-Master (1947)



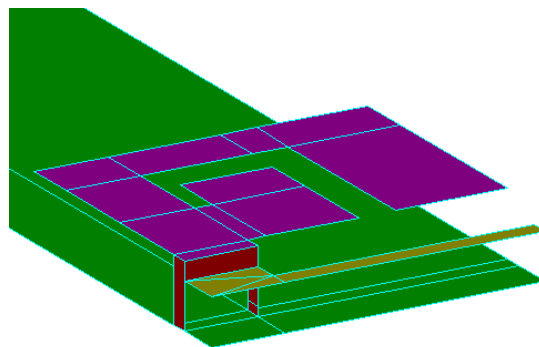
Στην πορεία εμφανίζεται η ιδέα της κατασκευής κεραιάς με σχισμές από τον Lalezari (1989). Από τον Thomas το 1994 παρουσιάζεται ένα επίπεδο κυκλικό δίπολο στοιχείων, το οποίο αποδίδει καλύτερα ενώ είναι και εύκολα κατασκευάσιμο.

Ενώ πλέον οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας έχουν έρθει στο προσκήνιο, η προσοχή στρέφεται στη μείωση των διαστάσεων των κεραιών έτσι ώστε να ελαττωθεί και το μέγεθος των υπό χρήση συσκευών. Επίσης βαρύτητα δίνεται στην αριθμητική ανάλυση των κεραιών ώστε να μπορούν να εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά τους πριν την κατασκευή και την εξέτασή τους.

Τα δεδομένα στο χώρο των κεραιών για κινητές συσκευές άλλαξαν μετά το 1998, όταν ο Z Ying παρουσίασε για πρώτη φορά εσωτερική κεραιά σε κινητό τηλέφωνο. Χρησιμοποιώντας τη λογική του μαϊάνδρου, παρουσίασε μια εσωτερική τυπωμένη σπειροειδή κεραιά και μια τυπωμένη PIFA διπλής ζώνης. Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο αυτής της διάταξης ήταν ότι η PIFA δύναται να ελαχιστοποιηθεί, και το πολλαπλής ζώνης χαρακτηριστικό γνώρισμα μπορεί να ανακτηθεί μέσω των διακλαδώσεων. Την ίδια χρονιά, κατασκευάστηκε μιας διπλής ζώνης εσωτερική κεραιά για τερματικά κινητής τηλεφωνίας βασισμένη σε κεραιά PIFA με διακλαδώσεις που διαμορφώνεται από σχισμές σε μια μικρή επιφάνεια. [1]



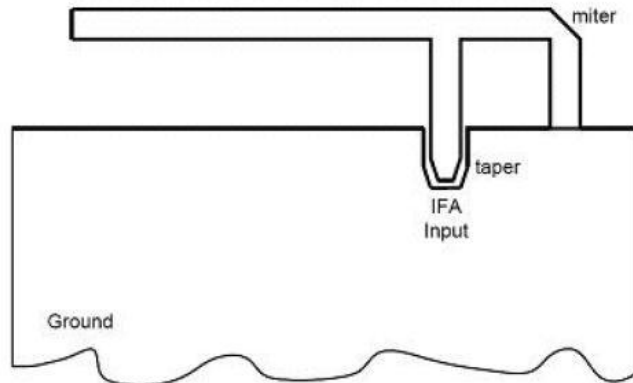
Σχήμα 1.5 Η πρώτη εσωτερική κεραιά διπλής ζώνης, δίδυμη σπειροειδής κεραιά (Z. Ying-1998, Ericsson)



Σχήμα 1.6 PIFA διπλής ζώνης με διακλαδώσεις (Z. Ying-1998, Ericsson)

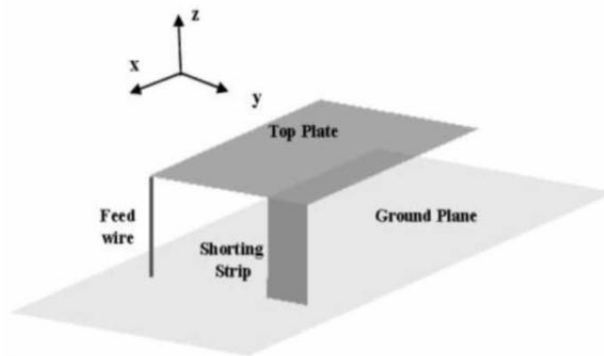
### 1.3 Γεωμετρία κεραίας PIFA (Planar Inverted F Antenna)

Η επίπεδη κεραία ανεστραμμένου F (PIFA) πήρε την ονομασία της από την ίδια τη γεωμετρία της, γεγονός που αντιλαμβάνεται κανείς παρατηρώντας και το σχήμα που την απεικονίζει (σχήμα 1.7). Παρόλο που η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από δύο επίπεδα, τη γείωση και την κεραία ανεστραμμένου F, εντούτοις θεωρείται ενός επιπέδου (planar antenna). [2]



Σχήμα 1.7 Planar Inverted F Antenna (πλάγια όψη)

Στο σχήμα 1.8 δίνεται η τρισδιάστατη υπόσταση της κεραίας PIFA, όπου γίνονται φανερά τα επιμέρους στοιχεία της. Διακρίνονται, λοιπόν, το δίπολο τροφοδοσίας (feed wire), ο αγωγός βραχυκύκλωσης (shorting strip), η άνω πλάκα που συνιστά ένα αγωγίμο επίπεδο (top plate) και το επίπεδο γείωσης (ground plane).



Σχήμα 1.8 Τρισδιάστατη απεικόνιση PIFA

Η κεραία PIFA είναι μια παραλλαγή του μονοπόλου, στην οποία το άνω μέρος τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι παράλληλο με το επίπεδο γείωσης. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται με σκοπό να μειωθεί το ύψος της κεραίας ενώ διατηρείται σταθερό το αντανάκλαστικό μήκος. Αυτό το παράλληλο τμήμα εισάγει χωρητικότητα στη σύνθετη αντίσταση εισόδου της κεραίας, η οποία αντισταθμίζεται με την εφαρμογή ενός σελέχους μικρού-κυκλώματος, το οποίο καταλήγει στο επίπεδο γείωσης.

## 1.4 Λειτουργία PIFA

### 1.4.1 Γενικά στοιχεία

Το επίπεδο γείωσης της κεραίας συντελεί σημαντικά στην όλη λειτουργία της. Η διέγερση ρευμάτων στην κεραία αντεστραμμένου F (IFA), δηλαδή στην άνω πλάκα της μαζί με το δίπολο τροφοδοσίας και του αγωγού βραχυκύκλωσης, προκαλεί τη δημιουργία επαγωγικών ρευμάτων στο κάτω επίπεδο. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που έχει αναπτυχθεί, καθορίζεται από την αλληλεπίδραση της IFA και του κάτω επιπέδου, που λειτουργεί ως τέλειος ανακλαστήρας στην ιδανική περίπτωση που θεωρείται απείρων ή αρκετά μεγαλύτερων διαστάσεων από το μονόπολο. Τα μεταλλικά στρώματα, όμως στην πράξη, έχουν συγκρίσιμες διαστάσεις με το μονόπολο και ενεργούν ως μέρη του δίπολου.

Ο συνδυασμός κεραίας ανεστραμμένου F και γείωσης κάνουν την όλη διάταξη να συμπεριφέρεται σαν ασύμμετρο δίπολο. Οι διαφορές στην κατανομή ρευμάτων στα δύο άκρα αυτού του δίπολου έχουν ως αποτέλεσμα μια μικρή παραμόρφωση στο διάγραμμα ακτινοβολίας. Για να επιτευχθεί πολυκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο καθώς επίσης και καλύτερη προσαρμογή, η κατάλληλη θέση για την τοποθέτηση της IFA είναι στο άκρο του κάτω επιπέδου.

Γενικά, το μήκος του επιπέδου γείωσης, έτσι ώστε η κεραία να είναι λειτουργική και αποδοτική, πρέπει να είναι μεγαλύτερο του ενός τετάρτου του μήκους κύματος ( $\text{ground plane} > \lambda/4$ ). Από την άλλη αν οι διαστάσεις του κάτω επιπέδου είναι αρκετά μεγαλύτερες του  $\lambda/4$ , το διάγραμμα ακτινοβολίας θα παρουσιάζει πολλούς κύριους λοβούς, γεγονός που κάνει την κεραία πολυκατευθυντική. Αντιθέτως, στην περίπτωση που οι διαστάσεις του κάτω επιπέδου είναι αρκετά μικρότερες του  $\lambda/4$  η προσαρμογή της διάταξης καθίσταται αρκετά δύσκολη ενώ χάνεται σε σημαντικό βαθμό η λειτουργικότητα.

Η πολυκατευθυντική συμπεριφορά της IFA για διάφορες τιμές κέρδους εξασφαλίζει επαρκή απόδοση της διάταξης για εσωτερικό περιβάλλον, όπου λαμβάνονται πάντα υπόψη οι τυπικές τιμές της ισχύος εξόδου και της ευαισθησίας του δέκτη για ράδιο-συσσκευές μικρής εμβέλειας. Επίσης, η πόλωση της κεραίας μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο ελλειπτική παρά γραμμική καθώς η κλίση της καμπύλης ίσα που φτάνει τα 20 dB. [2]

### 1.4.2 Κατανομή Ηλεκτρικού Πεδίου

Η κυριότερη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου  $E_z$  ισούται με μηδέν στον αγωγό βραχυκύκλωσης (shorting strip). Αντίθετα, η ένταση του πεδίου στην απέναντι πλευρά της άνω πλάκας (top plate) είναι αρκετά μεγάλη. Οι συνιστώσες  $E_x$  και  $E_y$ , παρουσιάζουν μια διαταραχή στο σημείο του αγωγού τροφοδοσίας (feed wire) που οφείλεται στο ρεύμα που μεταφέρεται από αυτόν. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι ηλεκτρικές γραμμές κατευθύνονται από την πηγή ρεύματος στο επίπεδο γείωσης. Επιπλέον, όταν το πλάτος του αγωγού βραχυκύκλωσης είναι αρκετά μικρότερο από το πλάτος της άνω πλάκας, οι πεδιακές συνιστώσες  $E_x$

και  $E_y$  αρχίζουν να δημιουργούνται σε όλες τις άκρες του πάνω στοιχείου. Αυτά τα οριακά πεδία αποτελούν τις πηγές ακτινοβολίας της PIFA.

#### 1.4.3 Κατανομή Ηλεκτρικού Ρεύματος

Η PIFA παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη ροή ρεύματος κάτω από την επιφάνεια της άνω πλάκας και του επιπέδου γείωσης, συγκριτικά με το πεδίο που αναπτύσσεται πάνω από την επιφάνεια. Λόγω αυτής της συμπεριφοράς της η PIFA αποτελεί διάταξη, τα χαρακτηριστικά της οποίας επηρεάζονται αρκετά από εξωγενείς παράγοντες, όπως το χέρι ή το κεφάλι του χρήστη μιας κινητής συσκευής.

Η κατανομή ρεύματος στην επιφάνεια αλλάζει για διαφορετικά πλάτη του αγωγού βραχυκύκλωσης. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση ρεύματος παρατηρείται κοντά στο σημείο βραχυκύκλωσης και μειώνεται μακριά από αυτό.

Η επιφάνεια του επιπέδου γείωσης μπορεί να παραποιήσει την ακτινοβολία ή να δημιουργήσει ασυνέχεια στην ενέργεια με αποτέλεσμα την αλλοίωση του διαγράμματος ή την ανεπιθύμητη απώλεια ενέργειας. Η επίδραση των επιφανειακών κυμάτων μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση αέρα ως διηλεκτρικού ανάμεσα στα δύο επίπεδα. Αυτή η τεχνική βελτιώνει την απόδοση της κεραιάς ενώ ενισχύει ελαφρώς και το εύρος ζώνης.

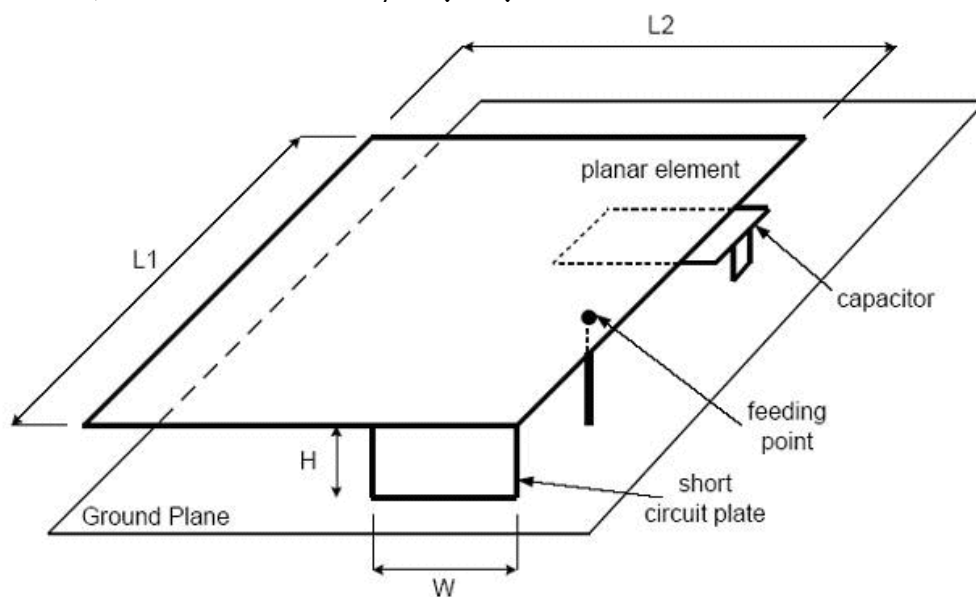
#### 1.4.4 Συχνότητα Συντονισμού

Η συχνότητα συντονισμού μιας PIFA μπορεί να υπολογιστεί με προσέγγιση από τις κάτωθι σχέσεις (τα αντίστοιχα μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 1.9):

$$L1 + L2 = \frac{\lambda}{4} \quad (1.1)$$

$$\text{Όταν } W/L1=1, \text{ τότε } L1+H=\lambda/4 \quad (1.2)$$

$$\text{Όταν } W=0, \text{ τότε } L1+L2+H=\lambda/4 \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.9 Απεικόνιση μεγεθών στην PIFA

Η εισαγωγή μιας σχισμής στη διάταξη ελαττώνει τη συχνότητα συντονισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζεται ροή ρευμάτων στην άκρη της σχισμής, η οποία δημιουργεί χωρητικό φορτίο που μειώνει τη συχνότητα συντονισμού και επομένως τις διαστάσεις της κεραίας αρκετά. Οι ίδια λογική για τις σχισμές ισχύει και για διατάξεις που λειτουργούν σε δύο συχνότητες.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί επίσης ότι αλλαγές που γίνονται στο πλάτος της άνω πλάκας μπορούν να επηρεάσουν τον καθορισμό της συχνότητας συντονισμού. Επίσης, ο αγωγός βραχυκύκλωσης  $W$  κατέχει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της συχνότητας συντονισμού, καθώς αυτή μειώνεται όταν μικρύνει το πλάτος του.

Τέλος, η ανάλυση της συχνότητας συντονισμού και των χαρακτηριστικών του εύρους ζώνης της κεραίας μπορεί να γίνει εύκολα καθορίζοντας το χώρο του σημείου τροφοδοσίας. Ο καθορισμός αυτός γίνεται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του συντελεστή ανάκλασης της διάταξης. [2]

#### 1.4.5 Προσαρμογή

Η προσαρμογή σε μια PIFA επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του σημείου τροφοδοσίας και του αγωγού βραχυκύκλωσης στην κατάλληλη θέση βελτιστοποιώντας τη μεταξύ τους απόσταση. Η βασική ιδέα στο σχεδιασμό μιας PIFA, άλλωστε, είναι η μη χρησιμοποίηση επιπλέον συγκεντρωμένων στοιχείων για την προσαρμογή της διάταξης και την αποφυγή επιπλέον απωλειών.

#### 1.4.6 Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της PIFA ορίζεται ως η σχετική κατανομή της ακτινοβολούμενης ενέργειας ως συνάρτηση της κατεύθυνσης στο χώρο. Συνήθως, το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται στο μακρινό πεδίο ως συνάρτηση των συντεταγμένων.

#### 1.4.7 Τεχνικές Αύξησης του Εύρους Ζώνης

Όπως έχει προαναφερθεί το εύρος ζώνης εξαρτάται αρκετά από τις διαστάσεις της κάτω πλάκα (επίπεδο γείωσης). Συνεπώς, αλλάζοντας το μέγεθος της κάτω πλάκας, μπορούμε να ρυθμίσουμε το εύρος ζώνης έτσι ώστε να φτάσει την επιθυμητή τιμή. Για παράδειγμα, με μείωση του πλάτους του κάτω επιπέδου παρατηρείται αύξηση του εύρους ζώνης της διάταξης. Επίσης, με την εισαγωγή σχισμών στην κάτω πλάκα μειώνεται ο συντελεστής ποιότητας της κεραίας και συνεπώς αυξάνεται το εύρος ζώνης. Η χρήση αέρα ως υποστρώματος είναι ακόμα μια επιλογή για αύξηση του εύρους ζώνης, όπως επίσης και η κατάλληλη τοποθέτηση των αγωγών βραχυκύκλωσης και τροφοδοσίας.

#### 1.4.8 Πλεονεκτήματα Χρήσης PIFA

Η χρήση της PIFA παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Βασικό προσόν είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί εσωτερικά σε κινητές συσκευές σε σύγκριση με άλλες κεραίες όπως η ελικοειδής ή του ραδιοφώνου. Επίσης, λόγω του ότι

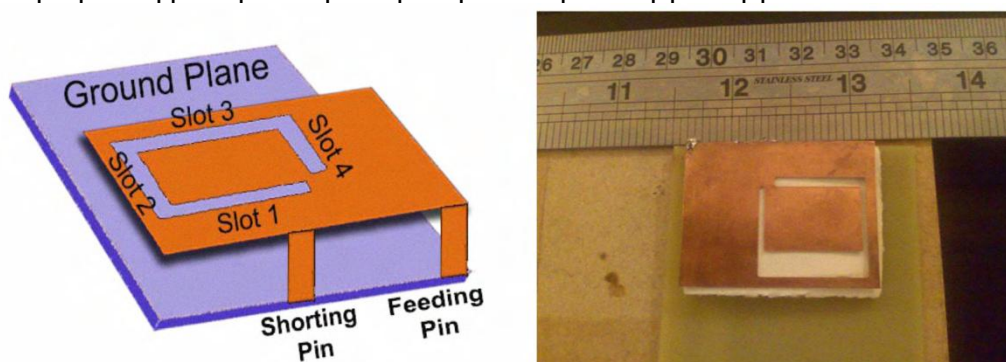
παρουσιάζει μικρό οπίσθιο λοβό ακτινοβολίας, ελαχιστοποιείται ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης ενέργειας (Specific Absorption Rate-SAR) από τον χρήστη στην περιοχή του κεφαλιού του, ενώ ταυτόχρονα ενισχύεται η απόδοση της κεραίας. Τέλος, το γεγονός ότι η διάταξη έχει την ικανότητα να λαμβάνει τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, είναι πολύ σημαντικό για χρησιμοποίησή της σε εσωτερικούς χώρους, όπου η επιλογή της κατάλληλης πόλωσης είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι επίσης χρήσιμο σε μερικά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, όπου ο προσανατολισμός της κεραίας δεν είναι σταθερός ενώ υπάρχουν και συνεχείς ανακλάσεις από το περιβάλλον. Σε αυτή την περίπτωση αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό υπό λήψη πεδίο είναι το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης.

## 1.5 Εφαρμογές PIFA

### 1.5.1 PIFA με 4 σχισμές για WiMAX εφαρμογές

Οι εφαρμογές WiMAX εκπέμπουν σε τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, τη χαμηλή (2.5-2.8 GHz), τη μεσαία (3.2-3.8 GHz) και την υψηλή ζώνη (5.2-5.8 GHz). Για να είναι δυνατό, λοιπόν, να γίνει λήψη και στις τρεις αυτές ζώνες συχνοτήτων αναπτύχθηκε μια PIFA με τέσσερις σχισμές.

Η κεραία που υλοποιήθηκε [3] (σχήμα 1.10) τροφοδοτείται με μια μικροταινιακή γραμμή αντίστασης  $50\Omega$  με μετασχηματισμό ενός τετάρτου του μήκους κύματος για να επιτευχθεί προσαρμογή. Το κενό ανάμεσα στο επίπεδο ακτινοβολίας και το επίπεδο γείωσης έχει καλυφθεί με στρώμα αφρού με διηλεκτρική σταθερά ίση με τη μονάδα.



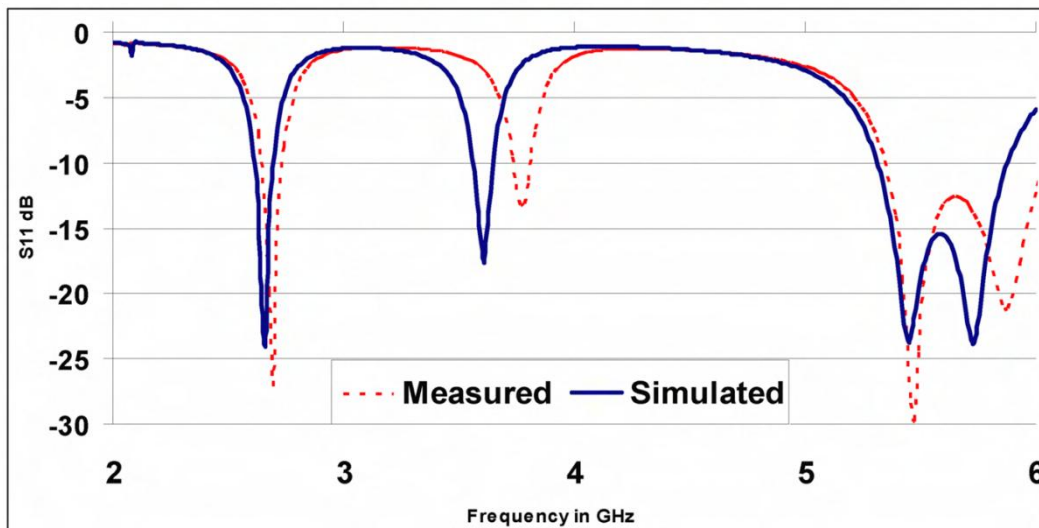
Σχήμα 1.10 Κεραία PIFA με τέσσερις σχισμές (slots) – Σχέδιο και η υλοποιημένη διάταξη

Οι διαστάσεις της διάταξης που αναπτύχθηκε [3] συνοψίζονται στον πίνακα 1.1

Πίνακας 1.1 Διαστάσεις PIFA με 4 slots

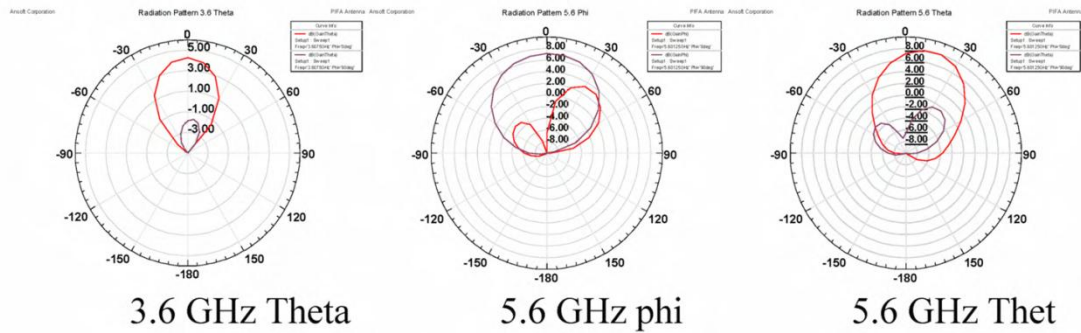
W	38
L	29.59
Slot 1	2 x 20
Slot 2	1 x 20
Slot 3	5 x 21
Slot 4	1 x 18
Shorting Pin	6 x 1.5
Feeding Pin	3 x 6
Ground Plane	50 x 50

Η απόκριση συχνότητας χρησιμοποιώντας το συντελεστή ανάκλασης εισόδου σαν κριτήριο φαίνεται στο σχήμα 1.11, όπου παρατηρείται αρκετά καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση με αυτά από τις μετρήσεις στην κατασκευασμένη διάταξη.



Σχήμα 1.11 Συντελεστής ανάκλασης της PIFA με 4 slots σε συνάρτηση με τη συχνότητα

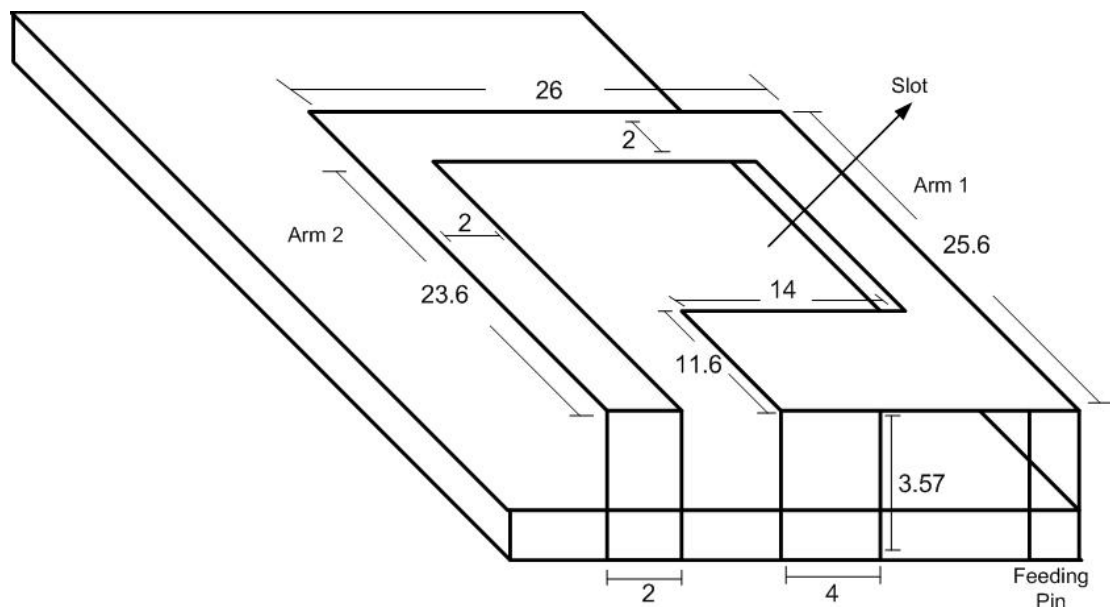




Σχήμα 1.12 Διαγράμματα ακτινοβολίας για 2.6, 3.6 και 5.6 GHz

### 1.5.2 PIFA με βραχίονες για εφαρμογές WiMAX

Μια ακόμα διάταξη που έχει αναπτυχθεί για εφαρμογές στις συχνότητες του WiMAX είναι μια PIFA στην οποία έχουν προσαρμοστεί δύο βραχίονες που στηρίζονται σε πλάκες βραχυκύκλωσης [4] που είναι τοποθετημένες κάθετα στην άκρη του επιπέδου γείωσης (σχήμα 1.13). Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της κεραίας είναι ότι η συχνότητα συντονισμού μπορεί εύκολα να επιλεγεί στο διάστημα 2GHz-6GHz (εύρος συχνοτήτων WiMAX) αλλάζοντας κάποιες παραμέτρους όπως το πλάτος ή το μήκος των βραχιόνων.



Σχήμα 1.13 Τρισδιάστατη απεικόνιση της προτεινόμενης κεραίας με καταγραφή των διαστάσεων.

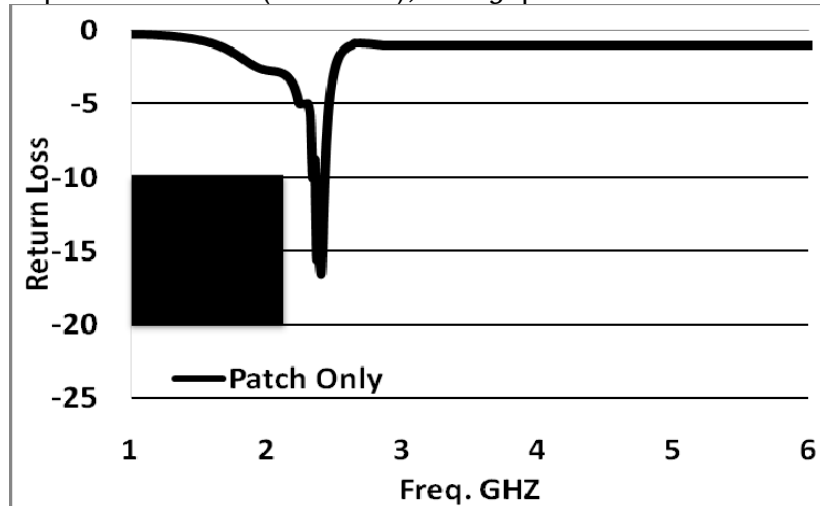
Η κεραία έχει μια απλή δομή που τροφοδοτείται με μια μικροταινιακή γραμμή 50Ω. Το διηλεκτρικό υλικό που έχει επιλεγεί για τη σχεδίαση είναι FR-4 που έχει διηλεκτρική σταθερά 4.4, ενώ το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος είναι  $h = 1.57\text{mm}$ . Η διάσταση της κεραίας είναι  $25.6 \times 26 \times 3.5\text{ mm}$ , και οι επιμέρους διαστάσεις φαίνονται παραπάνω, στο σχήμα 1.13.

Η προτεινόμενη αυτή κεραία ικανοποιεί την απαίτηση για κάλυψη εφαρμογών στο Wireless Local Area Network (WLAN) αλλά και στο



Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX). Κάποιες παράμετροι επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της απόκρισης

Η διάταξη που εξετάζεται [4] αποτελείται από μια κύρια άνω πλάκα (βραχίονας 1), μια ορθογώνια σχισμή, έναν αγωγό βραχυκύκλωσης, μια πλάκα βραχυκύκλωσης, ένα δεύτερο βραχίονα και ένα επίπεδο γείωσης. Η άνω πλάκα αρχικά έχει σχεδιαστεί ξεχωριστά έτσι ώστε να λειτουργεί στη συχνότητα του WLAN (2.4 GHz), όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.14 Η απόκριση συχνότητας για την άνω πλάκα μόνο

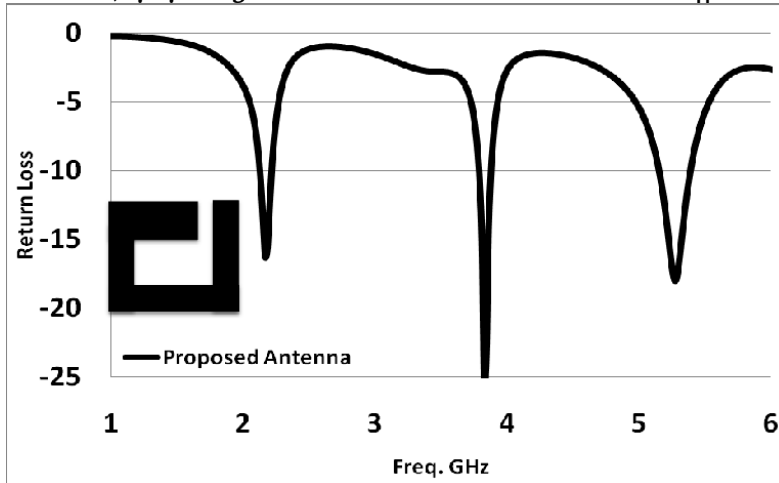
Το επόμενο βήμα για την επίτευξη λήψης και σε άλλη ζώνη συχνοτήτων είναι η δημιουργία μιας ορθογώνιας σχισμής στην κύρια άνω πλάκα. Η σχισμή γίνεται στο πάνω αριστερά άκρο, δίνοντας έτσι ένα σχήμα σαν L, και έτσι το τμήμα εκείνο καλείται βραχίονας 1 (arm 1). Με τη προσθήκη αυτής της σχισμής δημιουργείται μια ακόμα ζώνη συχνοτήτων στα 5.2 GHz, ενώ ταυτόχρονα παραμένει και η αρχική ζώνη στα 2.4 GHz, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.15. με την αύξηση ή μείωση των διαστάσεων της σχισμής η συχνότητα μπορεί να μετακινηθεί σε χαμηλότερη ή υψηλότερη ζώνη.



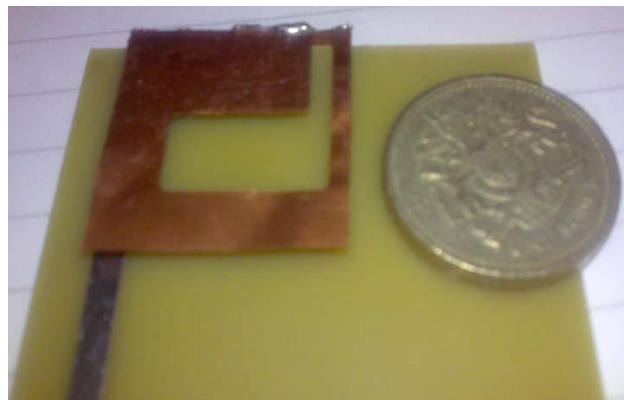
Σχήμα 1.15 Απόκριση συχνότητας για το βραχίονα 1 (Arm 1)

Έχοντας ήδη δημιουργήσει δυο ζώνες συχνοτήτων από την κύρια άνω πλάκα στα 2.4 GHz και από την εισαγόμενη σχισμή στα 5.2 GHz απομένει να καλυφθεί η ζώνη στα 3.7GHz. Αυτό επιτυγχάνεται με την

προσθήκη ενός ακόμα βραχίονα προσθέτοντας έτσι στη διάταξη και τη ζώνη στα 3.7 GHz, γεγονός που πιστοποιείται από το σχήμα 1.16.

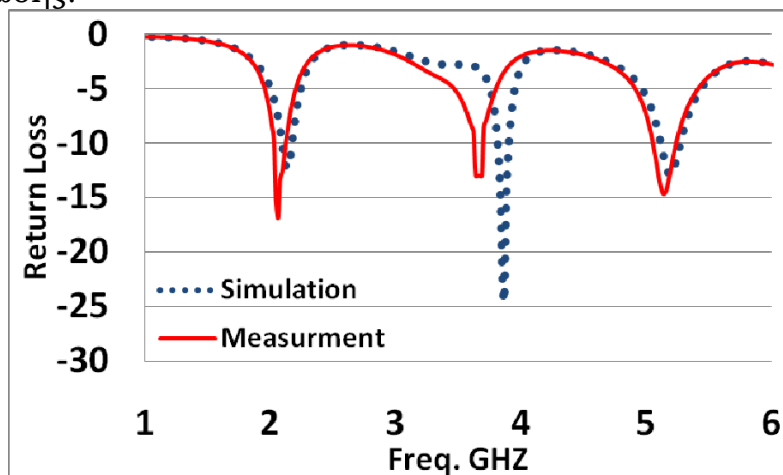


Σχήμα 1.16 Απόκριση συχνότητας μετά την προσθήκη του βραχίονα 2 (Arm 2)



Σχήμα 1.17 Πρωτότυπο της προτεινόμενης κεραίας

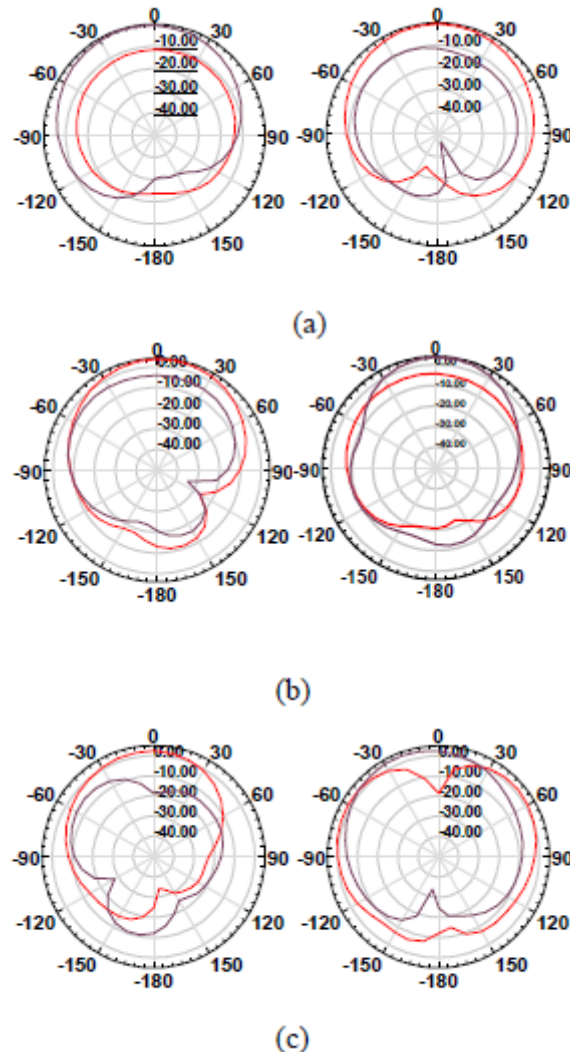
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.18 υπάρχει καλή συμφωνία ανάμεσα στην κατασκευασμένη διάταξη και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 1.18 Απόκριση συχνότητας της προσομοίωσης και των μετρήσεων

Από τα διαγράμματα ακτινοβολίας (σχήμα 1.19) είναι φανερό ότι η κεραία προσφέρει σταθερή απόκριση στις ζώνες συχνοτήτων των WLAN

και WiMAX. Επίσης, το κέρδος της διάταξης είναι 2 dBi για την πρώτη ζώνη (2.4 GHz), 3 dBi για τη δεύτερη (3.2 GHz) και 5 dBi για την τρίτη (5.2 GHz).



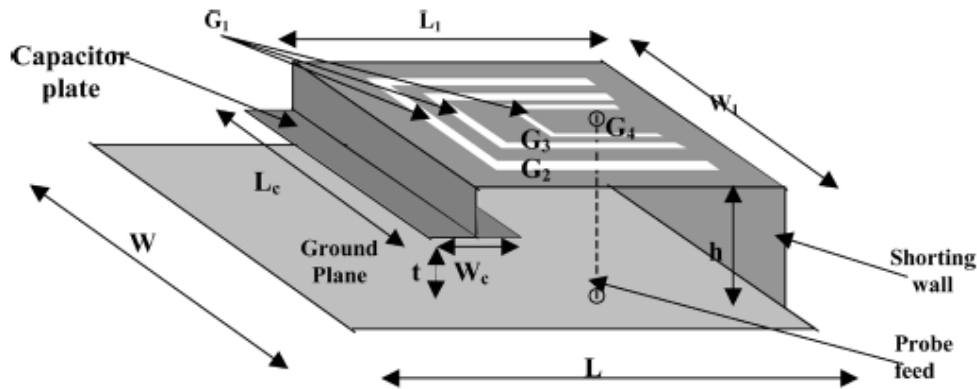
Σχήμα 1.19 Διαγράμματα ακτινοβολίας στα (a) 2.4GHz, (b) 3.7 GHz, (c) 5.2 GHz

### 1.5.3 Απλά τροφοδοτούμενη PIFA τετραπλής ζώνης για ασύρματες εφαρμογές

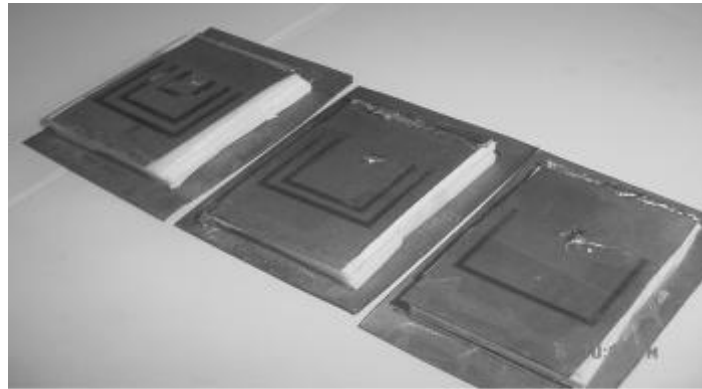
Μια ακόμα κεραία PIFA έχει αναπτυχθεί [5] με σκοπό να λειτουργεί για εφαρμογές GSM (Global System for Mobile Communications), DCS (Distributed Control System), Bluetooth (IEEE 802.11a) και WLAN (Wireless Local Area Network). Η κεντρική συχνότητα του GSM είναι στα 900 MHz για τα κινητά τηλέφωνα, ενώ για κινητές κυψελωτές εφαρμογές DCS είναι 1.8 GHz. Επιπλέον, οι εφαρμογές Bluetooth απαιτούν συχνότητα στα 2.4 GHz και η ζώνη των WLAN έχει κεντρική συχνότητα 5.2 GHz.

Η PIFA που υλοποιήθηκε [5] έχει ένα μοναδικό ομοαξονικό καλώδιο για τροφοδοσία, ενώ χρησιμοποιείται υπόστρωμα αφρού για λιγότερο βάρος, περισσότερο άκαμπτη δομή και για λόγους θωράκισης από εξωγενείς παράγοντες που επιδρούν αρνητικά στα χαρακτηριστικά της κεραίας. Τρεις σχισμές σε σχήμα U με συγκεκριμένες διαστάσεις

προστίθενται στη διάταξη στην κατάλληλη θέση έτσι ώστε να λειτουργεί η κεραία στις προαναφερθείσες τέσσερις συχνότητες. Για να επιτευχθεί περαιτέρω μείωση του μεγέθους της κεραίας τοποθετείται ένα χωρητικό φορτίο στην κατακόρυφη κατεύθυνση.



Σχήμα 1.20 Γεωμετρικές διαστάσεις της προτεινόμενης PIFA με χωρητικό φορτίο



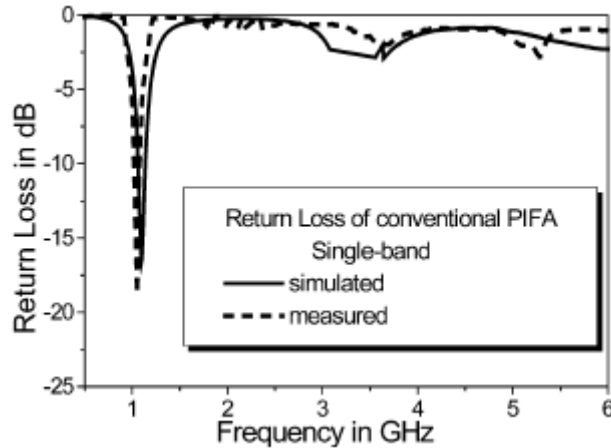
Σχήμα 1.21 Φωτογραφία των κατασκευασμένων κεραίων (τετραπλής, τριπλής και διπλή ζώνης)

Η συχνότητα συντονισμού της κεραίας μπορεί να υπολογιστεί περίπου από τον τύπο 1.4:

$$(L_i + W_i) = \frac{\lambda_i}{4(\sqrt{\epsilon_r})} \quad (1.4)$$

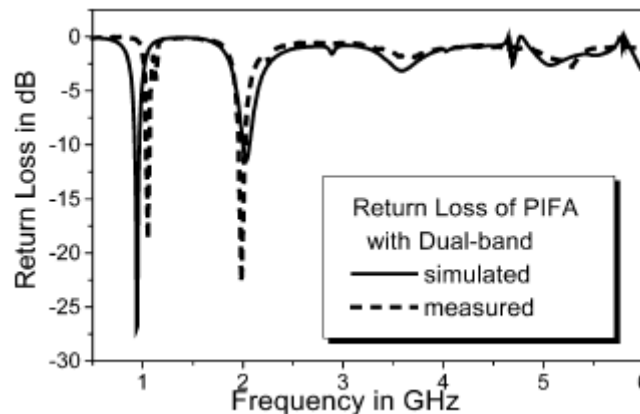
Στον παραπάνω τύπο όπου  $\lambda_i$  είναι το μήκος κύματος στη συχνότητα συντονισμού στην  $i$  ζώνη,  $L_i$  και  $W_i$  είναι το μήκος και το πλάτος αντίστοιχα της ακτινοβολούσας επιφάνειας στην ζώνη λειτουργίας και  $\epsilon_r$  η διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος.

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η προτεινόμενη διάταξη αρχικά θεωρείται μια απλή PIFA στην οποία το υπόστρωμα αφρού έχει ύψος  $h = 8$  mm (για συχνότητα λειτουργίας στα 5.2 GHz). Οι διαστάσεις αυτής της κεραίας είναι  $(L_1, W_1) = (61, 40)$  mm, ενώ το ομοαξονικό καλώδιο συνδέεται απευθείας στην άνω πλάκα σε μια απόσταση που ισούται με 22 mm από το σημείο βραχυκύκλωσης (shorting edge). Στο επίπεδο γείωσης η πλάκα έχει μήκος  $L = 100$  mm και πλάτος  $W = 60$  mm.



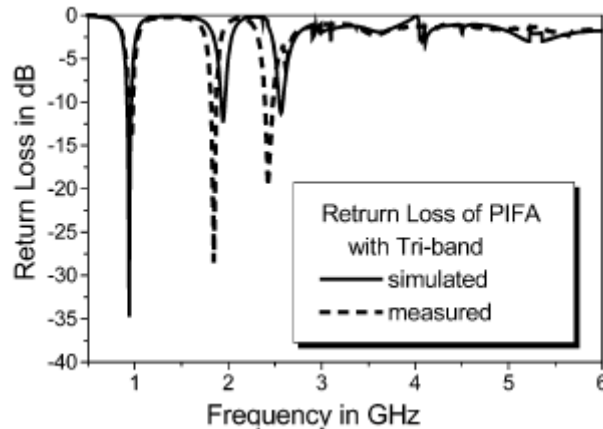
Σχήμα 1.22 Συντελεστής ανάκλασης της διάταξης για μονή ζώνη

Η πρώτη σχισμή σε σχήμα U προστίθεται με διαστάσει  $(L_2, W_2) = (23, 30)$  mm στο κέντρο της ακτινοβολούσας επιφάνειας σε απόσταση 18.5 mm από το σημείο βραχυκύκλωσης (shorting edge). Το μήκος και το πλάτος αυτής της σχισμής σχηματίζουν το εμπόδιο που πρέπει να αποφύγει το ρεύμα εισόδου. Αυτό συμβαίνει με την διάδοσή του κυκλικά γύρω από αυτό, δημιουργώντας έτσι τη δεύτερη συχνότητα συντονισμού. Σε αυτή την περίπτωση οι συχνότητες συντονισμού όπως προκύπτουν από την προσομοίωση είναι 0.95 και 2 GHz.



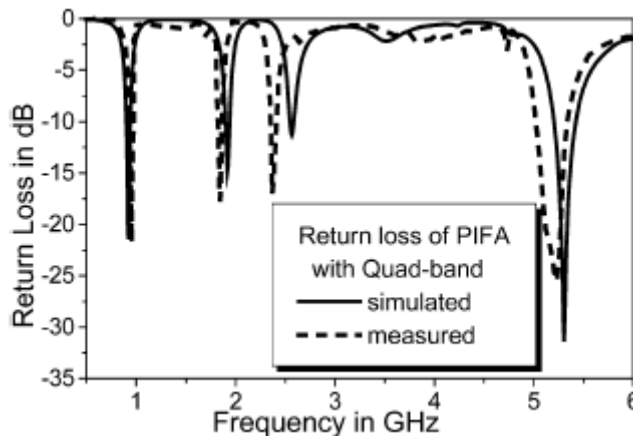
Σχήμα 1.23 Συντελεστής ανάκλασης με μια σχισμή U για διπλή ζώνη

Στην ίδια λογική με πιο πάνω προστίθεται η δεύτερη σχισμή σε σχήμα U προσθέτοντας έτσι την Τρίτη συχνότητα συντονισμού στη διάταξη για 2.4 GHz. Οι διαστάσεις της μεσαίας αυτή σχισμής είναι  $(L_3, W_3) = (18, 20)$  mm.



Σχήμα 1.24 Συντελεστής ανάκλασης με δύο ορισμένες  $U$  για τριπλή ζώνη

Τέλος η τρίτη ορισμή προστίθεται στην κεραία με διαστάσεις  $(L_4, W_4) = (9.5, 8)$  mm. Επιτυγχάνεται έτσι ο αρχικός σκοπός να δημιουργηθεί μια κεραία τετραπλής ζώνης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.25.



Σχήμα 1.25 Συντελεστής ανάκλασης με τρεις ορισμένες  $U$  για τετραπλή ζώνη

Η κεραία έχει κέρδος περίπου 9 dBi, που είναι μια αποδεκτή τιμή για τις περισσότερες κινητές και ασύρματες εφαρμογές. Η προσαρμογή στις υψηλότερες συχνότητες μπορεί να επιτευχθεί ρυθμίζοντας το πλάτος των ορισμών  $G_2, G_3, G_4$ . Το καλύτερο αποτέλεσμα προκύπτει όταν το πλάτος των αποστάσεων αυτών είναι ίσο για κάθε περίπτωση, δηλαδή  $G_1=G_2=G_3=G_4$ .

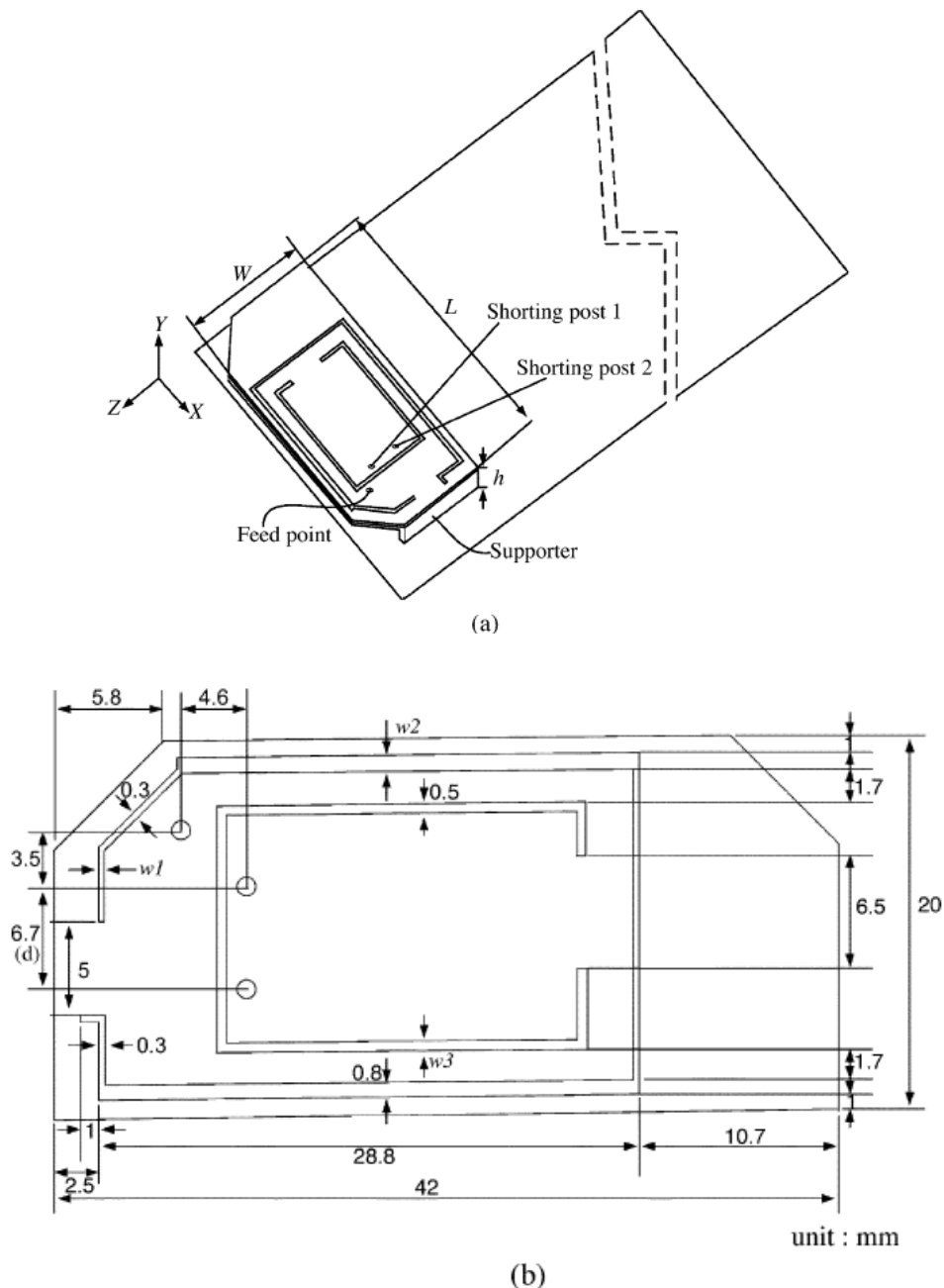
#### 1.5.4 Ενσωματωμένη PIFA τριπλής ζώνης για ασύρματα τερματικά

Για την κάλυψη της ανάγκης που έχει προκύψει, πως ένα ασύρματο τερματικό κερνού πρέπει να έχει πρόσβαση σε υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο ανεξαρτήτως χρόνου ή τοποθεσίας, αναπτύχθηκε μια κεραία PIFA τριπλής ζώνης [6]. Η διάταξη αυτή που καλύπτει τις ζώνες GSM/DCS/IMT-2000 αποτελείται από δύο αγωγούς βραχυκύκλωσης, αγωγό τροφοδοσίας και δύο ορισμές σε σχήμα C. Το μέγιστο κέρδος για την κεραία εμφανίζεται στις συχνότητες των 950 MHz και 1860 MHz με τιμές 1.58 dBi και 1.3 dBi αντίστοιχα.

Το εύρος ζώνης της κεραίας αυτής βελτιώνεται ρυθμίζοντας την τοποθεσία και την απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς βραχυκύκλωσης

καθώς επίσης και με αλλαγή του πλάτους των σχισμών. Η αλλαγή των διαστάσεων του αγωγού βραχυκύκλωσης που είναι κοντά στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας είναι μια μέθοδος για την μείωση του μεγέθους της, αλλά ταυτόχρονα συντελεί και στη μείωση του εύρους ζώνης.

Η εσωτερική κεραία που τοποθετήθηκε στην κεντρική πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board-PCB) φαίνεται στο σχήμα 1.26. Το στρώμα του PCB έχει σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r = 4.6$  και διαστάσεις  $45 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ .



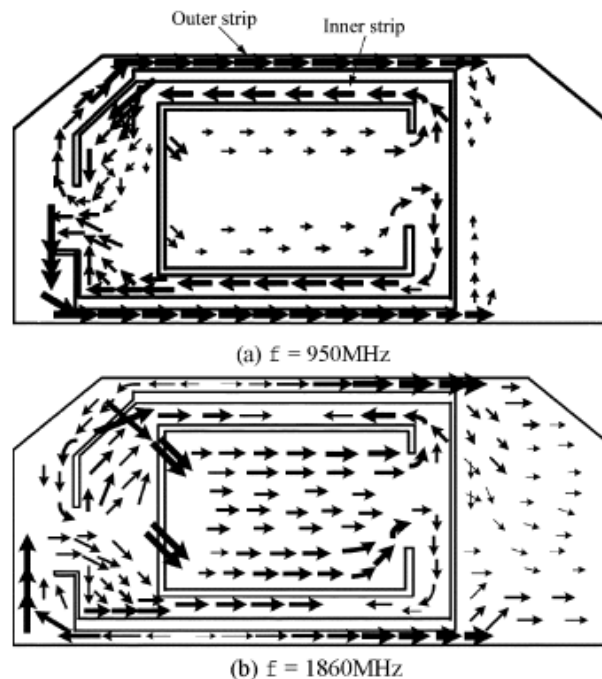
Σχήμα 1.26 Γεωμετρία της διάταξης (a) Τρισδιάστατη απεικόνιση (b)Κάτοψη

Η χρήση των σχισμών σε σχήμα C είναι αρκετά σημαντική καθώς η υψηλή συχνότητα συντονισμού (1860 MHz) οφείλεται στο μέσον της περιοχής που τις περιέχει ενώ η χαμηλή συχνότητα συντονισμού (950

MHz) οφείλεται στο εξωτερικό τους τμήμα. Με βελτιστοποίηση των παραμέτρων της κεραίας, μπορεί να επιτευχθεί λήψη σε τριπλή ζώνη συχνοτήτων, καθώς η διάσταση του εξωτερικού τμήματος καθορίζει τη ζώνη GSM, και του εσωτερικού τις ζώνες DCM/IMT-2000.

Δυο αγωγοί βραχυκύκλωσης χρησιμοποιούνται ως κυκλώματα τερματισμού του ρεύματος με χαμηλή αντίσταση. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα μονοπάτι ρεύματος ανάμεσα στο σημείο τροφοδοσίας και τους αγωγούς βραχυκύκλωσης, που συνεισφέρει στον καθορισμό της συχνότητας συντονισμού στις ζώνες DCM/IMT-2000. Αυξάνοντας την απόσταση ανάμεσα στους δύο αγωγούς βραχυκύκλωσης, αυξάνεται και η απόσταση των συχνοτήτων συντονισμού.

Στο σχήμα 1.27 φαίνεται η ροή των ρευμάτων στην επιφάνεια της κεραίας για λειτουργία στις συχνότητες 950 MHz και 1860 MHz. Στη συχνότητα του GSM (950 MHz, σχήμα 1.27a) η ροή των ρευμάτων της άνω πλάκας ξεκινά από τον αγωγό βραχυκύκλωσης 1 και περνά ανάμεσα στην εξωτερική και την εσωτερική λωρίδα. Το συνολικό μήκος της ροής των ρευμάτων είναι περίπου 80mm, δηλαδή το ένα τέταρτο του μήκους κύματος στη συγκεκριμένη συχνότητα. Σε αυτή τη συχνότητα η ροή του ρεύματος στην εξωτερική ταινία είναι αντίθετη με αυτή στην εσωτερική ταινία, γεγονός που αποτελεί βασική αιτία της μειωμένης απόδοσης στις κεραίες στο GSM. Για τη συχνότητα συντονισμού στα 1860 MHz η ροή του ρεύματος στην εσωτερική και στην εξωτερική λωρίδα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακτινοβολία. Όπως είναι εμφανές στο σχήμα 1.27b οι ροές στα υψηλότερα και στα χαμηλότερα μονοπάτια του ακτινοβολητή έχουν την ίδια συμπεριφορά με την προηγούμενη συχνότητα συντονισμού.



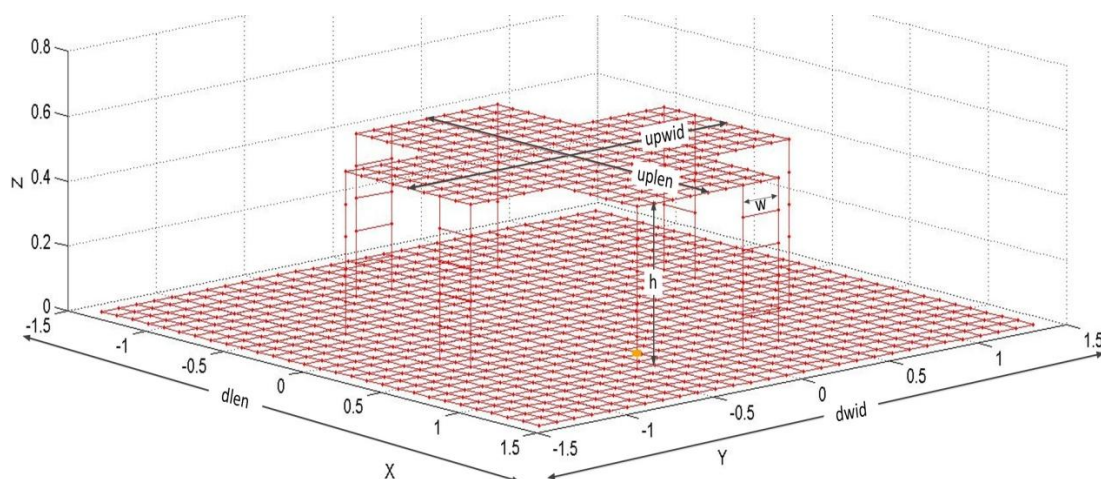
Σχήμα 1.27 Κατανομή ρεύματος στην επιφάνεια στα (a) 950 MHz (b) 1860 MHz



### 1.5.5 Κεραία PIFA χαμηλού κόστους, μεταγωγής για εφαρμογές WiMAX

Η κινητή τεχνολογία WiMAX είναι ένας ιδανικός τρόπος για μια νέα γενιά κινητών εφαρμογών διαδικτύου που συμπληρώνεται από μια ταυτόχρονη αλλαγή της συμπεριφοράς των καταναλωτών. Η κύρια αυτή αλλαγή στην συμπεριφορά των καταναλωτών μπορούν να οριστεί ως μια ισχυρή μεταστροφή στην ανάγκη για φορητότητα. Στην περίπτωση αυτή όλο και περισσότερη προσοχή δίνεται στο σχεδιασμό των νέων κινητών τηλεφώνων που προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, μείωση των παρεμβολών, μετριασμό πολλαπλών δρόμων κλπ. Η διάταξη που προτείνεται [7] είναι μια Cross-PIFA για κινητές εφαρμογές WiMAX στη συχνότητα των 3.5 GHz στοχεύοντας στο συνδυασμό τεχνολογίας Switched-Parasitic Arrays (SPAs) με το εύρος ζώνης και το χαμηλό προφίλ των κεραιών PIFA.

Η προτεινόμενη δομή [7] αποτελείται από μια αγωγίμη πλάκα (τέσσερις PIFA ενωμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζεται σταυρός, η οποία βρίσκεται πάνω από ένα πεπερασμένο επίπεδο γείωσης. Τα δύο επίπεδα ενώνονται με 4 αγωγούς τροφοδοσίας (το ένα από τα οποία είναι κάθε στιγμή ενεργό) και από 4 στοιχεία που αποτελούν αγωγούς βραχυκύκλωσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.28.



Σχήμα 1.28 Διαστάσεις και αρχιτεκτονική της Cross-PIFA

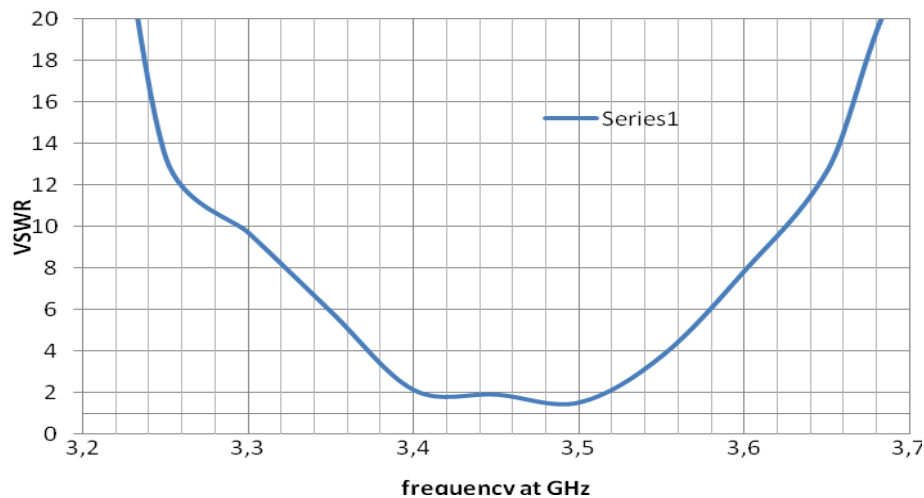
Τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας και απόδοσης της διάταξης μπορούν να προσαρμοστούν με την αλλαγή των διαστάσεων της. Επιπλέον, με τον ηλεκτρικό έλεγχο των ενεργών (καλώδιο τροφοδοσίας) και παθητικών (αγωγούς βραχυκύκλωσης) στοιχείων είναι δυνατό να στραφεί το διάγραμμα ακτινοβολίας προς την οριζόντια κατεύθυνση, γεγονός που οφείλεται και στην συμμετρία της δομής. Επίσης μεταβάλλοντας τις διάφορες διαστάσεις που εμφανίζονται στη διάταξη μπορεί να επιτευχθεί το απαιτούμενο εύρος ζώνης στη ζητούμενη κάθε φορά συχνότητα. Για να συμβούν όλα αυτά, η κεραία υλοποιείται μέσω του πακέτου λογισμικού SuperNEC και βελτιστοποιείται με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων.

Η διάταξη που αναπτύχθηκε έχει αρκετά μικρές διαστάσεις ( $12 \times 12$  cm), ικανοποιητική κατευθυντικότητα για κινητά τερματικά με κέρδος 6.2 dB, με εύρος ζώνης 120 MHz με κεντρική συχνότητα τα 3.5 GHz. Για να προκύψουν αυτές οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών χρειάστηκε να τρέξουν αρκετοί γενετικοί αλγόριθμοι και στον πίνακα 1.2 φαίνονται το εύρος τιμών που λάμβανε η διάταξη αλλά και οι τιμές από τις οποίες προκύπτει η τελική βελτιστοποιημένη δομή.

Πίνακας 1.2 Εύρος τιμών και αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου

Element	Range of Variation	Step	Results	Physical Dimentions
<b>Length of top plate (uplen)</b>	$0,15\lambda_0 - 1,5\lambda_0$	$0,05\lambda_0$	$0,9\lambda_0$	7,7 cm
<b>Width of top plate (upwid)</b>	$0,15\lambda_0 - 1,5\lambda_0$	$0,05\lambda_0$	$0,9\lambda_0$	7,7 cm
<b>Length of ground plate (dlen)</b>	$UpLen + 2*(0,05\lambda_0 - 0,5\lambda_0)$	$0,05\lambda_0$	$UpLen + 0,25\lambda_0$	12 cm
<b>Width of ground plate (dwid)</b>	$UpWid + 2*(0,05\lambda_0 - 0,5\lambda_0)$	$0,05\lambda_0$	$UpWid + 0,25\lambda_0$	12 cm
<b>Height of wires/shorting strips (h)</b>	$0,05\lambda_0 - 0,2\lambda_0$	$0,05\lambda_0$	$0,05\lambda_0$	0,42 cm
<b>Width of shorting strips (w)</b>	$0,05\lambda_0 - 0,4\lambda_0$	$0,05\lambda_0$	$0,25\lambda_0$	2,14 cm

Το εύρος ζώνης καθορίζεται από τις συχνότητες εκείνες στις οποίες η τιμή του συντελεστή ανάκλασης είναι μικρότερη από -10 dB, που σημαίνει τιμή του VSWR (λόγου στασιμών) μικρότερη του 2, θεωρώντας χαρακτηριστική αντίσταση  $50 \Omega$ . Στο σχήμα 1.30 φαίνεται ο VSWR σε συνάρτηση με τη συχνότητα στη ζώνη γύρω από τα 3.5 GHz.



Σχήμα 1.29 Ο λόγος στάσιμων (VSWR) της βελτιστοποιημένης διάταξης μεταγωγής δέσμης

## **Κεφάλαιο 2**

---

# Επίγεια Ψηφιακή Μετάδοση Βίντεο- (Digital Video Broadcasting Terrestrial, DVB-T)

### **2.1 Εισαγωγή**

Από την στιγμή της εφεύρεσης της, η τηλεόραση επηρεάζει συνεχώς τον τρόπο ζωής και πλέον αποτελεί το κυριότερο μέσο για ενημέρωση και ψυχαγωγία. Λόγω της αυξανόμενης χρήσης της, η τηλεόραση είναι πολύ δεκτική στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών που εξελίσσουν και εμπλουτίζουν τις υπηρεσίες που προσφέρει. Έτσι, η αναλογική τηλεόραση, που εμφανίστηκε αρχικά, δίνει πλέον τη θέση της στην ψηφιακή τηλεόραση, που αποτελεί ένα σύγχρονο τρόπο μετάδοσης των κινούμενων εικόνων και του ήχου. Το παραχθέν τηλεοπτικό πρόγραμμα ενώνεται με άλλες υπηρεσίες όπως κείμενο και διαδραστικότητα βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Χρησιμοποιούνται ψηφιακά διαμορφωμένα δεδομένα, τα οποία είναι συμπιεσμένα και απαιτείται αποκωδικοποίηση από ένα ειδικά σχεδιασμένο σει τηλεόρασης ή μια τυπική συσκευή (αποκωδικοποιητής). Τα πλεονεκτήματα που δίνει είναι πολλά έναντι του αναλογικού συστήματος μετάδοσης τηλεόρασης που χρησιμοποιούνταν για σχεδόν εβδομήντα χρόνια.

### **2.2 Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση**

Η μετάδοση των τηλεοπτικών σημάτων μέχρι και πριν λίγα χρόνια γινόταν μέσω αναλογικών εκπομπών ευρείας ζώνης. Κατά την αναλογική μετάδοση των σημάτων, η ποιότητα σε ήχο και εικόνα των εκπεμπόμενων προγραμμάτων υποβαθμίζεται, γεγονός που οφείλεται σε πολλές αιτίες. Η ύπαρξη θορύβου στο κανάλι μετάδοσης, οι παρεμβολές που δημιουργούνται από τρίτους καθώς επίσης και οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες του σήματος που οφείλονται στο ανακλαστικό περιβάλλον μετάδοσης αποτελούν μερικές από τις βασικές αιτίες για την υποβάθμιση της ποιότητας της υπηρεσίας που προσφέρεται. Το βασικότερο μειονέκτημα, όμως της αναλογικής μεθόδου εκπομπής σήματος είναι η απαίτηση για μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων με συνέπεια η ευκρίνεια της εικόνας να περιορίζεται σημαντικά.

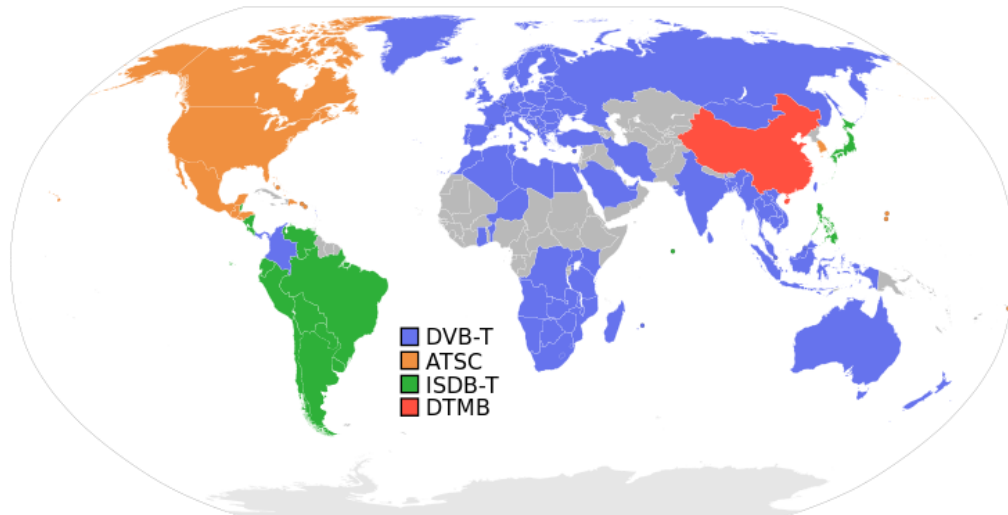
Η ανάγκη, λοιπόν για εξοικονόμηση εύρους ζώνης και αναβάθμισης των τηλεοπτικών υπηρεσιών οδήγησε στην αντικατάσταση της αναλογικής από την ψηφιακή τηλεόραση. Βασικά χαρακτηριστικά της ψηφιακής μετάδοσης είναι η άριστη ποιότητα ήχου και η εικόνα υψηλής ευκρίνειας. Τα χαρακτηριστικά αυτά οφείλονται στις δυνατότητες που έχει η ψηφιακή μετάδοση πληροφορίας να αντιμετωπίζει επιτυχώς τον θόρυβο του διαύλου και τις παρεμβολές που εμφανίζονται σε αυτόν με μηχανισμούς και τεχνικές διόρθωσης λαθών.

Σημαντικό εργαλείο στην ψηφιακή μετάδοση είναι οι αποδοτικές τεχνικές συμπίεσης που χρησιμοποιεί. Η ψηφιοποίηση των οπτικοακουστικών δεδομένων συνοδεύεται από σύγχρονα πρωτόκολλα συμπίεσης, με αποτέλεσμα το τηλεοπτικό πρόγραμμα να καταλαμβάνει πολύ λιγότερη χωρητικότητα. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη συνύπαρξη πολλών διαφορετικών προγραμμάτων καθώς και άλλων υπηρεσιών στην ίδια φασματική περιοχή σε αντίθεση με το παρελθόν όπου ένα κανάλι χρειαζόταν για ένα μόνο αναλογικό πρόγραμμα. Επιπλέον, αξιοσημείωτη είναι η δυνατότητα για εικόνα υψηλής ευκρίνειας αλλά και για εγγραφή σε μονάδα αποθήκευσης του τρέχοντος τηλεοπτικού προγράμματος.

Αυτό που ξεχωρίζει την αναλογική από την ψηφιακή τηλεόραση είναι η νέα εμπειρία της διεπαφής του προγράμματος με το χρήστη. Ο τηλεθεατής χρησιμοποιώντας το τηλεχειριστήριο μπορεί να έχει πρόσβαση σε κάθε είδους πληροφορία, το ψηφιακό κείμενο είναι πιο ευδιάκριτο από το παλαιότερο σύστημα και η «εμπλουτισμένη» τηλεόραση δίνει την επιπρόσθετη ευχαρίστηση σχετιζόμενων πληροφοριών που τρέχουν παράλληλα με το υπό παρακολούθηση τηλεοπτικό πρόγραμμα. Μερικά ψηφιακά συστήματα, μάλιστα επιτρέπουν την επιλογή της κάμερας (οπτικής γωνίας) μέσω της οποίας ο τηλεθεατής παρακολουθεί τα γεγονότα ή την επιλογή πληροφοριών είτε αυτά είναι ειδήσεις είτε αθλητικά είτε άλλο περιεχόμενο. Η ψηφιακή τηλεόραση έχει δυνατότητα ακόμη και να παρέχει υπηρεσίες που πηγάζουν από την πρόσβαση σε σελίδες του διαδικτύου μέσω του τηλεοπτικού σετ.

Για την υπηρεσία της ψηφιακής τηλεόρασης έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα σε παγκόσμιο επίπεδο και κάθε χώρα ή ομάδα χωρών επιλέγει το πρότυπο εκείνο το οποίο ταιριάζει περισσότερο στο τηλεπικοινωνιακό προφίλ και τις ιδιαιτερότητες της (π.χ. γεωγραφικές ή ανάγκες κάλυψης). Η επιλογή κάποιου προτύπου, λοιπόν, βασίζεται στο πόσο καλά αυτό μπορεί να διαχειρίζεται στοιχεία, όπως τις απαιτήσεις κάλυψης, το φάσμα συχνοτήτων, τη δομή των δικτύων, τις συνθήκες λήψης, τον τύπο υπηρεσίας που απαιτείται καθώς και το κόστος που αφορά τους τελικούς χρήστες της υπηρεσίας. Τα τέσσερα βασικότερα πρότυπα που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως αυτή τη στιγμή είναι (σχήμα 2.1):

- Το ATSC (American Television Systems Committee) στις Η.Π.Α.
- Το ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial) στη Λατινική Αμερική
- Το DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestrial) στην Ευρώπη, στη Ρωσία, στις περισσότερες χώρες της Ασίας, στην Αυστραλία και στις περισσότερες χώρες της Αφρικής
- Το DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting) στην Κίνα



Σχήμα 2.1 Τα πρότυπα της ψηφιακής τηλεόρασης στον κόσμο

## 2.3 Το πρότυπο DVB-T

### 2.3.1 Ιστορική Αναδρομή για το DVB

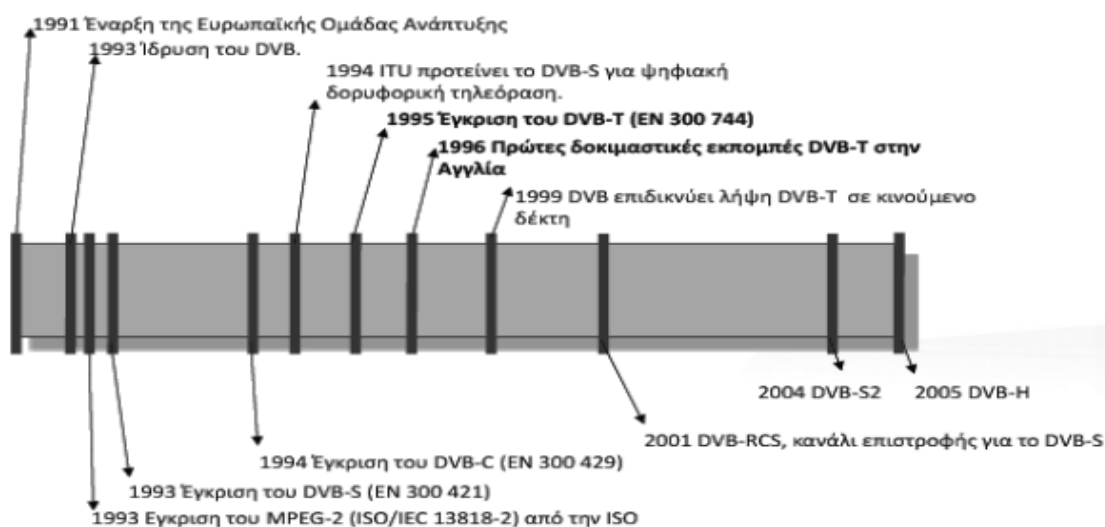
Ο στόχος της μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή μετάδοση ήταν πρωταρχικής σημασίας από τη δημιουργία της τηλεόρασης. Το υψηλό κόστος και η πολυπλοκότητα που απαιτούσε το όλο εγχείρημα, όμως, ήταν αποτρεπτικοί παράγοντες για την υλοποίησή του. Με την ανάπτυξη των τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος αλλά κυρίως με την βελτίωση της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που μείωνε το κατασκευαστικό κόστος η ψηφιακή τηλεοπτική μετάδοση έγινε από απλή δυνατότητα, πραγματικότητα.

Η αρχή έγινε με τη δημιουργία ενός παγκόσμιου οργανισμού αποτελούμενου από εταιρίες παραγωγής τηλεοπτικών προγραμμάτων που αρχικά (1991) ονομάστηκε Electronics Launching Group (ELG). Στην συνέχεια, το 1993, υπεγράφη ένα μνημόνιο συνεργασίας ανάμεσα στους εμπλεκόμενους φορείς, με το οποίο το έργο μετονομάστηκε σε Digital Video Broadcasting Project (DVB). Το πρώτο από τα πρότυπα που συμφωνήθηκε ήταν το DVB-S (1994), που αφορούσε δορυφορική ψηφιακή μετάδοση, ενώ ακολούθησαν και άλλα που συνοψίζονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Πρότυπα για το DVB ανάλογα με την υπηρεσία

ΠΡΟΤΥΠΟ DVB	ΣΗΜΑΣΙΑ	DESCRIPTION
<b>DVB-C</b>	Καλωδιακή (Cable)	Το πρότυπο για μετάδοση βίντεο μέσω καλωδιακών δικτύων
<b>DVB-H</b>	Χειρός (Handheld)	Υπηρεσίας DVB για συσκευές χειρός, π.χ. κινητά τηλέφωνα
<b>DVB-RSC</b>	Επιστροφής Δορυφορικού Καναλιού (Return satellite channel)	Δορυφορικές υπηρεσίες DVB services με κανάλι επιστροφής για διαδραστικότητα
<b>DVB-S</b>	Δορυφορική (Satellite services)	Πρότυπο DVB για μετάδοση τηλεοπτικού σήματος μέσω δορυφόρου
<b>DVB-SH</b>	Δορυφορική Χειρός (Satellite handheld)	Μετάδοση υπηρεσίας DVB από δορυφόρο σε συσκευή χειρός
<b>DVB-S2</b>	Δορυφορική 2 <sup>ης</sup> Γενιάς (Satellite second generation)	Η 2 <sup>η</sup> γενιά δορυφορικής μετάδοσης DVB
<b>DVB-T</b>	Επίγεια	Το πρότυπο για την Επίγεια Ψηφιακή Τηλεοπτική Μετάδοση

Το αντίστοιχο πρότυπο για την επίγεια ψηφιακή μετάδοση (DVB-T) παρουσιάστηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιών ETSI (Europeans Telecommunications Standards Institute) το 1993 με τον κωδικό ETS 300 744 και συμφωνήθηκε αρκετά αργότερα, το 1997. Η ιστορική διαδρομή που ακολουθήθηκε συνοψίζεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Ιστορική εξέλιξη DVB

### 2.3.2 Το πρότυπο DVB-T

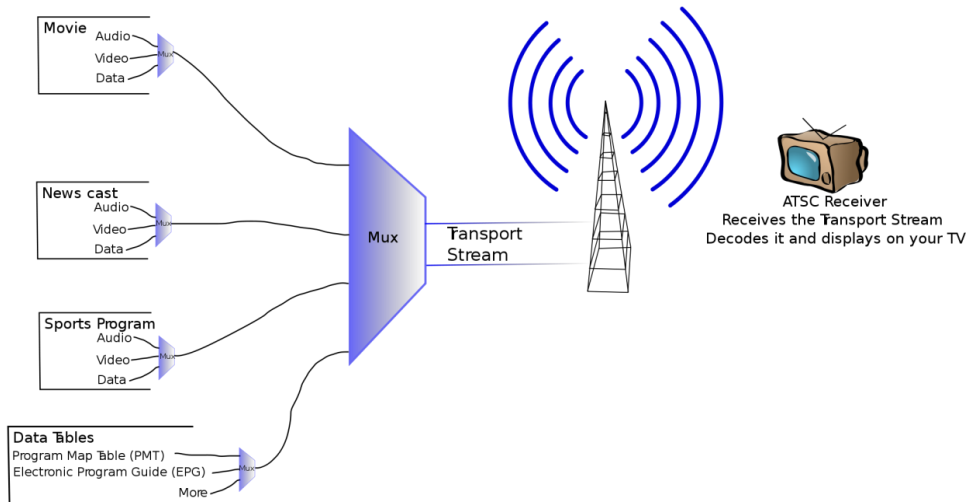
Το DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) αποτελεί το πρότυπο που ορίζει το σύστημα μετάδοσης ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος υψηλής ποιότητας χρησιμοποιώντας σύγχρονη τεχνολογία. Με τη μετάδοση μέσω DVB-T είναι δυνατόν να μεταφέρεται μεγάλος όγκος δεδομένων καθώς, όπως έχει αναφερθεί, σε ένα κανάλι μπορεί ταυτόχρονα να γίνεται η μετάδοση πολλών διαφορετικών προγραμμάτων.

Για να μπορέσει το DVB-T να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις που έχουν αναπτυχθεί, χρησιμοποιεί διαμόρφωση πολλαπλών φέροντων στο σχήμα της πολυπλεξίας με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Ανάλογα με τις απαιτήσεις μετάδοσης ο αριθμός των φερόντων που χρησιμοποιούνται ποικίλει. Όταν επιλέγεται μικρός αριθμός φερόντων τότε κάθε ένα θα πρέπει να έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης για να μπορεί να μεταφέρει το ίδιο μέγεθος πληροφορίας. Στην περίπτωση του DVB-T υπάρχουν δύο επιλογές για τον αριθμό των φερόντων που είναι γνωστές ως 2K (1705 φέροντα με εύρος ζώνης 4 kHz) και 8K (6817 φέροντα με εύρος ζώνης 1 kHz).

Η επιλογή της διαμόρφωσης είναι επίσης ένα σημαντικό κομμάτι του DVB-T που γίνεται ανάμεσα σε τρεις εναλλακτικές : QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Γενικά, υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα στην τιμή του ρυθμού στον οποίο τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν και το σηματοθορυβικό λόγο που μπορεί να γίνει ανεκτός. Έτσι, στις χαμηλότερες μορφές διαμορφώσεων (QPSK) η μετάδοση των δεδομένων δεν είναι τόσο γρήγορη όπως στις υψηλότερες μορφές (64-QAM), όμως μπορεί να γίνει λήψη σήματος με μικρότερη ισχύ σε δυσκολότερες συνθήκες. [8]

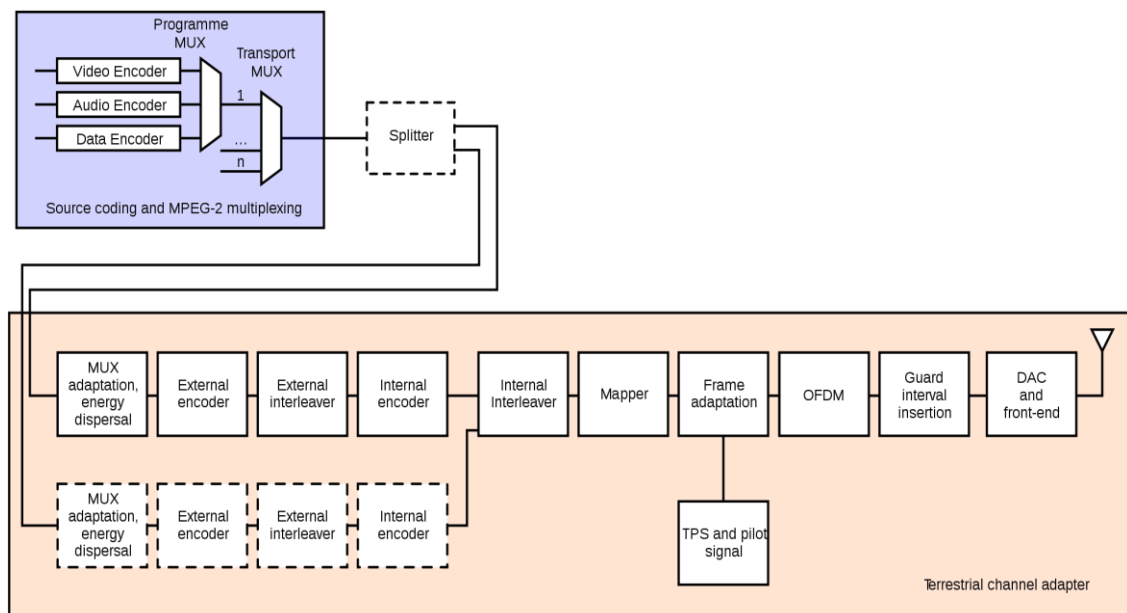
Σε κάθε σύστημα που μεταδίδει δεδομένα θα παρουσιαστούν σφάλματα, τα οποία θα πρέπει να διορθωθούν έτσι ώστε το σήμα να φτάσει στον δέκτη στην σωστή μορφή. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται η τεχνική FEC (Forward Error Correction), ο ρυθμός της οποίας επηρεάζει το ρυθμό με τον οποίο τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν. Στην περίπτωση του DVB-T η διόρθωση σφάλματος γίνεται με συνελκτική κωδικοποίηση ή κωδικοποίηση Reed-Solomon με ρυθμό 1/2, 2/3, , 3/4, 5/6, και 7/8 ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου εκπομπής. [8]

Μέσω του προτύπου DVB-T ορίζονται οι προδιαγραφές για την επίγεια μετάδοση ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος. Λόγω του γεγονότος ότι η μορφή του σήματος βασικής ζώνης και ο αλγόριθμος συμπίεσης περιγράφονται στην προδιαγραφή MPEG-2 (ή MPEG-4), το DVB-T περιορίζεται στον ορισμό ενός συστήματος εκπομπής ευρείας κάλυψης (broadcasting) και στην περιγραφή των λειτουργιών του διαμορφωτή OFDM. Σε αυτόν φτάνει ροή πληροφορίας (transport stream, σχήμα 2.3) από τον πολυπλέκτη MPEG-2, με ενωμένες τι υπηρεσίες εικόνας, ήχου και δεδομένων υπό μορφή σήματος βασικής ζώνης. Στη συνέχεια, παράγεται το προς μετάδοση RF σήμα που έχει εύρος ζώνης 8 MHz και είναι κεντραρισμένο σε ένα από τα κανάλια 21-69 της μπάντας UHF (512 MHz – 806 MHz).



Σχήμα 2.3 MPEG transport stream

Στο μπλοκ διάγραμμα του σχήματος 2.4 φαίνονται οι βασικές λειτουργίες που εφαρμόζονται σε ένα MPEG-2 transport stream (ροή μεταφοράς), έτσι ώστε αυτό να μετατραπεί από σήμα βασικής ζώνης στο προς μετάδοση RF σήμα. Το σήμα βασικής ζώνης είναι διαιρεμένο εξαρχής σε δύο ροές μεταφοράς, ένα σήμα υψηλής και ένα χαμηλής προτεραιότητας, τα οποία διαμορφώνονται ταυτόχρονα σε ένα QAM σχηματισμό. Σε ένα περιβάλλον, στο οποίο οι συνθήκες λήψης δεν είναι πολύ καλές ο δέκτης λαμβάνει μόνο το σήμα υψηλής προτεραιότητας, ενώ όταν οι συνθήκες είναι ιδανικές λαμβάνει και τα δύο.



Σχήμα 2.4 Μπλοκ Διάγραμμα ενός Διαμορφωτή DVB-T

Τα στάδια από τα οποία διέρχεται διαδοχικά ένα σήμα βασικής ζώνης για να μετατραπεί σε RF σήμα είναι τα εξής [9]:

1. Προσαρμογή MPEG-2 πακέτων και τυχαιοποίηση για να κατανεμηθεί η ενέργεια.



2. Εξωτερική κωδικοποίηση (προστασία πακέτων έναντι λαθών με τον κώδικα Reed-Solomon).
3. Εξωτερική συνελκτική διασπορά (convolutional interleaving).
4. Εσωτερική κωδικοποίηση με διάτρητο συνελκτικό κώδικα (punctured convolutional code).
5. Εσωτερική διασπορά (inner interleaving) στον χρόνο και στη συχνότητα.
6. Αντιστοίχιση και διαμόρφωση των φερόντων.
7. Πολυπλεξία κατά OFDM με αντίστροφο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (IFFT) και διαμόρφωση του φέροντος IF.
8. Άνω μετατροπή (up conversion) στην τελική RF συχνότητα. (Η τελευταία λειτουργία δεν υποστηρίζεται από όλους τους διαμορφωτές, οπότε απαιτείται ένα εξωτερικό module για την άνω μετατροπή της συχνότητας).

### 2.3.3 Τρόπος Λειτουργίας του DVB-T

Το μεταδιδόμενο σήμα οργανώνεται σε πλαίσια καθένα από τα οποία αποτελείται από 68 OFDM σύμβολα. Κάθε σύμβολο αποτελείται από 6817 φέροντα στον  $8k$  τρόπο και 1705 φέροντα στον  $2k$  τρόπο μετάδοσης και μεταδίδεται μέσα σε διάρκεια  $T_s$ . Αυτή η διάρκεια αποτελείται από δύο μέρη: ένα χρήσιμο μέρος με διάρκεια  $T_u$  και ένα διάστημα φύλαξης (guard interval) με διάρκεια  $\Delta$ . Το διάστημα φύλαξης είναι μια κυκλική επανάληψη του ωφέλιμου κομματιού και τοποθετείται στην αρχή κάθε συμβόλου.

Για να αποφευχθούν οι παρεμβολές από τις πολυδιαδρομικές συνιστώσες ή από σήματα γειτονικών εκπομπών στην περίπτωση των SFN (Single Frequency Networks) δικτύων εισάγεται το διάστημα φύλαξης μεταξύ των OFDM συμβόλων. Το διάστημα αυτό, που ουσιαστικά σημαίνει ότι τα σύμβολα δεν μεταδίδονται συνεχόμενα, αλλά μεσολαβεί κάποιος χρόνος ανάμεσα τους, προηγείται κάθε συμβόλου OFDM. Η ηχώ από το προηγούμενο σύμβολο θα πρέπει να φτάνει μέσα στο διάστημα φύλαξης, αλλιώς προκαλεί παρεμβολή στο σύμβολο που ακολουθεί και αυξάνεται ο ρυθμός σφαλμάτων (BER). Για το λόγο αυτό το επιλεχθέν μήκος του διαστήματος φύλαξης εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή που πρέπει να καλυφθεί. Για τα SFN δίκτυα, η απόσταση ανάμεσα στους δυο πιο απομακρυσμένους πομπούς καθορίζει το απαραίτητο μήκος του διαστήματος αυτού. Ένα μεγάλο διάστημα φύλαξης αντιμετωπίζει καλά και τις ηχώ που καταφθάνουν αργότερα στο δέκτη. Αν όμως αυξηθεί το διάστημα φύλαξης χωρίς να αυξηθεί παράλληλα και η διάρκεια του συμβόλου, θα μειωθεί η χωρητικότητα του καναλιού και ο χρήσιμος ρυθμός μετάδοσης. Αν αυξηθεί και η διάρκεια του συμβόλου, τότε η χωρητικότητα του καναλιού δεν θα επηρεαστεί αλλά θα γίνει πιο δύσκολη η επεξεργασία του σήματος λόγω του μεγαλύτερου αριθμού φερόντων που θα περιέχει το καινούριο σύμβολο.

Μια βασική απαίτηση του συστήματος είναι το εύρος ζώνης να ταιριάζει σε ένα κανάλι 8 MHz. Από αυτή την απαίτηση βγαίνει ο αριθμός των πιθανών φερόντων, 6817 για κάθε σύμβολο OFDM για τον  $8k$  τύπο (από αυτά τα 6048 είναι χρήσιμα για πληροφορία ενώ τα

υπόλοιπα χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό και σηματοδότηση) και 1705 για το  $2k$  OFDM (τα 1512 είναι χρήσιμα για πληροφορία). Τα σύμβολα αυτά μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια του IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) αλγορίθμου και μετά εισάγονται εικονικά φέροντα για να γίνει ο συνολικός αριθμός δύναμη του δύο, ώστε να μπορεί ύστερα να χρησιμοποιηθεί ο ταχύτερος αλγόριθμος IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Από τη μεριά του δέκτη, η ανάκτηση των σημάτων γίνεται χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους  $8k$ -FFT ή  $2k$ -FFT αλγορίθμους.

Για να επιτευχθεί η προστασία από λάθη στις πραγματικές συνθήκες μετάδοσης, υπάρχει επιλογή ανάμεσα σε 5 ρυθμούς κωδικοποίησης, όπως έχει προαναφερθεί. Οι ρυθμοί αυτοί είναι :  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $5/6$ ,  $7/8$ . Ο ρυθμός  $1/2$  έχει το μεγαλύτερο πλεόνασμα, αλλά παρέχει τη μεγαλύτερη ασφάλεια μετάδοσης. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κανάλια που χαρακτηρίζονται από υψηλό επίπεδο παρεμβολών. Από την άλλη ο ρυθμός  $7/8$  έχει μικρό πλεόνασμα, αλλά παρέχει μικρή ασφάλεια και είναι κατάλληλος μόνο για κανάλια με χαμηλά επίπεδα παρεμβολών.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του συστήματος είναι η ιεραρχική διαμόρφωση. Ενώ η ποιότητα του ήχου και του βίντεο στην αναλογική μειώνεται σταδιακά, οι τεχνικές ψηφιακής μετάδοσης διατηρούν την ποιότητα λήψης σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο και το σήμα αποδυναμώνεται εντελώς καθώς οι συνθήκες μετάδοσης δυσκολεύουν. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα και το σύστημα να γίνει περισσότερο αποδοτικό, τα δεδομένα που πρόκειται να μεταδοθούν χωρίζονται σε δυο μέρη. Στο πρώτο μέρος περιέχεται η βασική υπηρεσία τηλεόρασης με ένα σχετικά μικρό ρυθμό μετάδοσης και υψηλή προστασία από λάθη. Το δεύτερο μέρος (διακεκομμένη γραμμή του σχήματος 2.4) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για επιπρόσθετες υπηρεσίες με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και μικρότερη προστασία από λάθη. Γενικά, το δεύτερο μέρος μπορεί να χρησιμοποιείται είτε για να μεταδίδονται επιπρόσθετα προγράμματα είτε για αύξηση της ποιότητας εκμεταλλευόμενοι τον υψηλό ρυθμό που χρησιμοποιείται. Το επίπεδο προστασίας μπορεί να προσαρμοστεί διαλέγοντας διαφορετικούς ρυθμούς κωδικοποίησης του συνελκτικού κωδικοποιητή, ενώ και τα δυο ρεύματα δεδομένων διαμορφώνονται ταυτόχρονα. Κάθε φέρον διαμορφώνεται από δύο σύμβολα δεδομένων με διαφορετική προστασία από λάθη το καθένα. Το σύμβολο με την υψηλότερη προστασία διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας την πιο ελαστική μέθοδο διαμόρφωσης και περιέχει την πληροφορία για το τεταρτημόριο του σημείου αστερισμού στο διάγραμμα αστερισμών. Το άλλο σύμβολο παρέχει την πληροφορία για τη θέση του σημείου αστερισμού μέσα στο τεταρτημόριο. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ξεχωριστή εξεργασία σήματος κάθε ρεύματος δεδομένων.

Παρατηρώντας τον πίνακα 2.2, που ακολουθεί, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται με υψηλότερους ρυθμούς κωδικοποίησης της εσωτερικής προστασίας λαθών, μικρότερα διαστήματα φύλαξης και μεγαλύτερα στάδια διαμόρφωσης φέροντος. Αυτό πρακτικά, σημαίνει ότι ένας υψηλός ρυθμός μετάδοσης μπορεί να

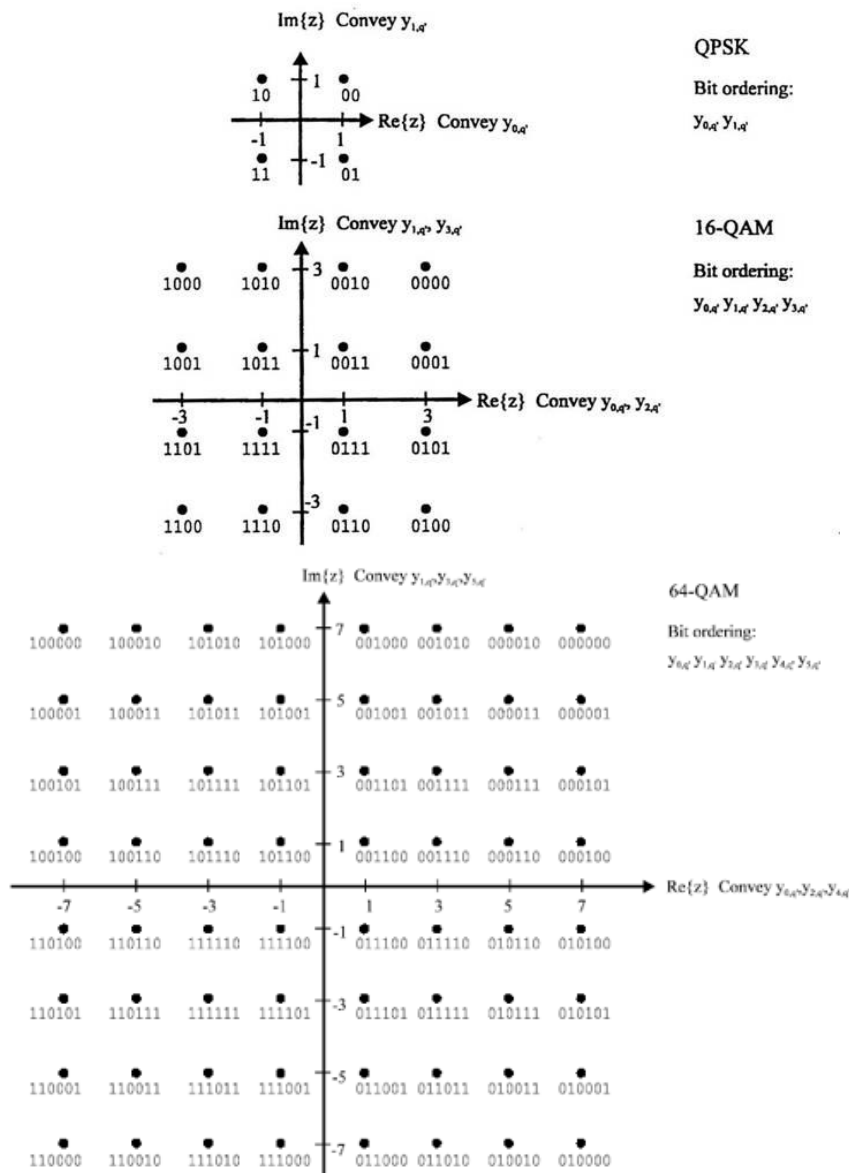
επιτευχθεί μόνο μειώνοντας την προστασία από λάθη. Έτσι ο μικρότερος δυνατός ρυθμός (4,98 Mbps ) αντιστοιχεί στην καλύτερα προστατευμένη μετάδοση (διάστημα φύλαξης 1/4, ρυθμός εσωτερικής κωδικοποίησης 1/2, διαμόρφωση QPSK), ενώ ο μεγαλύτερος ( 31,67Mbps ) έχει τη μικρότερη προστασία από λάθη (διάστημα φύλαξης 1/32, ρυθμός εσωτερικής κωδικοποίησης 7/8, διαμόρφωση 64-QAM). Πρακτικά, χρειάζεται μια ισοστάθμιση ανάμεσα στο χρήσιμο ρυθμό μετάδοσης και στην προστασία από λάθη για κάθε εφαρμογή έχοντας ως γνώμονα και από το είδος της υπηρεσίας που πρέπει να προσφερθεί.

Πίνακας 2.2 Χρήσιμοι ρυθμοί μετάδοσης στο πρότυπο DVB-T

Ρυθμοί Μετάδοσης (Mbps) για σύστημα DVB-T με εύρος ζώνης καναλιού 8 MHz					
Διαμόρφωση	Ρυθμός Κωδικοποίησης	Διάστημα Φύλαξης			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4.976	5.529	5.855	6.032
	2/3	6.635	7.373	7.806	8.043
	3/4	7.465	8.294	8.782	9.048
	5/6	8.294	9.216	9.758	10.053
	7/8	8.709	9.676	10.246	10.556
16-QAM	1/2	9.953	11.059	11.709	12.064
	2/3	13.271	14.745	15.612	16.086
	3/4	14.929	16.588	17.564	18.096
	5/6	16.588	18.431	19.516	20.107
	7/8	17.418	19.353	20.491	21.112
64-QAM	1/2	14.929	16.588	17.564	18.096
	2/3	19.906	22.118	23.419	24.128
	3/4	22.394	24.882	26.346	27.144
	5/6	24.882	27.647	29.273	30.160
	7/8	26.126	29.029	30.737	31.668

#### 2.3.4 Επιλογή Σχήματος Διαμόρφωσης και Ρυθμού Κωδικοποίησης

Η διαμόρφωση OFDM μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε μεταξύ 3 αστερισμών, μέσω των οποίων θα διαμορφωθούν τα φέροντα. Αυτό είναι οι Quadrature Phase Shift Keying (QPSK, περιλαμβάνει 2 bits ανά σύμβολο διαμόρφωσης), 16 σημεία αστερισμού Quadrature Amplitude Modulation (16 QAM, περιλαμβάνει 4 bits ανά σύμβολο διαμόρφωσης) και 64 σημεία αστερισμού Quadrature Amplitude Modulation (64 QAM, περιλαμβάνει 6 bits ανά σύμβολο διαμόρφωσης). Η απεικόνισή τους σύμφωνα με την Gray-scale κωδικοποίηση παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα 2.5. Σημειώνεται, ότι το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης κωδικοποίησης είναι ότι τα γειτονικά σημεία διαφέρουν κατά 1 μόνο bit.



Σχήμα 2.5 Διαγράμματα αστερισμών για τις μεθόδους διαμόρφωσης του προτύπου DVB-T

Η απόσταση μεταξύ των σημείων των αστερισμών καθορίζεται από την παράμετρο διαμόρφωσης  $a$ , με πεδίο τιμών  $\{1, 2, 4\}$ . Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης απόστασης δύο γειτονικών σημείων δύο τεταρτημορίων και της ελάχιστης απόστασης 2 γειτονικών σημείων ενός τεταρτημορίου.

Παράλληλα, έχουμε τη δυνατότητα για κάθε αστερισμό να επιλέξουμε τον επιθυμητό κώδικα διόρθωσης λαθών ανάμεσα από τις τιμές  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $5/6$ , και  $7/8$ . Ο κώδικας  $1/2$  προσφέρει τη μεγαλύτερη προστασία αλλά και μεγάλο πλεονασμό και πρέπει να εφαρμόζεται για κάλυψη περιοχών με ισχυρές παρεμβολές. Στον αντίποδα, ο κώδικας  $7/8$  έχει μικρό πλεονασμό αλλά παρέχει χαμηλή προστασία από παρεμβολές.

Συγκριτικά, μπορούμε να αναφέρουμε ότι χρησιμοποιώντας ως αναφορά τον αστερισμό QPSK και τον ίδιο κώδικα λαθών, ο αστερισμός 16 QAM έχει τη διπλάσια χωρητικότητα και ο αστερισμός 64QAM την τριπλάσια, ενώ ο απαιτούμενος λόγος C/N είναι κατά 6 και 12 dB

μεγαλύτερος αντίστοιχα. Ωστόσο, ταυτόχρονη αύξηση κωρυηκότητας και C/N παρατηρείται και με την αύξηση του κώδικα λαθών χρησιμοποιώντας τον ίδιο αστερισμό.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε και το γεγονός ότι για τον ίδιο κώδικα λαθών, οι διαφορές στο λόγο C/N μεταξύ της σταθερής (Ricean channel) και της φορητής (Rayleigh channel) λήψη είναι μικρές για κώδικα λαθών της τάξης του 1/2, αλλά ανεβαίνοντας σε κώδικα 1/8 ανέρχονται στα 8 dB. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται στο DVB-T, η οποία είναι αρκετά ανθεκτική στα OFDM συστήματα, ώστε δεν αλλάζει από ένα OFDM σύμβολο σε άλλο, όπως π.χ. ένα καθυστερημένο σήμα ή η παρεμβολή από μία αναλογική μετάδοση. Παράλληλα, συγκρίνοντας τις διαμορφώσεις 64 QAM 1/2 και 16 QAM 2/3, διαπιστώνουμε ότι παρέχουν τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης (14,93 Mbits/s με 18,1 Mbits/s). Ωστόσο, μετρήσεις έχουν δείξει ότι η διαμόρφωση 16 QAM 2/3 παρέχει καλύτερη κάλυψη όσο αφορά περιοχές με σταθερή λήψη, ενώ η διαμόρφωση 64 QAM 1/2 για περιοχές με φορητή λήψη.

*Πίνακας 2.3 C/N τιμές για όλες τις υλοποιήσεις του DVB-T για σταθερή (FX), φορητή σε εξωτερικούς χώρους (PO), φορητή σε εσωτερικούς χώρους (PI) και κινητή (MO) λήψη*

System variants	Modulation	Code rate	Gauss	Rice	Rayleigh		
					FX	PO	PI
A1, D1	QPSK	1/2	4.9	5.9	8.1	8.1	11.1
A2, D2	QPSK	2/3	6.8	7.9	10.2	10.2	13.2
A3, D3	QPSK	3/4	7.9	9.1	11.5	11.5	14.5
A5, D5	QPSK	5/6	9.0	10.3	12.8	12.8	15.8
A7, D7	QPSK	7/8	9.9	11.3	13.9	13.9	16.9
B1, E1	16-QAM	1/2	10.6	11.6	13.8	13.8	16.8
B2, E2	16-QAM	2/3	13.0	14.1	16.4	16.4	19.4
B3, E3	16-QAM	3/4	14.5	15.7	18.1	18.1	21.1
B5, E5	16-QAM	5/6	15.6	16.9	19.4	19.4	22.4
B7, E7	16-QAM	7/8	16.1	17.5	20.1	20.1	23.1
C1, F1	64-QAM	1/2	16.2	17.2	19.4	19.4	22.4
C2, F2	64-QAM	2/3	18.4	19.5	21.8	21.8	24.8
C3, F3	64-QAM	3/4	20.0	21.2	23.6	23.6	26.6
C5, F5	64-QAM	5/6	21.4	22.7	25.2	25.2	28.2
C7, F7	64-QAM	7/8	22.3	23.7	26.3	26.3	29.3

### 2.3.5 Επιλογή Διαστήματος Φύλαξης

Η επίγεια τηλεοπτική μετάδοση στις ζώνες VHF/UHF χαρακτηρίζεται από την εξασθένιση και την πολυδιαδρομική διάδοση, λόγω της παρουσίας εμποδίων και ανακλάσεων στο περιβάλλον. Συνεπώς, το σήμα στον δέκτη φτάνει με μία κύρια συνιστώσα σήματος και πολλές συνιστώσες από τις ανακλάσεις, με διαφορετικό πλάτος και καθυστέρηση (κανάλι Ricean). Στη περίπτωση της φορητής λήψης, η κύρια συνιστώσα του σήματος μπορεί να απουσιάζει (κανάλι Rayleigh). Η καθυστέρηση

από αυτές τις «φυσικές ανακλάσεις» περιορίζεται συνήθως σε 20 έως 30  $\mu\text{sec}$  που αντιστοιχούν σε διαφορετική πορεία διάδοσης από περίπου 6 έως 9 χλμ. Η παρουσία πομπών SFN (Single Frequency Network) παράγει ένα σημαντικά πολυπλοκότερο περιβάλλον διάδοσης πολλαπλών διαδρομών, που εισάγει τις «τεχνητές ανακλάσεις» υψηλού πλάτους και μεγάλης καθυστέρησης. Αυτές, συνυπάρχουν με τις φυσικές ηχώ ενώ οι τιμές των χρόνων καθυστέρησης τους εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ των πομπών.

Το μέγιστο μήκος του διαστήματος φύλαξης είναι 224  $\mu\text{s}$  για τον 8K OFDM τρόπο μετάδοσης και 56 $\mu\text{s}$  για τον 2K OFDM τρόπο μετάδοσης. Το διάστημα φύλαξης χρησιμοποιείται για να προστατεύει το σήμα από τις φυσικές και τεχνητές ανακλάσεις. Το μικρότερο 2K OFDM διάστημα φύλαξης (7 $\mu\text{s}$ ) είναι συνήθως αρκετό για να προστατέψει το σήμα από τις φυσικές ανακλάσεις, μόνο που σε μερικές περιπτώσεις, όπως είναι περιοχές με βουνά, οι φυσικές ανακλάσεις μπορεί να ξεπερνούν τα 7 $\mu\text{s}$ .

Υπάρχουν τέσσερα βασικά είδη SFNs :

1. SFN μεγάλης περιοχής (με εκπομπές μεγάλης ισχύος τοποθετημένους σε μεγάλες αποστάσεις αναμεταξύ τους).
2. Τοπικά SFN (με λίγους εκπομπές μεγάλης ισχύος τοποθετημένους σε μεγάλες αποστάσεις αναμεταξύ τους).
3. Δίκτυα πολλών συχνοτήτων (MFNs) με ένα SFN τοπικής εμβέλειας γύρω από κάθε εκπομπό ξεχωριστής συχνότητας.
4. Δίκτυα SFN με εκπομπές μικρής ισχύος που γεμίζουν τα κενά (SFN Gap Fillers) σε ένα δίκτυο πολλών συχνοτήτων (MFN).

Ο 8K τρόπος μετάδοσης μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις. Ο 2K τρόπος μετάδοσης μπορεί να εφαρμοστεί στην τέταρτη περίπτωση και σε περιπτώσεις πυκνών MFN/SFNs αν ο διαχωρισμός των εκπομπών είναι αρκετά μικρός (τέσσερις φορές μικρότερος από το διαχωρισμό των εκπομπών στην αντίστοιχη 8k περίπτωση). Η μεγαλύτερη πιθανή απόσταση μεταξύ των εκπομπών δεν εξαρτάται μόνο από το απόλυτο μήκος του διαστήματος φύλαξης, αλλά και από άλλους παράγοντες, όπως το μήκος του ωφέλιμου διαστήματος συμβόλου (σημαντικά καλύτερη κάλυψη με τον 8k από ότι με τον 2k τρόπο μετάδοσης για το ίδιο απόλυτο μήκος του διαστήματος φύλαξης), το σχήμα διαμόρφωσης, το ρυθμό κωδικοποίησης και τις υλοποιήσεις του δέκτη.

Για ένα δεδομένο μήκος του διαστήματος φύλαξης ο 8k τρόπος μετάδοσης προσφέρει μεγαλύτερο χρήσιμο ρυθμό μετάδοσης. Η επιλογή ανάμεσα στους δυο τρόπους μετάδοσης εξαρτάται από την ανάγκη για SFN λειτουργία μέσα στο συνολικό δίκτυο καθώς και από τη διαθεσιμότητα και το κόστος των δεκτών. Οι αποκωδικοποιητές (μόνο για) 2k OFDM δεν μπορούν να λάβουν μεταδόσεις 8k OFDM ενώ οι αποκωδικοποιητές 8k OFDM μπορούν να λάβουν και από τις δύο μεταδόσεις.

Πίνακας 2.4 Πίνακας τιμών για το διαστήμα φύλαξης σε κανάλι 8 MHz

Αναλογία με το μήκος του ωφέλιμου διαστήματος	Μήκος του διαστήματος φύλαξης [ $\mu$ s]	
	8K τρόπος	2K τρόπος
1/4	224	56
1/8	112	28
1/16	56	14
1/32	28	7

### 2.3.6 Επιλογή μεταξύ Ιεραρχικού και Μη-Ιεραρχικού τρόπου Μετάδοσης

Το πρότυπο DVB-T παρέχει την δυνατότητα της επιλογής μεταξύ της ιεραρχικής και της μη ιεραρχικής μετάδοσης. Κατά την ιεραρχική μετάδοση, το ρεύμα των δεδομένων διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους ρεύματα, ένα χαμηλής (Low Priority stream, LP) και ένα υψηλής προτεραιότητας (High Priority stream, HP), όπου το καθένα μεταδίδεται με διαφορετική κωδικοποίηση καναλιού και με διαφορετική κωδικοποίηση φέροντος.

Το ρεύμα υψηλής προτεραιότητας οφείλει την ονομασία του στον χαμηλό κώδικα λαθών 1/2, 2/3 που συνήθως έχει κωδικοποιηθεί, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγάλο πλεονασμό και χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αλλά και υψηλή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές. Επομένως, επιλέγεται με σκοπό να μεταφέρει δεδομένα τα οποία θα πρέπει να ληφθούνε ακόμη και υπό δύσκολες διαυλικές συνθήκες όπως φορητή λήψη ή λήψη στα όρια της περιοχής κάλυψης. Από την άλλη, το ρεύμα χαμηλής προτεραιότητας παρέχει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αλλά και χαμηλή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και απαιτεί ιδανικές συνθήκες λήψης.

Η χρησιμοποίηση της ιεραρχικής μετάδοσης μπορεί να γίνει προς δύο κατευθύνσεις. Η πρώτη αφορά την ταυτόχρονη μετάδοση ενός ή περισσότερων προγραμμάτων από τα δύο ρεύματα, όπου ο δέκτης θα έχει τη δυνατότητα να διαλέξει την αποκωδικοποίηση είτε του HP ρεύματος, το οποίο θα του παρέχει μετάδοση υπό όλες τις συνθήκες, είτε την αποκωδικοποίηση είτε του LP ρεύματος, του οποίου η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης για ιδανικές συνθήκες όμως θα του παρέχει καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Η δεύτερη κατεύθυνση έχει να κάνει με την μετάδοση διαφορετικών προγραμμάτων από τα 2 ρεύματα, τα οποία θα μπορούν να μεταδίδονται και με διαφορετική διαμόρφωση. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης χρησιμοποιώντας φορητή λήψη για το HP ρεύμα και σταθερή λήψη για το LP ρεύμα, θα μπορεί να έχει επιπλέον προγράμματα με παρόμοια ποιότητα.

Ωστόσο, και η μη ιεραρχική μετάδοση επιτρέπει την ταυτόχρονη εκπομπή δύο ή και περισσότερων προγραμμάτων από το ίδιο κανάλι, με τη διαφορά ότι όλα τα πακέτα μετάδοσης θα υποστούν την ίδια διαμόρφωση και την προϋπόθεση ότι ο συνολικός ρυθμός μετάδοσής τους δεν θα ξεπερνάει τη χωρητικότητα του καναλιού. Στον δέκτη, ο αποκωδικοποιητής αναλαμβάνει να διαχωρίσει τα πακέτα στα επιμέρους προγράμματα.

### 2.3.7 Τύποι Δικτύων στην Ψηφιακή Τηλεόραση

Η βασική επιλογή για τη σχεδίαση ενός δικτύου ψηφιακής τηλεόρασης σε μία καθορισμένη περιοχή αποτελεί ο αριθμός των συχνοτήτων στις οποίες θα λειτουργεί. Με αυτό το κριτήριο, τα δίκτυα ψηφιακής τηλεόρασης χωρίζονται σε :

- Multi Frequency Network (MFN)
- Single Frequency Network (SFN)
- MFN με χαμηλής ισχύος SFN (gap fillers) για την κάλυψη μικρών κενών
- MFN με τοπικά πυκνά SFN γύρω από κάθε σταθμό MFN
- Regional SFN (με λίγους πομπούς υψηλής ισχύος σε μεγάλη μεταξύ τους απόσταση)
- Large area SFN (με πολλούς πομπούς υψηλής ισχύος σε μεγάλη μεταξύ τους απόσταση)

#### 2.3.7.1 Δίκτυα Πολλαπλών Συχνοτήτων (Multi Frequency Networks)

Τα δίκτυα πολλαπλών συχνοτήτων (Multi Frequency Networks-MFNs) αποτελούν σύνολα σταθμών εκπομπής, των οποίων οι συχνότητες ακολουθούν την κυψελική κατανομή προς αποφυγή εμφάνισης φαινομένων ομοδιαυλικής παρεμβολής μεταξύ γειτονικών πομπών. Ο αριθμός των καναλιών που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από τον τύπο της διαμόρφωσης, της κωδικοποίησης και του δικτύου που θα εφαρμόσουμε.

Τα MFN παρέχουν τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων περιοχών, στις οποίες ο κάθε πομπός θα εκπέμπει διαφορετικά προγράμματα, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τον τοπικό προγραμματισμό. Σημειώνουμε, ότι τα περισσότερα υπάρχοντα αναλογικά δίκτυα είναι δομημένα υπό αυτήν την μορφή, καθιστώντας από πλευράς σχεδιασμού τη μετάβαση από την αναλογικά στη ψηφιακή μορφή του δικτύου πιο εύκολη. Παράλληλα, η πολυπλεξία που προσφέρει το ψηφιακό σήμα (4-5 τηλεοπτικά προγράμματα ανά κανάλι) καθιστά το πολυσυχνотικό δίκτυο ιδανικό για εκπομπή μεγάλου αριθμού τηλεοπτικών προγραμμάτων.

Ωστόσο κατά τη μεταβατική αυτή περίοδο η εμφάνιση ομοδιαυλικών παρεμβολών λόγω της συνύπαρξη αναλογικών και ψηφιακών συχνοτήτων θα είναι πολύ πιθανή, καθώς τέτοιου είδους ψηφιακά δίκτυα απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με τα αναλογικά δίκτυα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διακύμανση που παρουσιάζει η λαμβανόμενη ισχύς στους δέκτες σε σχέση με την απόσταση από τον πομπό, καθώς και στο φαινόμενο της απότομης πτώσης της ποιότητας των υπηρεσιών στα όρια της κάλυψης του δικτύου (brick wall effect). Παράλληλα, πιθανό πρόβλημα αποτελεί και η εύρεση ελεύθερων συχνοτήτων για τη ψηφιακή μετάδοση με συμπληρωματικούς σταθμούς (filler stations) σε περιοχές όπου η κάλυψη δεν θα είναι εφικτή.

Λόγω του επίγειου τρόπου μετάδοσης, η λαμβανόμενη ισχύς σε μια δεδομένη απόσταση από τον πομπό ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τη θέση και με το χρόνο σε μικρότερο βαθμό. Καθώς η ψηφιακή μετάδοση δεν υποβαθμίζεται καθώς η ισχύς του σήματος μειώνεται, αλλά ξαφνικά



χάνεται το σήμα, απαιτείται μία αύξηση της ισχύος στους πομπούς για να αντισταθμίσει αυτές τις μεταβολές, ειδικά στα όρια της περιοχής παροχής υπηρεσιών. Οι πιθανές τιμές για την αύξηση της ισχύος σε αυτήν την περίπτωση είναι μεγέθους από 10 dB έως 20 dB. Αν όμως επιτυγχάνεται κάλυψη όλης της περιοχής επικαλύπτοντας περιοχές εξυπηρέτησης παρακείμενων πομπών, οι διακυμάνσεις λόγω θέσης της ισχύος σήματος από διαφορετικούς πομπούς δε συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό, έτσι ώστε όλα τα σήματα δε θα υποφέρουν από την ίδια εξασθένιση σε μια δεδομένη θέση στη περιοχική επικάλυψη. Συνεπώς ο δέκτης μπορεί να επιλέξει το ισχυρότερο σήμα και τότε η αύξηση ισχύος δεν απαιτείται να είναι τόσο υψηλή.

#### 2.3.7.2 Δίκτυα Μονής Συχνότητας (Single Frequency Networks)

Τα δίκτυα μονών συχνοτήτων (Single Frequency Networks-SFNs) αποτελούν σύνολα σταθμών εκπομπής, οι οποίοι λειτουργούν στην ίδια συχνότητα και είναι σύγχρονα διαμορφωμένοι στο ίδιο σήμα. Η περιοχική κάλυψη μπορεί να έχει την έκταση της επικράτειας μια χώρας (National SFN) ή τμήμα αυτής (Regional SFN).

Η προσέγγιση του σχεδιασμού του δικτύου κατά αυτόν τον τρόπο προσφέρει τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε φάσμα, καθώς χρειάζεται τις λιγότερες δυνατές συχνότητες από οποιαδήποτε άλλη κατανομή, καθιστώντας ιδιαίτερα ελκυστική σε χώρες με μεγάλο βαθμό πληρότητας τηλεοπτικού φάσματος. Ακόμα και η εγκατάσταση συμπληρωματικών σταθμών (filler stations) σε περιοχές όπου η κάλυψη δεν θα είναι εφικτή, δεν απαιτεί την απελευθέρωση νέων συχνοτήτων. Επιπλέον, η διαμόρφωση OFDM, προσφέρει τη δυνατότητα σε μονοσυχνοτικά δίκτυα να συσχετίζουν όμοια σήματα τα οποία λαμβάνονται με χρονική καθυστέρηση μικρότερη από το διάστημα φύλαξης και να ενισχύουν το τελικά λαμβανόμενο σήμα. Με αυτόν τον τρόπο καθιστά τα SFN ιδανικά για περιβάλλοντα πολλαπλών ανακλάσεων και παρεμβολών, όπως είναι π.χ. τα αστικά κέντρα, ενώ προκαλεί εξοικονόμηση σε μεγάλο βαθμό ισχύς εκπομπής των τηλεοπτικών σταθμών, η οποία καλείται «κέρδος δικτύου» (network gain).

Ωστόσο, τα μονοσυχνοτικά δίκτυα παρουσιάζουν περιορισμό στον αριθμό εκπομπής τηλεοπτικών προγραμμάτων, καθώς υποστηρίζεται για κάθε συχνότητα η εκπομπή 4-5 τηλεοπτικών καναλιών. Παράλληλα, στην περίπτωση που τα καθυστερημένα σήματα από διαφορετικούς σταθμούς καταφθάσουν σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του διαστήματος φύλαξης, τότε λειτουργούν αρνητικά ως παρεμβολές και εξασθενούν το σήμα. Ο εμπειρικός κανόνας που έχει επικρατήσει ώστε να αποτρέπει την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων μεταξύ δύο γειτονικών πομπών είναι η κατάλληλη επιλογή του Διαστήματος Φύλαξης ώστε να επιτρέπει στο σήμα να διανύσει την μεταξύ τους απόσταση. Τέλος, ο υψηλός συγχρονισμός που απαιτείται στη λειτουργία των SFN σε επίπεδο συχνότητας, χρόνου και πληροφορίας καθιστά αδύνατη την ανεξαρτητοποίησή τους και απαιτεί την πλήρη μεταξύ τους εναρμόνιση για την διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου.

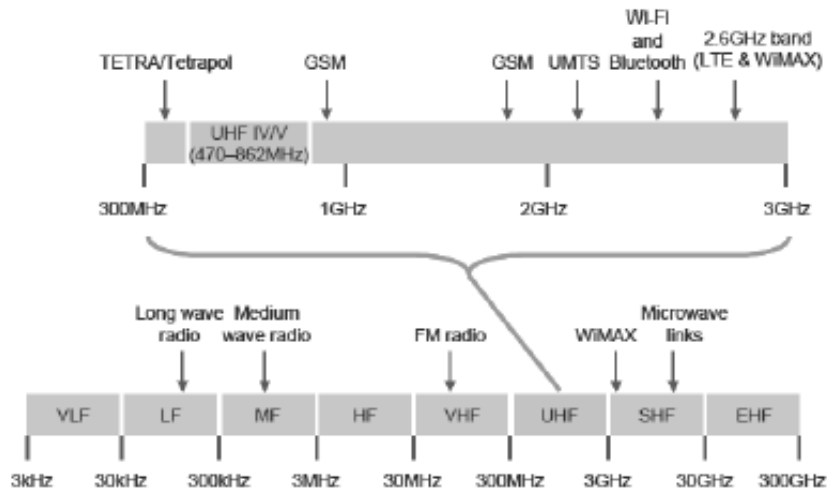
## 2.4 Ψηφιακό Μέρισμα

### 2.4.1 Εισαγωγή στη ζώνη UHF

Η UHF ζώνη συχνοτήτων εκτείνεται από τα 300 MHz έως και τα 3GHz. Με τη συμφωνία της Στοκχόλμης τα αναλογικά τηλεοπτικά σήματα εκπέμπονται χρησιμοποιώντας τις συχνότητες 470-862 MHz, οι οποίες διαχωρίζονται στις ζώνες IV (470-582 MHz) και V (582-862 MHz).

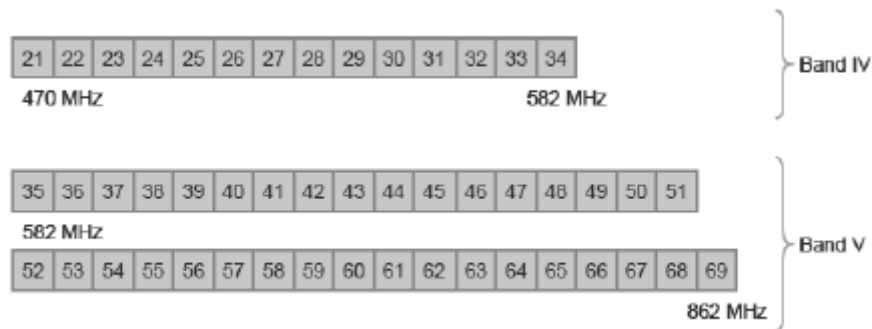
Η UHF ζώνη συχνοτήτων και ειδικά το φάσμα που περιλαμβάνει τις συχνότητες 470 – 862 MHz θεωρείται ως το πιο πολύτιμο τμήμα του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτές οι συχνότητες παρέχουν μια ισορροπία μεταξύ της κάλυψης, της χωρητικότητας διαύλου και την ευκολία που παρέχουν στην ανάπτυξη του απαιτούμενου εξοπλισμού. Επίσης η ζώνη αυτών των συχνοτήτων παρουσιάζει δυνατά χαρακτηριστικά διάδοσης, κάνοντας έτσι δυνατή τη μετάδοση του σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις, διεισδύοντας βαθύτερα στα κτίρια σε σύγκριση με σήματα υψηλότερων συχνοτήτων. Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό για αυτές τις συχνότητες είναι ότι το μέγεθος των κεραιών που απαιτούνται είναι ιδιαίτερος μικρό παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για ανάπτυξη εσωτερικών κεραιών σε συσκευές.

Η κατανομή των συχνοτήτων του ραδιοφάσματος και οι υπηρεσίες που αναπτύσσονται σε κάθε ζώνη του φαίνονται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.6 Κατανομή ραδιοφάσματος

Στο σχήμα 2.7 φαίνεται η διαίρεση της ζώνης φάσματος 470-862 MHz σε 49 κανάλια, το καθένα από τα οποία έχει εύρος ζώνης 8MHz. Τα κανάλια αυτά αριθμούνται από 21 έως 69 με τα κανάλια 21-34 να ανήκουν στη ζώνη IV και τα 35-69 στη ζώνη V.



Σχήμα 2.7 Κατανομή καναλιών στις συχνότητες 470-862 MHz

#### 2.4.2 Το ψηφιακό μέρισμα και οι πιθανές χρήσεις του

Με τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή επίγεια τηλεόραση (Digital Terrestrial Television)-DTT) απελευθερώνεται μια σημαντική ποσότητα ραδιοφάσματος, κυρίως στη ζώνη 470-862 MHz, λόγω της αποδοτικότερης χρήσης του διατιθέμενου φάσματος. Το εύρος του φάσματος που απελευθερώνεται καλείται ψηφιακό μέρισμα (digital dividend) και μπορεί να αποτελείται είτε από ένα συνεχόμενο τμήμα του φάσματος που θα είναι μονίμως διαθέσιμο σε νέες κινητές υπηρεσίες ευρυεκπομπής (π.χ. 790-862 MHz), είτε από μεμονωμένους διαύλους, οι οποίοι θα διατίθενται δυναμικά όταν είναι ελεύθεροι. Το μέγεθος του φάσματος που απελευθερώνεται είναι αρκετά μεγάλο, φτάνοντας σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και τα 320 MHz, ανοίγοντας έτσι το δρόμο για την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών σε αυτές τις συχνότητες.

Το ψηφιακό μέρισμα μπορεί να διατεθεί για τις ακόλουθες υπηρεσίες [10]:

- Διαδραστικές υπηρεσίες σταθερής και κινητής ευρυεκπομπής μέσα από πολλαπλές πλατφόρμες μετάδοσης
- Ασύρματες καινοτόμες ευρυζωνικές υπηρεσίες
- Υπηρεσίες ηλεκτρονικών επικοινωνιών για τη δημόσια ασφάλεια (Public Protection and Disaster Relief – PPDR)
- Νέες κινητές υπηρεσίες τηλεοπτικού περιεχομένου και πολυμέσων (mobile TV and multimedia services)
- Προχωρημένες υπηρεσίες κοινωνικού χαρακτήρα (π.χ. τηλεϊατρική, τηλεεκπαίδευση, κλπ)

Εκτός από τις παραπάνω υπάρχουν και άλλες πιθανές χρήσεις του ψηφιακού μερίσματος, όπως οι ανάπτυξη γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν δυναμικά το φάσμα προσέχοντας να μη δημιουργήσουν παρεμβολή σε πρωτεύουσες υπηρεσίες.

#### 2.4.3 Τεχνικοί κανονισμοί για τη χρήση των συχνοτήτων 790-862 MHz

Με απόφαση της (2007) η Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών της ITU προβλέπει ότι όλα τα κράτη μέλη που θα διαθέσουν τη ζώνη ραδιοφάσματος 790-862 MHz (τη λεγόμενη και ζώνη των 800 MHz) για υπηρεσίες εκτός τηλεοπτικής μετάδοσης πρέπει παράλληλα να εφαρμόζουν τους ίδιους εναρμονισμένους κανόνες. Οι τεχνικοί αυτοί

κανόνες εξασφαλίζουν ότι ο τωρινός εξοπλισμός ραδιοεπικοινωνιών (κινητά τηλέφωνα ή σταθμοί βάσης) στη ζώνη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά και αποτελεσματικά για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα. Το προτεινόμενο σχέδιο για διαύλους που λειτουργούν με FFD (Frequency Division Duplex) στην εναρμονισμένη Ευρωπαϊκή ζώνη του ψηφιακού μερίσματος φαίνεται στο σχήμα 2.8 [11].

791-796	796-801	801-806	806-811	811-816	816-821	821-832	832-837	837-842	842-847	847-852	852-857	857-862
Downlink						Duplex gap	Uplink					
30 MHz (6 blocks of 5 MHz)						11 MHz	30 MHz (6 blocks of 5 MHz)					

Σχήμα 2.8 FFD Διαυλοποίηση 5 MHz block size / 30 MHz

Αν και υπάρχει και εναλλακτικό σχέδιο για διαύλους που λειτουργούν με TDD (Time Division Duplex), η προσέγγιση αυτή θεωρείται ακατάλληλη για κυψελοειδή δίκτυα ευρείας εμβέλειας λόγω των δυσκολιών στον συντονισμό των σημάτων μετάδοσης (εκπομπή - λήψη) σε μεγάλες περιοχές. Για το διασυνοριακό συντονισμό, έχουν προσδιοριστεί τα όρια παρεμβολών ως προς κινητά τερματικά, κινητούς σταθμούς βάσης και οικιακούς τηλεοπτικούς δέκτες.

## 2.5 Γνωσιακές Ραδιοεπικοινωνίες (Cognitive Radios)

### 2.5.1 Εισαγωγή

Οι γνωσιακές ραδιοεπικοινωνίες (cognitive radio) αποτελούν ένα νέο τρόπο φασματικής πρόσβασης, ικανό να προσφέρει την απαιτούμενη αποδοτικότητα και αξιοπιστία στη σχεδίαση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Το καινοτόμο στοιχείο που εισάγουν στο χώρο είναι η δυναμική διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος, αξιοποιώντας με τον τρόπο αυτό στο έπακρο όλους τους πόρους.

### 2.5.2 Χρησιμοποίηση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων

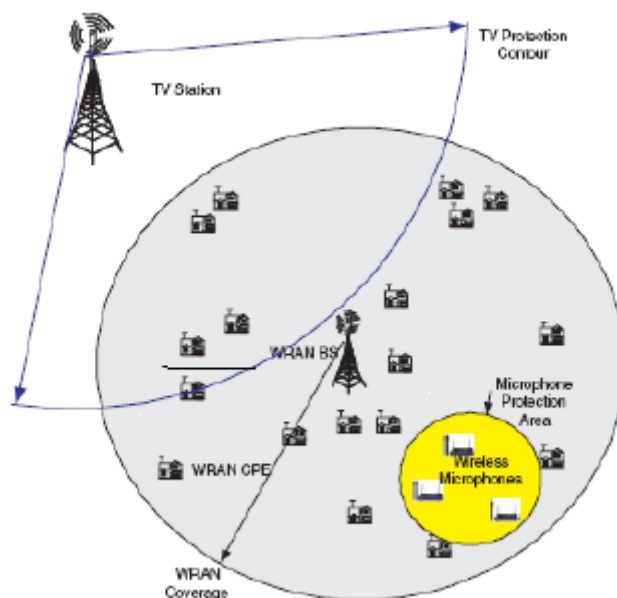
Μια σειρά διεθνών οργανισμών μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται και η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU), η Ευρωπαϊκή Διάσκεψη των Διοικήσεων Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών (CEPT), το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) και η Διεθνής Ειδική Επιτροπή Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών (CISPR) είναι υπεύθυνα για τους κανονισμούς και τις ρυθμιστικές συμφωνίες που αφορούν τη διαχείριση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων.

Με τη στατική κατανομή του φάσματος, δηλαδή αδειοδοτώντας ορισμένες ζώνες συχνοτήτων για κάθε ασύρματη υπηρεσία εξασφαλίζεται με απλό τρόπο ο περιορισμός των παρεμβολών και η ομαλή συνύπαρξη διαφορετικού τύπου ασύρματων εφαρμογών. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια με τον πολλαπλασιασμό των τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας, το μεγαλύτερο ποσοστό του ραδιοφάσματος έχει εκχωρηθεί. Συνέπεια του παραπάνω είναι η έλλειψη διαθέσιμου φάσματος που προκαλεί πρόβλημα στη μελλοντική ανάπτυξη της βιομηχανίας ασύρματων επικοινωνιών. Άλλωστε, μελέτες του τρόπου

χρησιμοποίησης του διαθέσιμου φάσματος υποδεικνύουν ότι τα περισσότερα κανάλια του ραδιοφάσματος έχουν χαμηλή χρησιμοποίηση.

Μια λύση που προτείνεται για το παραπάνω πρόβλημα της χαμηλής φασματικής χρησιμοποίησης είναι η εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Μια νέα ευφυής εκδοχή αυτής αποτελούν οι γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες (cognitive radios) με κύριο στοιχείο την ανίχνευση φάσματος (channel sensing). Με βάση αυτή τη λογική, οι ασύρματες συσκευές θα μπορούν να αποκτούν γνώση του περιβάλλοντος διάδοσης, εντός του οποίου έχουν λειτουργική εμβέλεια ώστε να μπορούν να ανιχνεύουν συχνότητες που δεν είναι κατειλημμένες από πρωτεύοντες χρήστες (primary users).

Για να αναπτυχθούν προδιαγραφές η IEEE έχει συγκροτήσει το 802.22 Working Group, για δίκτυα WRAN (Wireless Regional Area Networks), βασισμένη στην τεχνολογία των cognitive radios. Στο σχήμα 2.9 φαίνεται η τοπολογία ενός WRAN συστήματος στο οποίο είναι ευδιάκριτοι οι πρωτεύοντες χρήστες (τηλεοπτικοί σταθμοί και ασύρματα μικρόφωνα) και οι δευτερεύοντες χρήστες (σταθμοί βάσης WRAN και εξοπλισμός πελατών). Τα WRAN συστήματα έχουν μέση ακτίνα κάλυψης 33 km και είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να κάνουν ανίχνευση ραδιοφάσματος αναγνωρίζοντας τα ακρησιμοποιήτα από πρωτεύοντες χρήστες τηλεοπτικά κανάλια. Ο πρωταρχικός στόχος ενός WRAN δικτύου είναι η μεγιστοποίηση της χρήσης των τηλεοπτικών καναλιών από δευτερεύοντες χρήστες όταν αυτά είναι ελεύθερα από πρωτεύοντες χρήστες.



Σχήμα 2.9 Δίκτυο WRAN βασισμένο στο IEEE 802.22

### 2.5.3 Δυναμική Εκχώρηση Φάσματος

Σε αντίθεση με την μέχρι τώρα πολιτική στατικής εκχώρησης φάσματος, ο όρος δυναμική εκχώρηση φάσματος που αποτελεί συνώνυμο του όρου γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες περιλαμβάνει διάφορες προσεγγίσεις στον επανακαθορισμό του της κατανομής του

ραδιοφάσματος. Οι βασικές στρατηγικές δυναμικές πρόσβασης φάσματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα ακόλουθα τρία μοντέλα:

- Μοντέλο αποκλειστικής δυναμικής χρήσης (Dynamic exclusive use model): το συγκεκριμένο μοντέλο διατηρεί τη βασική δομή της υφιστάμενης πολιτικής ρύθμισης του φάσματος. Σύμφωνα με αυτή, λοιπόν ζώνες αδειοδοτούνται σε υπηρεσίες για αποκλειστική χρήση με βασική ιδέα της εισαγωγή ευελιξίας για βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Μια προσέγγιση που χρησιμοποιείται εδώ, επιτρέπει στους δικαιούχους (licenses-primary users) να εμπορεύονται το φάσμα και να επιλέγουν ελεύθερα την τεχνολογία πρόσβασης σε αυτό. Η άλλη προσέγγιση αξιοποιεί τα χωρικά και χρονικά στατιστικά κίνησης διαφόρων υπηρεσιών και αναλόγως διατίθεται το φάσμα σε υπηρεσίες για αποκλειστική χρήση για δεδομένο, όμως, χρόνο και σε συγκεκριμένη περιοχή. Ωστόσο, με αυτό το μοντέλο δεν είναι εφικτή η αξιοποίηση των λευκών ακρησιμοποίητων φασματικών διαστημάτων (white spaces), τα οποία προκύπτουν από την αυξανόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση.
- Μοντέλο ανοικτής ανταλλαγής (Open sharing model): Το μοντέλο αυτό αναφέρεται και ως μοντέλο κοινού φάσματος μεταξύ ομότιμων χρηστών. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης περίπτωσης για τη διαχείριση του ραδιοφάσματος έχουν προταθεί τόσο συγκεντρωτικές όσο και κατακευματισμένες στρατηγικές κατανομής φάσματος.
- Μοντέλο ιεραρχικής πρόσβασης (Hierarchical access model): Στο μοντέλο αυτό εισάγεται μια ιεραρχική δομή πρόσβασης με πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χρήστες. Η βασική ιδέα είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης αδειοδοτημένου φάσματος από δευτερεύοντες χρήστες εφόσον περιορίζονται επαρκώς οι παρεμβολές, οι οποίες γίνονται αντιληπτές από τους πρωτεύοντες χρήστες.

Σε σύγκριση με τα δύο προηγούμενα μοντέλα, η ιεραρχική πρόσβαση είναι ίσως η πλέον συμβατή προσέγγιση εφαρμογής της δυναμικής εκχώρησης συχνοτήτων, δεδομένης της τρέχουσας πολιτικής διαχείρισης του ραδιοφάσματος και των υπάρχοντων υποδομών των ασύρματων συστημάτων.

#### 2.5.4 Γνωσιακά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών (Cognitive Radios)

Η ιδέα για την κατασκευή έξυπνων συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1980, όταν είχαν αναπτυχθεί δέκτες που διέθεταν αρκετά χαρακτηριστικά ευφυΐας, όπως για παράδειγμα η αυτόματη αναγνώριση του είδους διαμόρφωσης των σημάτων λήψης. Τα συστήματα γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών έχουν τη βάση τους στις αρχές του Software Defined Radio (SDR) [11].

Το SDR βασίζεται σε πομπούς, οι οποίοι μεταβάλλουν τις παραμέτρους λειτουργίας τους (συχνότητα, ισχύς εκπομπής, διαμόρφωση, κωδικοποίηση, διάγραμμα ακτινοβολίας) με αλλαγές στο λογισμικό τους. Το κύριο χαρακτηριστικό, λοιπόν μια SDR συσκευής είναι η ικανότητά της να αναπρογραμματίζεται (reconfigurability). Ο όρος αυτός περιλαμβάνει την προσαρμογή της διεπαφής του

ραδιοσυστήματος στις μεταβολές του περιβάλλοντος, την ενσωμάτωση νέων υπηρεσιών και εφαρμογών (π.χ. υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, ασύρματο ευρυζωνικό internet), την ενσωμάτωση των τελευταίων εξελίξεων στην τεχνολογία λογισμικού και την εκμετάλλευση των ευέλικτων ετερογενών υπηρεσιών.

Ο όρος γνωσιακές επικοινωνίες (cognitive radios) αποτελεί εξέλιξη του Software Define Radio, καθώς στηρίχτηκε στις αρχές του και τις επέκτεινε. Ορίζεται ότι τα ασύρματα τερματικά θα πρέπει να διαθέτουν αρκετή υπολογιστική νοημοσύνη για να μπορούν να ανιχνεύσουν τις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες των χρηστών τους ως συνάρτηση του περιβάλλοντος και να τις ικανοποιούν. Έτσι ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνιών μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους μετάδοσής του, βασιζόμενο στην αλληλεπίδραση με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί.

Για να επιτευχθεί η αποτελεσματική χρήση του φάσματος ένα σύστημα cognitive radio πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ευελιξία συχνότητας (Frequency Agility)
- Δυναμική επιλογή συχνότητας (Dynamic Frequency Selection)
- Έλεγχος ισχύος εκπομπής (Transmit Power Modulation)
- Προσαρμοστική Διαμόρφωση (Adaptive Modulation)
- Επίγνωση της θέσης (Location Awareness)
- Διαπραγμάτευση χρήσης φάσματος





# Κεφάλαιο 3

---

## Χρήση σχισμών ή πτυχώσεων σε διατάξεις κεραίων

### 3.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια είναι αλματώδης, δημιουργώντας συνεχώς νέες ανάγκες για τα τερματικά. Μία από αυτές είναι η ανάγκη για κεραίες με καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως η αύξηση του εύρους ζώνης έτσι ώστε να μπορεί να λαμβάνει σε πολλές συχνότητες ικανοποιητικά, μεγαλύτερη απολαβή (κέρδος) έτσι ώστε κάποια κεραία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για φορητή λήψη καθώς επίσης καλύτερη προσαρμογή, ειδικά στις συχνότητες όπου το ενδιαφέρον είναι μεγαλύτερο για μείωση των απωλειών ανάκλασης. Για να καλυφθούν οι ανάγκες αυτή έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένες τεχνικές, με τις οποίες αλλάζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά μιας κεραίας. Η βασική τεχνική, που θα αναλυθεί σε αυτό το κεφάλαιο με την παράθεση παραδειγμάτων, είναι η δημιουργία πτυχώσεων (corrugations), ή σχισμών (slots) σε κάποιο σημείο της διάταξης και πώς αυτή επηρεάζει την κεραία σε κάθε περίπτωση.

Γενικά, η εφαρμογή σχισμών σε μια διάταξη κεραίας έχει ως σκοπό να επέμβει σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως προαναφέρθηκε, όμως μπορεί ταυτόχρονα να συντελέσει στη μείωση των διαστάσεων της κεραίας. Η ικανότητα αυτή αποτελεί σημαντικό ζήτημα καθώς οι κεραίες της νέας γενιάς πρέπει να είναι αρκετά μικρές ώστε να αποτελούν μέρος μιας συσκευής χειρός, ακολουθώντας την πτωτική πορεία που έχουν οι επεξεργαστές (ολοκληρωμένα κυκλώματα), όσον αφορά το μέγεθός τους. Η μείωση στις διαστάσεις μιας κεραίας με την προσθήκη πτυχώσεων ή σχισμών γίνεται διότι τα ρεύματα που αναπτύσσονται, λόγω τροφοδοσίας αλλά και των πεδίων που δημιουργούνται ακολουθούν πλέον διαφορετική διαδρομή από αυτή που θα είχαν στην περίπτωση τα κανονικής δομής. Αλλάζουν λοιπόν με τις διαταραχές αυτές οι διαστάσεις της κεραίας, όμως το ηλεκτρικό της μήκος παραμένει σταθερό καθώς το ρεύμα διανύει την ίδια απόσταση. Αυτό ισχύει πιο πολύ σε υψηλότερες συχνότητες, όπου το μήκος κύματος είναι μικρότερο και οι διαστάσεις των σχισμών είναι στα επίπεδα του μήκος κύματος σαν τάξη μεγέθους.

### 3.2 Σχισμές σε κεραίες PIFA

#### 3.2.1 Πλεονεκτήματα σχισμών σε PIFA

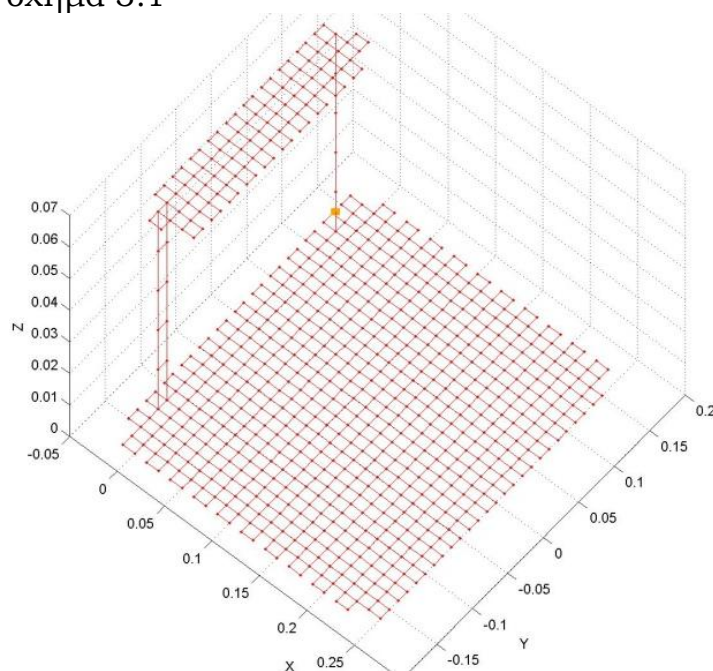
Οι Επίπεδες Κεραίες Ανεστραμμένου F (PIFAs) αποτελούν, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1, μια πολύ καλή επιλογή για την τεχνολογία των ασύρματων κινητών επικοινωνιών. Αυτό συμβαίνει λόγω πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν, όπως ευκολία στην κατασκευή τους, χαμηλό κόστος παραγωγής και απλή δομή. Παρουσιάζουν, όμως, και

κάποια μειονεκτήματα όπως υψηλή τάση σε χαμηλές συχνότητες και στενό εύρος ζώνης.

Για να βελτιωθούν, λοιπόν τα χαρακτηριστικά μιας PIFA, έχει αναπτυχθεί η μέθοδος εφαρμογής σχισμών ή πτυχώσεων (corrugations), που μέχρι πρότινος χρησιμοποιούνταν για βελτίωση της κατευθυντικότητας της διάταξης και τη μείωση του μεγέθους της. Όμως, πλέον χρησιμοποιούνται και για την αύξηση του εύρους ζώνης ή τη βελτίωση της προσαρμογής της. Με αυτό, οι PIFAs γίνονται κατάλληλες για εφαρμογές κινητών επικοινωνιών ή διαδικτύου. Η εφαρμογή σχισμών, όπως αναφέρθηκε μπορεί να βοηθήσει επίσης στη μείωση των διαστάσεων μιας PIFA διατηρώντας το ηλεκτρικό της μήκος, κάνοντάς την έτσι ικανή να αποτελέσει μέρος μιας κινητής συσκευής χειρός [13].

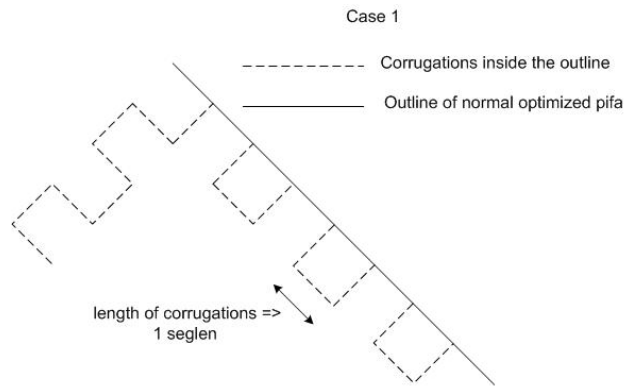
### 3.2.2 Σχισμές σε PIFA περιμετρικά της άνω και κάτω πλάκας για τη συχνότητα των 2.4 GHz

Στο [10] προτείνεται η εφαρμογή πτυχώσεων εφαρμόζονται σε μια βελτιστοποιημένη δομή (ως προς το VSWR) κανονικής PIFA. Η δομή αυτή έχει υλοποιηθεί με τη βοήθεια της πλατφόρμας SuperNEC, ενώ η βελτιστοποίησή της έγινε με χρήση των γενετικών αλγορίθμων. Η υλοποίηση της PIFA μετά την προσθήκη σχισμών στο SuperNEC φαίνεται στο σχήμα 3.1

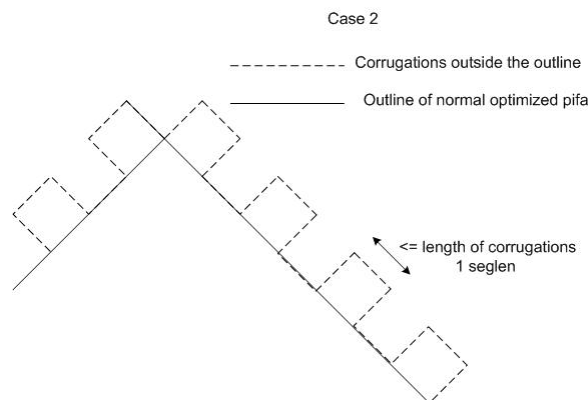


Σχήμα 3.1 Υλοποίηση PIFA με σχισμές στο SuperNEC

Οι περιπτώσεις των σχισμών που εξετάζονται είναι σχισμές εσωτερικά στην βελτιστοποιημένη αρχική διάταξη (σχήμα 3.2) και πτυχώσεις εξωτερικά (σχήμα 3.3). Να σημειωθεί ότι οι σχισμές αυτές εφαρμόζονται είτε στην άνω πλάκα μόνο είτε στην άνω και στην κάτω πλάκα ταυτόχρονα.



Σχήμα 3.2 Σχιισμές εσωτερικά της αρχικής διάταξης

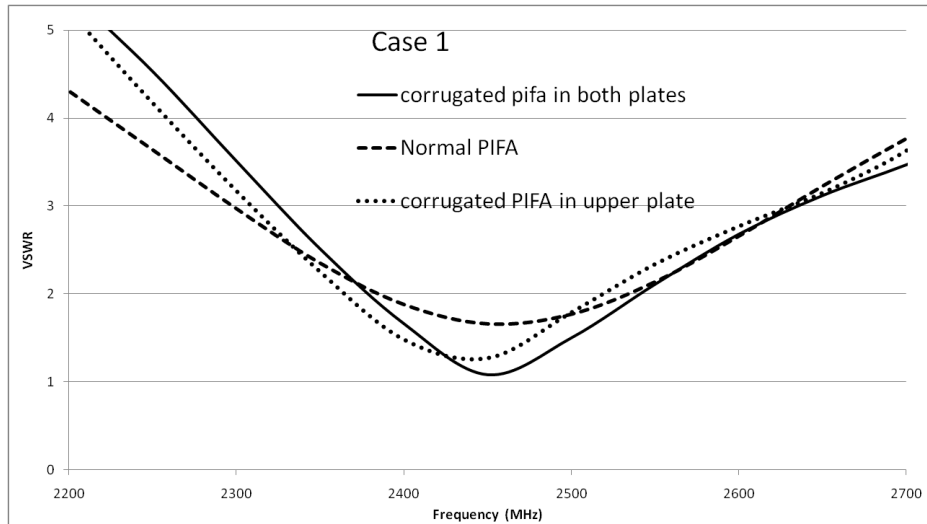


Σχήμα 3.3 Σχιισμές εξωτερικά της αρχικής διάταξης

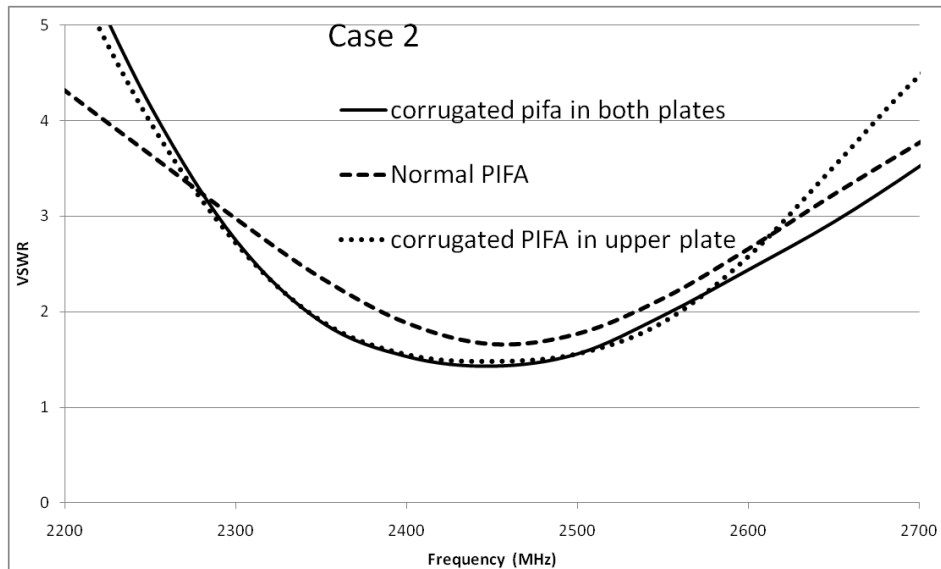
Ενώ πολλές προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια του SuperNEC και για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην προσαρμογή προέκυψαν για εσωτερικές σχισμές, όταν αυτές εφαρμόζονται και στις δύο πλάκες (άνω και κάτω) καθώς τότε το VSWR γίνεται 1.08. Σχετικά με το εύρος ζώνης, μεγάλη βελτίωση παρουσιάστηκε, με την εφαρμογή εξωτερικών σχισμών, καθώς τότε από 1120 MHz, το εύρος ζώνης αυξήθηκε στα 200 MHz. Όλα αυτά τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1 Αριθμητικά αποτελέσματα για διάφορους τύπους σχισμών στη συχνότητα των 2.4 GHz

	VSWR	Gain (dBi)	Bandwidth(MHz) where VSWR $\leq$ 2
Standard PIFA	1,66	6	110
Corrugated PIFA (case1) – corrugations at Top plate only	1,26	4,6	100
Corrugated PIFA (case1) – corrugations at both plates	1,08	4,8	110
Corrugated PIFA (case2) – corrugations at Top plate only	1,48	4,5	200
Corrugated PIFA (case2) – corrugations at both plates	1,52	5,4	200
Optimized Corrugated PIFA	1,01	1,54	450

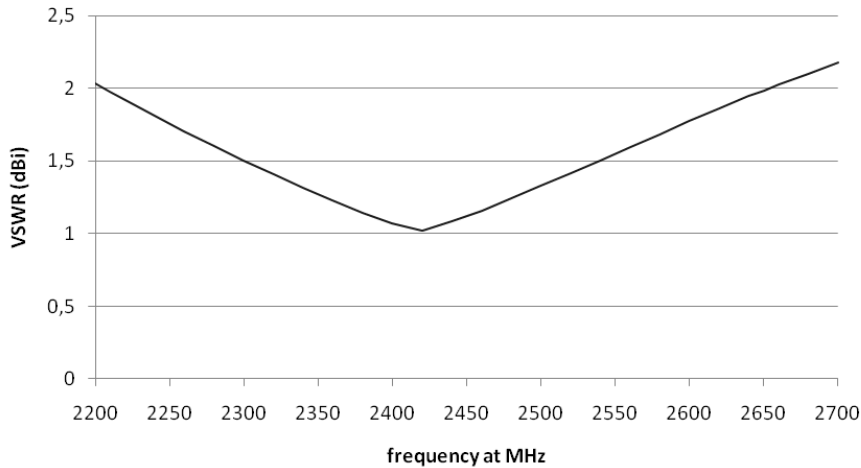


Σχήμα 3.4 VSWR για σχισμές (corrugations) περίπτωση 1 (case 1)



Σχήμα 3.5 VSWR για σχισμές (corrugations) περίπτωση 2 (case 2)

Η τελευταία δομή που αναφέρεται στον πίνακα 3.1 είναι αποτέλεσμα βελτιστοποίησης της PIFA που έχει σχισμές μέσω γενετικού αλγορίθμου. Με αυτή, όπως φαίνεται υπάρχει μεγάλη αύξηση του εύρους ζώνης που παρουσιάζει η κεραία καθώς φτάνει τα 450 MHz, ενώ και η προσαρμογή είναι καλύτερη στα 2.4 GHz, αφού το  $VSWR = 1.01$ . Με το εύρος ζώνης αυτό που εμφανίζεται σε αυτή τη διάταξη, την καθιστά ικανή να καλύψει ευρυζωνικές εφαρμογές. Η τιμή των στάσιμων κυμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βελτιστοποιημένη PIFA με σχισμές φαίνεται στο σχήμα 3.6 που έπεται.

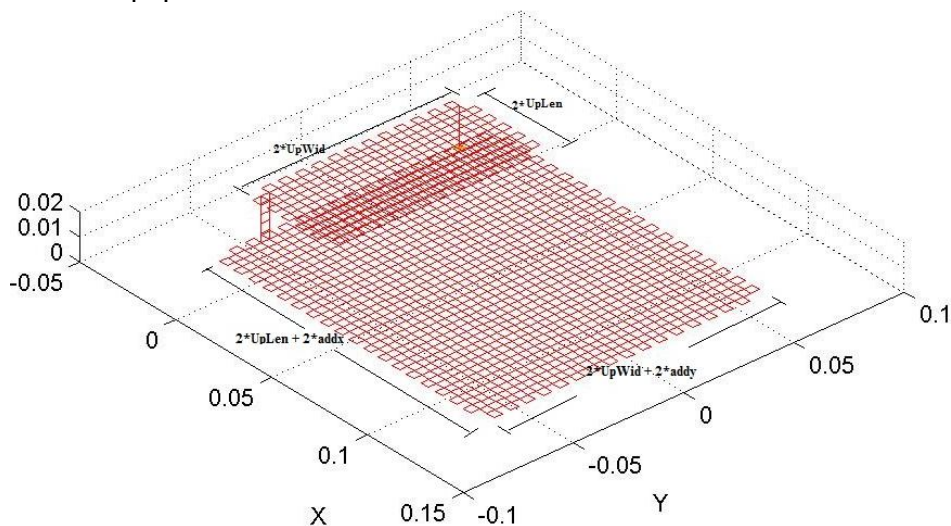


Σχήμα 3.6 VSWR για τη βελτιστοποιημένη PIFA με οχισμές

### 3.2.3 Σχισμές σε PIFA περιμετρικά της άνω και κάτω πλάκας για τη συχνότητα των 790 MHz

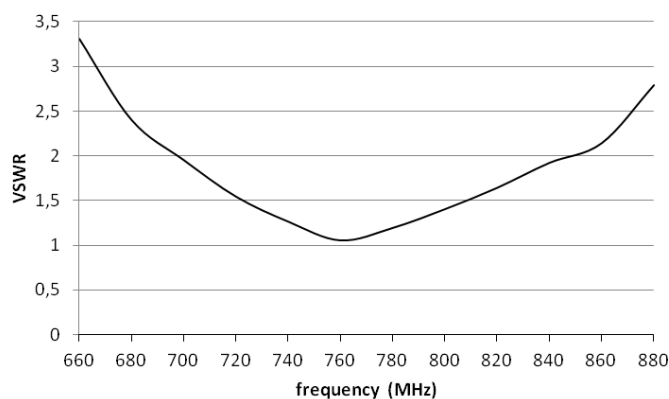
Στο [9] παρουσιάζεται η επίδραση των οχισμών (corrugations) σε PIFA για τις συχνότητες του προτύπου DVB-T και συγκεκριμένα για το ψηφιακό μέρισμα (digital dividend). Η απελευθέρωση φάσματος που θα προκύψει από το αναλογικό switch-off, καθιστά το κομμάτι του ψηφιακού μέρισματος αρκετά σημαντικό, συνεπώς η κάλυψή του από μια κεραία με εύρος ζώνης ικανό να λαμβάνει στις συχνότητες 698 - 862MHz (ψηφιακό μέρισμα σε Αμερική και Ασία) είναι αναγκαία.

Για να επιτευχθεί αυτό επιλέγεται η κεντρική συχνότητα των 790 MHz και βελτιστοποιείται η κανονική διάταξη, ενώ στη συνέχεια προστίθενται οι οχισμές περιμετρικά τόσο της άνω όσο και της κάτω πλάκας. Η διάταξη που απεικονίζεται το σχήμα 3.7 παρουσιάζει εύρος ζώνης 180 MHz με απολαβή 3dBi.



Σχήμα 3.7 PIFA με οχισμές υλοποιημένη στο SuperNEC στη συχνότητα των 790 MHz με μήκος τμήματος  $0.1 \cdot \lambda$

Στο σχήμα 3.8 που ακολουθεί φαίνεται ο λόγος στάσιμων κυμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητα, διάγραμμα από το οποίο εξάγουμε συμπεράσματα για το εύρος ζώνης. Εντός εύρους ζώνης, λοιπόν, θεωρούνται οι συχνότητες στις οποίες το VSWR δεν υπερβαίνει την τιμή 2.



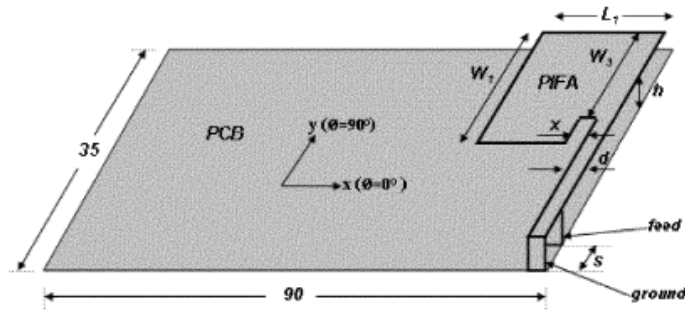
Σχήμα 3.8 VSWR για την πτυχωτή PIFA στα 790 MHz

### 3.2.4 Εφαρμογή σχισμών στην κάτω πλάκα μιας PIFA

Οι PIFAs, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω αποτελούν μια καλή επιλογή για συσκευές κινητών τηλεφώνων, όπου συνήθως τοποθετούνται στο πίσω μέρος του ακριβώς πάνω από την μπαταρία. Ο πρωταρχικός σκοπός που έχει μια PIFA σε τέτοια εφαρμογή είναι να παρέχει επαρκές εύρος ζώνης για να καλύψει τις ανάγκες, ενώ για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται ύψος της άνω πλάκας συγκριτικά με το επίπεδο γείωσης περίπου 8 – 10 mm. Το γεγονός αυτό αναγκάζει το τηλέφωνο να είναι αρκετά παχύ παρόλο που η τεχνολογία της μπαταρίας έχει παρουσιάσει εξέλιξη με αποτέλεσμα να έχει λεπτύνει. Το ιδανικό θα ήταν ένα ύψος γύρω στα 4 mm, όμως σε αυτή την περίπτωση το εύρος ζώνης γίνεται υπερβολικά στενό, καθώς το ύψος μειώνεται.

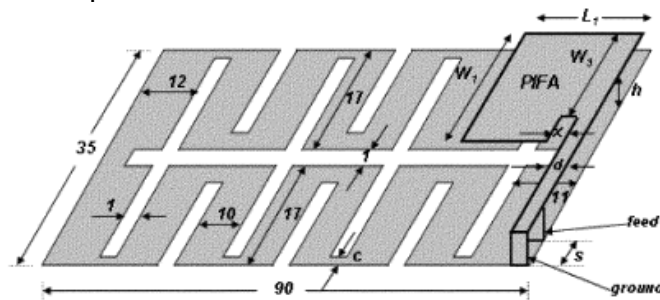
Στο [10], λοιπόν προτείνεται ένα επίπεδο γείωσης με σχισμές σε σχήμα μαιάνδρου, το οποίο μπορεί να μειώσει το ύψος της κεραίας ακόμα και κατά 50%. Η μαιανδρική αυτή κάτω πλάκα μπορεί να θεωρηθεί ως μια δομή αργού μήκους κύματος, όπου η ταχύτητα της φάσης του μεταδιδόμενου κύματος είναι μικρότερη από αυτή του φωτός, γεγονός που την κάνει να φαίνεται ηλεκτρικά μακρύτερη, ενώ οι φυσικές της διαστάσεις είναι σταθερές. Έτσι, για μια συσκευή κινητού τηλεφώνου, όπου το ύψος ή το μήκος της κεραίας δεν μπορεί να είναι αυθαίρετα μεγάλο η παραπάνω διαπίστωση αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα.

Μια απλή κεραία PIFA απεικονίζεται στο σχήμα 3.9, με τα γνωστά της σημεία, όπως έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 1, που χρησιμοποιείται για το GSM στα 900 MHz.



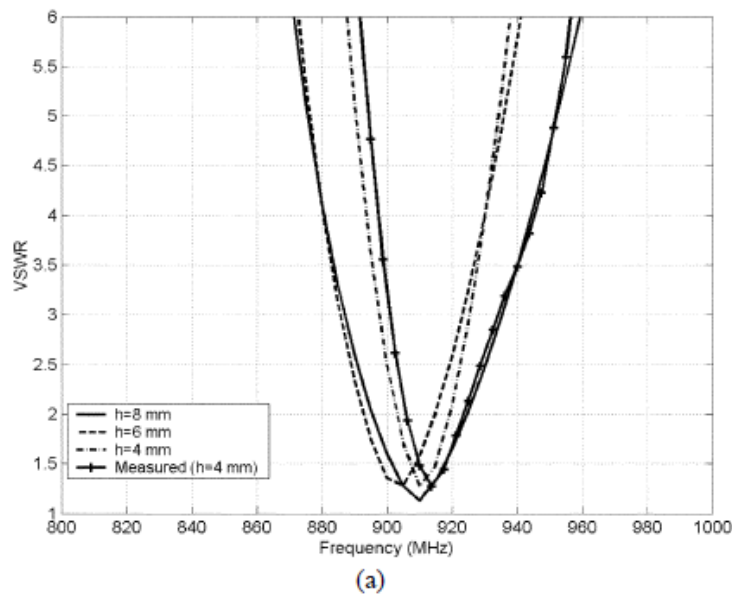
Σχήμα 3.9 Συμβατική PIFA μονής ζώνης στα 900 MHz (διαστάσεις σε mm)

Η προτεινόμενη κεραία με το μαιανδρικό επίπεδο γείωσης απεικονίζεται στο σχήμα 3.10 και όπως φαίνεται, μια συνηθισμένη άνω πλάκα έχει τοποθετηθεί



Σχήμα 3.10 PIFA μονής ζώνης με μαιανδρικό επίπεδο γείωσης

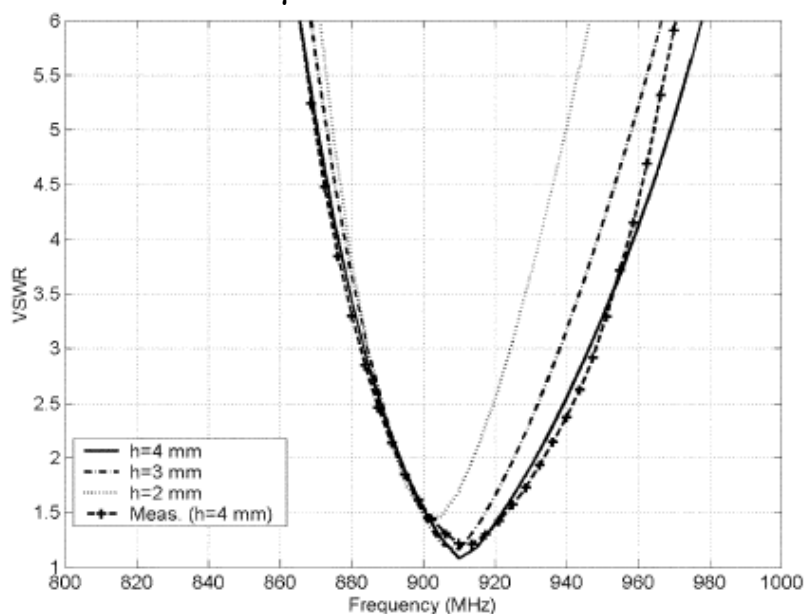
Στο σχήμα 3.11 που ακολουθεί φαίνεται στο το VSWR για την απλή διάταξη για διάφορες τιμές του ύψους της άνω πλάκας. Το εύρος ζώνης, το οποίο έχει υπολογιστεί σε αναφορά με αντίσταση γραμμής τροφοδοσίας 50Ω και VWSR μικρότερο του 2.5, είναι 5% για h=10mm, 4.3% για h=8mm, 3.3% για h=6mm και 2.5% για h=4mm.



Σχήμα 3.11 VSWR της PIFA μονής ζώνης με συμβατικό επίπεδο γείωσης

Στο σχήμα 3.12 φαίνεται ο λόγος στάσιμων κυμάτων για την κεραία στην οποία έχει τοποθετηθεί το μαιανδρικό επίπεδο γείωσης. Το εύρος

ζώνης σε αυτή την περίπτωση είναι 5% για  $h=4\text{mm}$ , 5.7% για  $h=3.5\text{mm}$ , 4.8% για  $h=3\text{mm}$  και 3.5% για  $h=2\text{mm}$ .



(b)

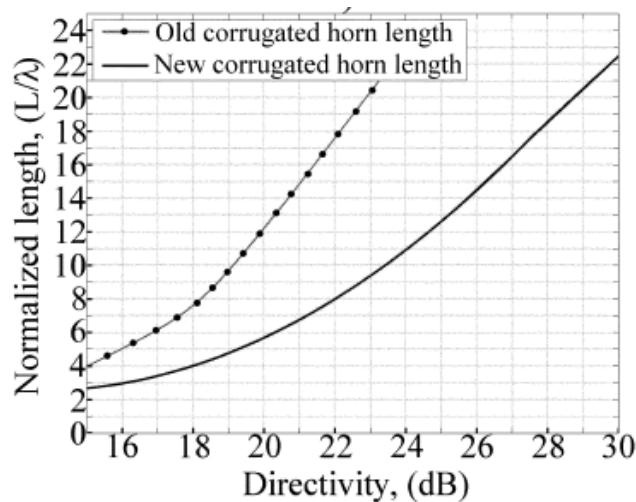
Σχήμα 3.12 VSWR της PIFA μονής ζώνης με μαιανδρικό επίπεδο γείωσης

### 3.3 Πτυχωτή κοανοειδής κεραία με οριζόντιες και κάθετες αυλακώσεις

Πολλές κοανοειδείς κεραίες με χαμηλούς πλευρικούς λοβούς χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές, καθώς είναι ιδιαίτερα σημαντικό το στοιχείο πως με αυτές μπορεί να αποφευχθούν οι παρεμβολές με άλλα επικοινωνιακά συστήματα. Η καινούργια μέθοδος που εισάγεται [11] είναι η εφαρμογή οριζόντιων πτυχώσεων με σκοπό τη μείωση του μήκους του αρχικού τμήματος, σε συνδυασμό με την εφαρμογή κάθετων πτυχώσεων για τη βελτίωση της απόδοσης της κεραίας. Με την εφαρμογή πτυχώσεων σε μια κοανοειδή κεραία επιτυγχάνεται εκτός από τη ρύθμιση του διαγράμματος ακτινοβολίας και η μείωση των διαστάσεών τους. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για αυτού του είδους τις κεραίες γιατί λόγω του υλικού που είναι κατασκευασμένες, γίνονται και ελαφρύτερες.

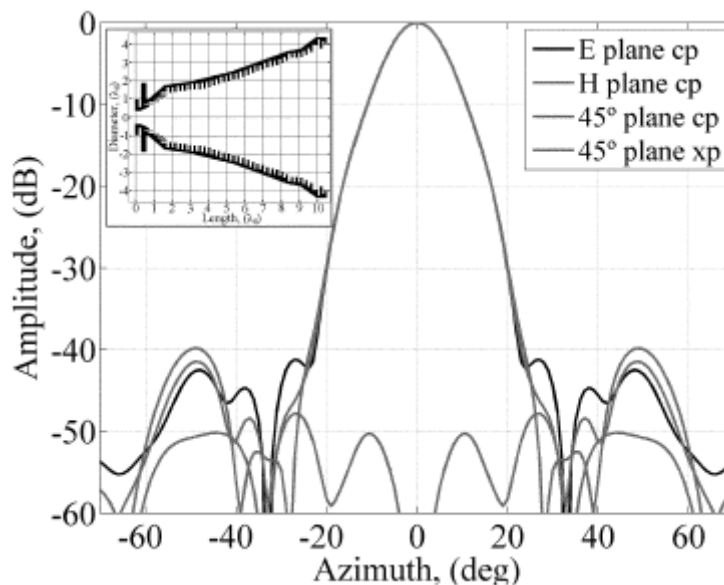
Οι πτυχωτές κοανοειδείς κεραίες, όπως έχει προαναφερθεί προσφέρουν μεγάλο εύρος ζώνης, χαμηλούς πλευρικούς λοβούς, μικρές απώλειες ανάκλασης. Όμως, το συνολικό μέγεθος της κεραίας είναι ένα πρόβλημα, καθώς παλιότερα οριζοντα από κωνικά προφίλ. Για να επιτευχθεί στενό εύρος δέσμης με υψηλή απολαβή (πάνω από 20 dB) απαιτούνται μεγάλες διαστάσεις, η κεραία έχει μεγάλο βάρος και η κατασκευή της είναι συνεπώς ακριβή και δύσκολη. Η διαφορά με την καινούργια τεχνολογία που εισάγεται φαίνεται στα σχήματα 3.7 και 3.8.





Σχήμα 3.13 Μήκος της χοανοειδούς κεραίας σε συνάρτηση με την κατευθυντικότητα

Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των συνηθισμένων πτυχωτών χοανοειδών κεραιών και αυτής που προτείνεται σε αυτή την ενότητα είναι ότι στο λαιμό της κεραίας υπάρχει αντικατάσταση των οριζόντιων πτυχώσεων με κάθετες. Αυτό έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, όπως η ευκολότερη διαδικασία κατασκευής, καθώς οι αντικατασταθείσες πτυχώσεις είναι βαθιές (περίπου  $\lambda/2$ ) και δύσκολες στην παραγωγή. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η μείωση του μήκους με ταυτόχρονη διατήρηση του εύρους ζώνης, ενώ υπάρχουν λιγότερες απώλειες ανάκλασης καθώς με τις οριζόντιες πτυχώσεις είναι λιγότερο πιθανό να εμφανιστούν αιχμές απωλειών.



Σχήμα 3.14 Η πτυχωτή χοανοειδής κεραία και το διάγραμμα ακτινοβολίας της

### 3.4 Σύνοψη

Η μελέτη των παραπάνω περιπτώσεων και το συμπέρασμα που εξάγεται από αυτά, ότι η προσθήκη σχισμών ή πτυχώσεων (Corrugations) έχουν θετική επίδραση (διαφορετική ανά περίπτωση) αποτέλεσε εφιαλήριο για αυτή τη διπλωματική εργασία.

Στο κεφάλαιο 6, λοιπόν, μελετάται η αλλαγή στα χαρακτηριστικά μιας κεραιάς PIFA, αφού σε αυτή εφαρμοστούν πτυχώσεις ή σχισμές (corrugations εσωτερικά ή εξωτερικά). Η μελέτη αυτή, γίνεται αποκλειστικά για τις συχνότητες του προτύπου DVB-T (470 – 862 MHz), δίνοντας αρκετή βαρύτητα στις υψηλότερες συχνότητες αυτού του διαστήματος που αποτελούν αυτό που καλείται ψηφιακό μέρισμα (digital dividend). Λαμβάνοντας υπόψη το χαμηλό κόστος αλλά και την ευκολία στην κατασκευή μιας κεραιάς PIFA, έγινε προσπάθεια να αυξηθεί το εύρος ζώνης της συμβατικής διάταξης, έτσι ώστε να είναι ικανή να λειτουργεί και να λαμβάνει σε όλο το φάσμα του DVB-T. Αυτό, είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι με μια τέτοια δομή μπορούν να καλυφθούν όλες οι υπηρεσίες που εκπέμπουν ήδη σε αυτές τις συχνότητες (ψηφιακή επίγεια τηλεόραση) ή που πρόκειται να μπουν μελλοντικά με την εξοικονόμηση εύρους ζώνης από το αναλογικό switch-off (π.χ. εφαρμογές διαδικτύου σε δίκτυα WRAN (πρότυπο 802.22) [18]).

# Κεφάλαιο 4

---

## Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)

### 4.1 Εισαγωγή

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ), οι οποίοι αρχικά σχεδιάστηκαν από τον Holland το 1975 και στην συνέχεια οργανώθηκαν και δημοσιεύτηκαν από τον Goldberg, γίνονται ολοένα και περισσότερο δημοφιλείς σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές. Έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε ηλεκτρομαγνητικά σχεδιαστικά προβλήματα, όπως σχεδίαση στοιχειοκεραιών, σχεδίαση συρμάτων (wire) και τυπωμένων (patch) κεραιών, σύνθεση διαγραμμάτων ακτινοβολίας και σχεδίαση ηλεκτρομαγνητικών φίλτρων ενώ έχουν και την ικανότητα επίλυσης σχεδιαστικών προβλημάτων με πολύ μεγάλο αριθμό παραμέτρων και με πολλαπλούς στόχους.

Ο τομέας της σχεδίασης ασύρματων κεραιών παρουσιάζει πολλές προκλήσεις. Παραδείγματος χάρη, οι σύγχρονες κεραιές των κινητών τηλεφώνων ή άλλων φορητών συσκευών, πρέπει να είναι μικρές, φθηνές, και να μην είναι ευαίσθητες σε απώλεια ευθυγράμμισης πολικότητας (polarization misalignment) ή σε μετάδοση πολλαπλών δρόμων (multipath). Αν και υπάρχουν αρκετά πολύπλοκα εργαλεία ανάλυσης για την βοήθεια του σχεδιαστή των κεραιών, ένα απλό λογισμικό, όπως ο ΓΑ, μπορεί να μειώσει θεαματικά τον απαιτούμενο χρόνο για την αξιολόγηση πολλών διαφορετικών λύσεων σε ένα σχεδιαστικό πρόβλημα.

Ο ΓΑ δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο οποίος έχει εμπνευστεί από τους γνωστούς βιολογικούς μηχανισμούς της γενετικής και της εξέλιξης. Η γενετική, από την μία πλευρά, είναι η επιστήμη που μελετάει την κληρονομικότητα και τις παραλλαγές των βιολογικών γνωρισμάτων. Ο μηχανισμός της εξέλιξης, από την άλλη, είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την επιστήμη της γενετικής. Αυτός είναι υπεύθυνος για τις γενετικές αλλαγές στους οργανισμούς, μέσω των επιμέρους μηχανισμών της φυσικής επιλογής, της γενετικής κλίσης, της μετάλλαξης και της μετανάστευσης. Η γενετική και η εξέλιξη διαμορφώνουν έναν πληθυσμό, ο οποίος είναι κατάλληλα προσαρμοσμένος για να επιβιώσει στο περιβάλλον όπου ζει. Με άλλα λόγια, ο πληθυσμός βελτιστοποιείται για το δικό του περιβάλλον.

Ένας ΓΑ χρησιμοποιεί μια αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση κόστους, στην οποία η είσοδος είναι ένα χρωμόσωμα (chromosome) και η έξοδος είναι γνωστή ως το κόστος. Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από τα γονίδια (genes) ή τις μεμονωμένες μεταβλητές. Τα γονίδια παίρνουν κάποια συγκεκριμένη μορφή καθώς η μεταβλητή έχει μια ορισμένη τιμή. Μια ομάδα χρωμοσωμάτων είναι γνωστή ως πληθυσμός (population). Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, ο πληθυσμός είναι ένας πίνακας, με κάθε σειρά του να αντιστοιχεί σε ένα χρωμόσωμα:

$$\begin{aligned}
 \text{population} &= \begin{bmatrix} \text{chrom}_1 \\ \text{chrom}_2 \\ \vdots \\ \text{chrom}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1M} \\ g_{21} & g_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ g_{N1} & & \cdots & g_{NM} \end{bmatrix} \\
 &\quad \text{chromosomes} \qquad \qquad \qquad \text{genes} \\
 &= \begin{bmatrix} \text{red} & 1 & \cdots & 19.132 \\ \text{blue} & 4 & & -12.954 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \text{green} & 2 & \cdots & 0.125 \end{bmatrix} \\
 &\quad \qquad \qquad \text{values or alleles}
 \end{aligned}$$

Κάθε χρωμόσωμα είναι η είσοδος σε μια αντικειμενική συνάρτηση  $f$ . Το κόστος που συνδέεται με κάθε χρωμόσωμα υπολογίζεται από την αντικειμενική συνάρτηση μεμονωμένα για το καθένα ή παράλληλα:

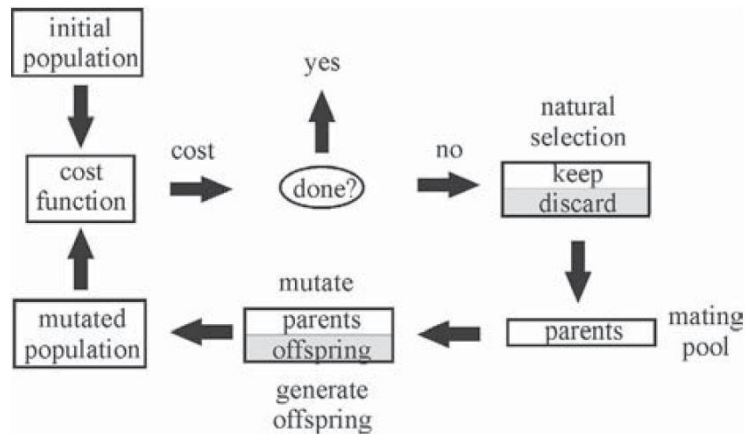
$$f \left\{ \begin{bmatrix} \text{chrom}_1 \\ \text{chrom}_2 \\ \vdots \\ \text{chrom}_N \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} \text{cost}_1 \\ \text{cost}_2 \\ \vdots \\ \text{cost}_N \end{bmatrix}$$

Το κόστος είναι αυτό που καθορίζει την καταλληλότητα (fitness) ενός μέλους στον πληθυσμό. Ένα χαμηλότερο κόστος υπονοεί μεγαλύτερο fitness.

Οι διαδικασίες ΓΑ λειτουργούν μόνο με αριθμούς. Επομένως, στις μη αριθμητικές τιμές, όπως ένα χρώμα ή μια άποψη, πρέπει να οριστεί ένας αριθμός. Συνήθως, οι αριθμητικές τιμές που ορίζονται στα γονίδια είναι με το δυαδικό σχήμα. Οι συνεχείς τιμές έχουν έναν άπειρο αριθμό πιθανών συνδυασμών τιμών εισόδου, ενώ οι δυαδικές έχουν έναν πολύ μεγάλο αλλά πεπερασμένο αριθμό πιθανών συνδυασμών τιμών εισόδου. Η χρήση δυαδικού σχήματος είναι επίσης κοινή όταν υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός τιμών για μια μεταβλητή, όπως τέσσερις τιμές επιτρεπτότητας (permittivity) για ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα (dielectric substrate).

Ένας κοινός ΓΑ είναι αρκετά απλός και ισχυρός. Ο αλγόριθμος περιέχει τα ακόλουθα 7 βασικά βήματα:

1. Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού.
  2. Αξιολόγηση του fitness κάθε χρωμοσώματος του πληθυσμού.
  3. Χρήση του μηχανισμού φυσικής επιλογής (natural selection).
  4. Επιλογή των χρωμοσωμάτων για το ζευγάρι (mating).
  5. Παραγωγή των απογόνων (offspring).
  6. Μετάλλαξη των επιλεγμένων χρωμοσωμάτων.
  7. Ολοκλήρωση της διαδικασίας ή επιστροφή στο 2<sup>ο</sup> βήμα.
- Τα βήματα αυτά αναπαρίστανται γραφικά στο Σχήμα 4.1:



Σχήμα 4.1 - Διάγραμμα ροής ενός γενετικού αλγόριθμου

#### 4.2 Δημιουργία Αρχικού Πληθυσμού

Ο αρχικός πληθυσμός είναι η μήτρα εκκίνησης των χρωμοσωμάτων. Κάθε σειρά είναι μια τυχαία «ειकाσία» για τη βέλτιστη λύση. Εάν ο αριθμός των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την παραγωγή της συνάρτησης κόστους είναι ίσος με  $nvar$ , τότε κάθε χρωμόσωμα στον αρχικό πληθυσμό αποτελείται από  $nvar$  τυχαίες τιμές που ορίζονται για τις μεταβλητές αυτές. Για παράδειγμα, μια εντολή MATLAB που παράγει μια τυχαία μήτρα πληθυσμού  $npop$  χρωμοσωμάτων είναι η εξής:

$$pop = rand(npop, nvar)$$

Από την εντολή αυτή παράγεται ένας πληθυσμός οκτώ χρωμοσωμάτων, τα οποία έχουν τέσσερις μεταβλητές το καθένα ( $npop = 8, nvar = 4$ ):

$$pop = \begin{bmatrix} 0.44510 & 0.83812 & 0.30462 & 0.37837 \\ 0.93181 & 0.01964 & 0.18965 & 0.86001 \\ 0.46599 & 0.68128 & 0.19343 & 0.85366 \\ 0.41865 & 0.37948 & 0.68222 & 0.59356 \\ 0.84622 & 0.83180 & 0.30276 & 0.49655 \\ 0.52515 & 0.50281 & 0.54167 & 0.89977 \\ 0.20265 & 0.70947 & 0.15087 & 0.82163 \\ 0.67214 & 0.42889 & 0.69790 & 0.64491 \end{bmatrix}$$

Η κάθε μεταβλητή περιορίζεται να είναι μεταξύ μηδέν και ένα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δυαδικοί αριθμοί, η μήτρα πληθυσμών παράγεται μέσω της εντολής:

$$pop = round(rand(npop, nvar * nbits))$$

όπου  $nbits$  είναι ο αριθμός των bits ανά μεταβλητή. Από την εντολή αυτή παράγεται ένας πληθυσμός οκτώ χρωμοσωμάτων, τα οποία έχουν τέσσερις μεταβλητές των 3 bits το καθένα ( $npop = 8, nvar = 4, nbits = 3$ ):

$$pop = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 4.3 Υπολογισμός Καταλληλότητας (Fitness)

Τα χρωμοσώματα περνούν στη συνάρτησης κόστους  $fun$  για την αξιολόγηση. Κάθε χρωμόσωμα έχει έπειτα ένα κόστος που το χαρακτηρίζει:

$$cost = fun(pop)$$

Ένα παράδειγμα συνάρτησης κόστους είναι το εξής:

$$cost = f(x_1, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N x_n^2$$

Υποθέτουμε ότι η συνάρτηση κόστους κάνει την εργασία της μετατροπής των τιμών των μεταβλητών από το πεδίο τιμών  $[0,1]$  στο πραγματικό πεδίο τιμών και/ή της μετατροπής των δυαδικών τιμών σε κβαντοποιημένους πραγματικούς αριθμούς. Μία μεταβλητή  $X$  παίρνει τιμές από  $x_{hi}$  μέχρι  $x_{lo}$ , έτσι η μετατροπή αυτή γίνεται ως εξής:

$$x = x_{lo} + (x_{hi} - x_{lo}) * pop(1, :)$$

Συνεπώς, εάν οι μεταβλητές για τον πληθυσμό στο παράδειγμά μας έχουν πεδίο τιμών  $-5 \leq x_n \leq 5$ , τότε το πρώτο χρωμόσωμα θα έχει τις τιμές:

$$chrom_1 = [-0.549 \quad 3.3812 \quad -1.9538 \quad -1.2163]$$

Χρησιμοποιώντας τον πληθυσμό του παραδείγματός μας σαν είσοδο στην συνάρτηση κόστους η έξοδος θα είναι η εξής:

$$cost = \begin{bmatrix} 17.031 \\ 64.313 \\ 25.308 \\ 6.310 \\ 26.888 \\ 16.219 \\ 35.763 \\ 9.485 \end{bmatrix}$$

Εάν όμως, αντί για τον πληθυσμό με τις συνεχείς τιμές χρησιμοποιηθεί πληθυσμός με τις δυαδικές, τότε οι δυαδικές τιμές μετατρέπονται σε συνεχείς με την παρακάτω εντολή:

$$x = xlo + (xhi - xlo) * ([2. ^{(-[1:nbits])}] * reshape(pop(1,:), nbits, nvar))$$

Εάν τα όρια  $xhi$  και  $xlo$  είναι και πάλι 5 και -5 αντίστοιχα, τότε το πρώτο χρωμόσωμα θα έχει τις τιμές:

$$chrom_1 = [3.75 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Υπάρχουν φορές όμως, που η δυαδική συμβολοσειρά (string) δεν χρειάζεται μετατροπή ή αντιπροσωπεύει μια επιλογή και όχι έναν συνεχή αριθμό.

Η διατύπωση της συνάρτησης κόστους είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό βήμα στην διαδικασία της βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι η συνάρτηση αυτή θα πρέπει να κληθεί πολλές φορές για να αξιολογήσει το κόστος όλων των μελών των πληθυσμών. Για τον λόγο αυτό, υπάρχει συνήθως ένας συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας και του χρόνου υπολογισμού. Για να μειωθεί ο χρόνος σύγκλισης, η συνάρτηση κόστους πρέπει να περιλαμβάνει μόνο σχετικές μεταβλητές. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μεγιστοποίησης του κέρδους μιας κεραίας μικροταινίας (microstrip), το μέγεθος του τυπώματος (patch) είναι σημαντικό, ενώ το χρώμα της κεραίας δεν είναι. Ορισμένες μορφές της συνάρτησης κόστους είναι πιο εύχρηστες και ικανές να βελτιστοποιήσουν ένα πρόβλημα σε σχέση με άλλες. Για παράδειγμα, η βελτιστοποίηση της θέσης των μηδενικών στον μοναδιαίο κύκλο για έναν παράγοντα διάταξης (array factor) λειτουργεί καλύτερα από την βελτιστοποίηση των βαρών των στοιχείων κατά την ελαχιστοποίηση των επιπέδων των πλευρικών λοβών του παράγοντα διάταξης. Ο χρόνος που ξοδεύεται για την προσεκτική διατύπωση της συνάρτησης κόστους πριν την βελτιστοποίηση αποδεικνύεται ωφέλιμος στην συνέχεια.

Συνήθως όμως, η συνάρτηση κόστους πρέπει να ικανοποιήσει περισσότερους από έναν στόχους. Παραδείγματος χάρη, περιπτώσεις μεγιστοποίησης του κέρδους των κεραίων με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του όγκου τους. Αυτός ο τύπος προβλήματος είναι γνωστός ως βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων (multiple-objective optimization). Ένας κοινός τρόπος αντιμετώπισης τέτοιου είδους προβλημάτων πολλαπλών στόχων είναι να τυποποιηθεί, αρχικά, το κόστος κάθε στόχου, να σταθμιστεί στην συνέχεια, και τέλος να προστεθούν τα επιμέρους σταθμισμένα κόστη για να προκύψει ένα ενιαίο κόστος για τη γενική συνάρτηση κόστους. Κατά συνέπεια, η έξοδος της συνάρτησης κόστους που έχει  $N$  στόχους θα έχει την μορφή:

$$cost = \sum_{n=1}^N w_n c_n$$

Όπου  $\sum_{n=1}^N w_n c_n = 1$  και  $0 \leq c_n \leq 1$ . Η τυποποίηση του κόστους είναι σημαντική για την εξασφάλιση ελέγχου της σχετικού βάρους κάθε κόστους.

#### 4.4 Φυσική Επιλογή

Μόνο τα καταλληλότερα μέλη του πληθυσμού, δηλαδή αυτά με το μεγαλύτερο fitness, έχουν την δυνατότητα να επιζήσουν στην επόμενη γενιά. Για να επικαλεσθεί η φυσική επιλογή υπάρχουν δύο κοινοί

τρόποι. Ο πρώτος τρόπος, είναι να κρατηθεί ένα αριθμός, ίσος με *natsel*, από υγιή χρωμοσώματα και να απορριφθούν τα υπόλοιπα. Στην περίπτωση αυτή, αρχικά, το κόστος ταξινομείται προκειμένου να καθοριστεί το σχετικό fitness των χρωμοσωμάτων:

$$[cost\ ind] = sort(cost)$$

Η ταξινόμηση στο παράδειγμά μας θα έχει το εξής αποτέλεσμα:

$$[cost\ ind] = \begin{bmatrix} 6.310 & 4 \\ 9.485 & 8 \\ 16.219 & 6 \\ 17.031 & 1 \\ 25.308 & 3 \\ 26.888 & 5 \\ 35.763 & 7 \\ 64.313 & 2 \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα-στήλη *ind* είναι η σειρά την οποία είχαν τα κόστη πριν την ταξινόμηση. Στην συνέχεια, ο πληθυσμός ταξινομείται σε σχέση με το κόστος και μόνο *natsel*= 4 χρωμοσώματα διατηρούνται:

$$\begin{aligned} pop &= pop(ind(1:natsel), :) \\ cost &= cost(1:natsel) \end{aligned}$$

Ο πληθυσμός και τα κόστη που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

$$[pop\ cost] = \begin{bmatrix} 0.41865 & 0.37948 & 0.68222 & 0.59356 & 6.3100 \\ 0.67214 & 0.42889 & 0.69790 & 0.64491 & 9.4852 \\ 0.52515 & 0.50281 & 0.54167 & 0.89977 & 16.2190 \\ 0.44510 & 0.83812 & 0.30462 & 0.37837 & 17.0310 \end{bmatrix}$$

Ο δεύτερος τρόπος εφαρμογής του μηχανισμού της φυσικής επιλογής είναι ο αποκαλούμενος ως *thresholding*. Χρησιμοποιώντας τον τρόπο αυτό, στην επόμενη γενιά επιβιώνουν όλα τα χρωμοσώματα των οποίων το κόστος είναι κάτω από μία οριακή τιμή (*threshold*):

$$pop = pop(find(cost < maxcost));$$

Εάν *maxcost* είναι η μέση αξία του διανύσματος κόστους, τότε το αποτέλεσμα είναι ίδιο με την προηγούμενη μέθοδο. Από την άλλη μεριά, αν για παράδειγμα είναι *maxcost* = 10, τότε μόνο τα δύο πρώτα χρωμοσώματα του παραπάνω πληθυσμού, με κόστη 6,31 και 9,84852 θα επιβιώσουν. Στο *thresholding*, όμως, παραλείπεται το στάδιο ταξινόμησης. Υπάρχουν όμως εναλλακτικές λύσεις για το *maxcost* όπως για παράδειγμα, να είναι ο μέσος όρος των κόστων ή η διάμεσός τους. Τα χρωμοσώματα που επιζούν διαμορφώνουν την δεξαμενή ζευγαρώνοντας (*mating pool*), ή την ομάδα χρωμοσωμάτων από την οποία επιλέγονται στην συνέχεια οι γονείς (*parents*) για να δημιουργήσουν τον απόγονο (*offspring*).

#### 4.5 Επιλογή Ζευγαρώματος

Την υψηλότερη πιθανότητα επιλογής για ζευγάρι (*mating*) ορίζεται να έχουν τα πιο κατάλληλα μέλη του πληθυσμού. Οι δύο πιο κοινοί τρόποι επιλογής των χρωμοσωμάτων που θα ζευγαρωθούν είναι η



μέθοδος της ρουλέτας (roulette wheel) και η μέθοδος επιλογής τουρνουά (tournament selection).

#### 4.5.1 Μέθοδος της Ρουλέτας

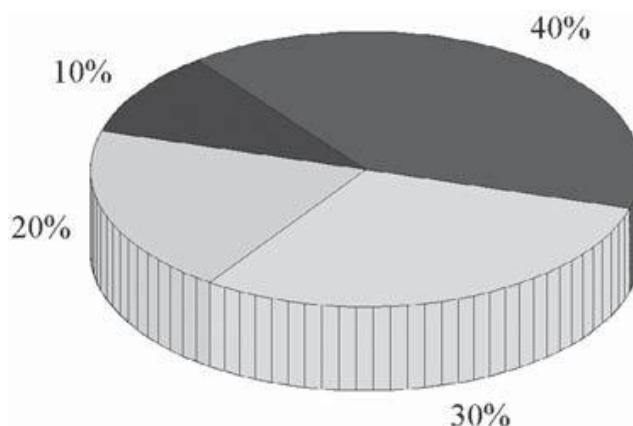
Ο πληθυσμός πρέπει πρώτα να ταξινομηθεί για την μέθοδο της ρουλέτας. Για κάθε χρωμόσωμα ορίζεται μια πιθανότητα επιλογής βάσει της σειράς του στον ταξινομημένο πληθυσμό ή του κόστους του. Η επιλογή βάσει της σειράς ταξινόμησης είναι η ευκολότερη υλοποίηση της μεθόδου της ρουλέτας. Ο κώδικας MATLAB που δημιουργεί την ρουλέτα είναι ο ακόλουθος:

```
parents = 1:natsel
prob = parents/sum(parents)
odds = [0 cumsum(prob)]
```

Όταν είναι  $natsel=4$ , οι ανωτέρω εντολές MATLAB έχουν το επόμενο αποτέλεσμα:

```
parents = [1 2 3 4]
prob = [0.1 0.2 0.3 0.4]
odds = [0 0.1 0.3 0.6 1]
```

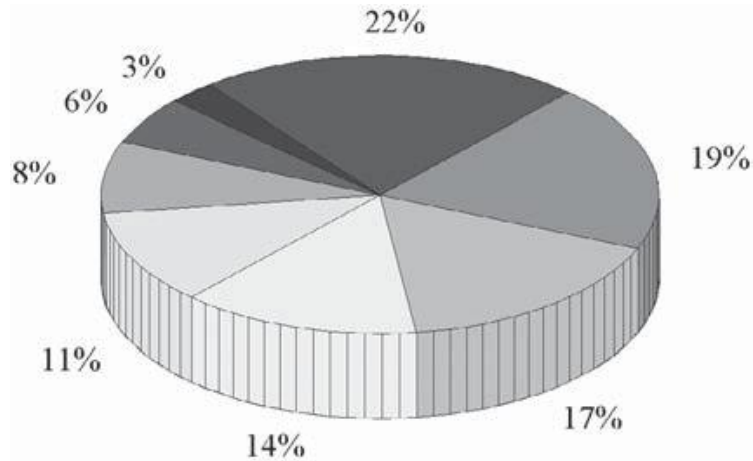
Η ρουλέτα για μια ομάδα επιλογής τεσσάρων γονέων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Τα χρωμοσώματα με το χαμηλότερο κόστος έχουν υψηλότερη πιθανότητα επιλογής σε αντίθεση με τα χρωμοσώματα που έχουν το υψηλότερο κόστος. Στην περίπτωση αυτή, το πρώτο (ή το καλύτερο) χρωμόσωμα έχει μια πιθανότητα 40% να επιλεγεί.



Σχήμα 4.2 - Η ρουλέτα για μια ομάδα επιλογής 4 γονέων

Με την προσθήκη περισσότερων γονέων, η πιθανότητα επιλογής ενός χρωμοσώματος μεταβάλλεται. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται μια ρουλέτα για οκτώ γονείς στην δεξαμενή ζευγαρώματος.

Στην περίπτωση αυτή, το πρώτο (ή καλύτερο) χρωμόσωμα έχει πιθανότητα 22% να επιλεγεί. Δεδομένου ότι ο αριθμός των γονέων στην δεξαμενή ζευγαρώματος παραμένει σταθερός από γενιά σε γενιά, η ρουλέτα χρειάζεται να υπολογιστεί μόνο μία φορά.



Σχήμα 4.3 - Η ρουλέτα για μια ομάδα επιλογής 8 γονέων

Επιπρόσθετα, είναι δυνατό να αναπτυχθεί μια ρουλέτα βάσει των κόστων που συνδέονται με τα χρωμοσώματα. Υπάρχουν διάφορα προβλήματα σχετικά με αυτήν την προσέγγιση, μερικά από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Η ρουλέτα πρέπει να επαναυπολογίζεται σε κάθε νέα γενιά.
- Εάν το ποσοστό μετάλλαξης (mutation rate) είναι χαμηλό, τότε στις πιο πρόσφατες γενιές όλα τα χρωμοσώματα θα έχουν περίπου την ίδια πιθανότητα επιλογής.
- Το κόστη πρέπει να κανονικοποιούνται προκειμένου να αναπτυχθούν οι πιθανότητες. Η κανονικοποίηση είναι αυθαίρετη.

Συνεπώς, προτείνεται η επιλογή βάσει της ταξινομημένης σειράς, παρά μια προσέγγιση βασισμένη στα κόστη.

Αφού οριστεί η πιθανότητα της επιλογής για κάθε γονέα, τότε παράγεται ένας τυχαίος αριθμός  $r$ . Για την δεξαμενή ζευγαρώματος τεσσάρων γονέων, το χρωμόσωμα που επιλέγεται είναι βασισμένο στην τιμή του  $r$  και σύμφωνα με τις παρακάτω συνθήκες:

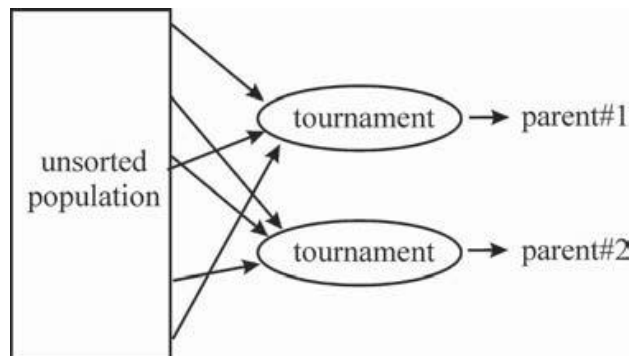
$$\begin{aligned}
 0 &\leq r \leq 0.4 && chrom_1 \\
 0.4 &\leq r \leq 0.7 && chrom_2 \\
 0.7 &\leq r \leq 0.9 && chrom_3 \\
 0.9 &\leq r \leq 1.0 && 4
 \end{aligned}$$

Για παράδειγμα, αν ο αριθμός  $r$  που θα παραχθεί είναι ο  $r = 0,5678$ , τότε το χρωμόσωμα που θα επιλεχτεί είναι το δεύτερο.

#### 4.5.2 Μέθοδος Επιλογής Τουρνουά

Στην περίπτωση της μεθόδου επιλογής τουρνουά, η εύρεση των γονέων, γίνεται με τυχαία επιλογή από δύο μικρές ομάδες χρωμοσωμάτων από την δεξαμενή ζευγαρώματος (συνήθως δύο ή τρία χρωμοσώματα ανά ομάδα). Το χρωμόσωμα με το χαμηλότερο κόστος σε κάθε ομάδα γίνεται γονέας. Κάποια από τα πρωταθλήματα αυτά ή τουρνουά (tournaments) κρατούνται για να παράγουν τον απαραίτητο αριθμό γονέων. Τα πρωταθλήματα επαναλαμβάνονται για κάθε γονέα που απαιτείται. Η μέθοδος επιλογής τουρνουά λειτουργεί καλά με thresholding, επειδή ο πληθυσμός δεν χρειάζεται ποτέ την ταξινόμηση εκτός των περιπτώσεων μεγάλων πληθυσμών που η ταχύτητα

ταξινόμησης γίνεται ζήτημα. Η Σχήμα 4.4 που ακολουθεί αναπαριστά την διαδικασία επιλογής τουρνουά όταν επιλέγονται τρία χρωμοσώματα για κάθε τουρνουά. Η μέθοδος της ρουλέτας και η μέθοδος επιλογής τουρνουά οδηγούν στην ίδια σχεδόν πιθανότητα επιλογής για τα χρωμοσώματα.



Σχήμα 4.4 - Ένα παράδειγμα της μεθόδου επιλογής τουρνουά

#### 4.6 Παραγωγή Απογόνων

Ο απόγονος μπορεί να παραχθεί από τους επιλεγμένους γονείς με ένα σύνολο από διαφορετικούς τρόπους. Για τα δυαδικά χρωμοσώματα, η ομοιόμορφη διασταύρωση είναι η πιο γενική διαδικασία. Μια μάσκα που αποτελείται από άσσους και μηδενικά παράγεται για κάθε σύνολο γονέων, έχοντας τον ίδιο αριθμό bits με τα γονικά χρωμοσώματα. Μερικά παραδείγματα με τέτοιες μάσκες είναι τα ακόλουθα:

- Διασταύρωση μονού σημείου (Single point crossover):

$$mask = zeros(1, ceil(rand * (nvar * nbit - 1))) * ones(1, nvar * nbit)$$

- Ομοιόμορφη διασταύρωση (Uniform crossover):

$$mask = round(rand(1, nvar * nbit))$$

Ο απόγονος δημιουργείται από κομμάτια κάθε γονέα. Όταν η τιμή του bit στη μάσκα είναι ένα, τότε το αντίστοιχο κομμάτι από τη μητέρα περνά στο πρώτο παιδί ενώ το αντίστοιχο κομμάτι από τον πατέρα περνά στο δεύτερο παιδί. Αντίστοιχα, όταν η τιμή του bit στη μάσκα είναι μηδέν, τότε το αντίστοιχο κομμάτι από τη μητέρα περνά στο δεύτερο παιδί, και το αντίστοιχο κομμάτι από τον πατέρα περνά στο πρώτο παιδί. Στον κώδικα MATLAB, αυτή η διαδικασία γίνεται ως εξής:

$$offspring1 = mask.*mother + not(mask).*father$$

$$offspring2 = not(mask).*mother + mask.*father$$

Υπάρχει και η πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί μια μάσκα και για τα μη δυαδικά χρωμοσώματα. Στην περίπτωση αυτή, μεταβλητές τιμές ανακατεύονται μεταξύ των γονικών χρωμοσωμάτων για να παραχθεί ο απόγονος. Οι πιο κοινές μέθοδοι συνδυάζουν τις μεταβλητές τιμές από τους δύο γονείς. Μια προσέγγιση είναι να δοθούν βάρη στους δύο γονείς και να προστεθούν έπειτα μαζί για την παραγωγή του απόγονου:

$$offspring1 = \beta mother + (1 - \beta) father$$

$$offspring2 = (1 - \beta) mother + \beta father$$

Στις παραπάνω εντολές είναι  $0 \leq \beta \leq 1$ . Όταν  $\beta = 0.5$ , το αποτέλεσμα είναι ένας μέσος όρος των μεταβλητών των δύο γονέων. Αυτή η γραμμική διαδικασία συνδυασμού γίνεται για όλες τις μεταβλητές δεξιά ή αριστερά κάποιου σημείου διασταύρωσης (crossover point), ή μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε μεταβλητή. Οι μεταβλητές μπορούν να συνδυαστούν με τη χρησιμοποίηση του ίδιου  $\beta$  ή με την επιλογή διαφορετικής τιμής για κάθε μεταβλητή. Αυτές οι μέθοδοι συνδυασμού δημιουργούν τις τιμές για τις μεταβλητές, οι οποίες βρίσκονται πάντα μεταξύ των τιμών για την αντίστοιχη μεταβλητή που είχαν οι γονείς. Έτσι, σε καμία περίπτωση δεν εισάγουν τιμές πέρα από τις ακραίες που υπήρχαν ήδη στον πληθυσμό.

Μια μέθοδος προβολής (extrapolation method) παράγει απογόνους, στους οποίους οι τιμές των μεταβλητών δεν περιορίζονται από τις τιμές των γονέων. Η γραμμική διασταύρωση (linear crossover) δημιουργεί τιμές έξω από τις τιμές των μεταβλητών βρίσκοντας τρεις νέες τιμές που δίνονται από τις ακόλουθες εντολές:

$$\begin{aligned} offspring1 &= 0.5 * mother + 0.5 * father \\ offspring2 &= 1.5 * mother - 0.5 * father \\ offspring3 &= -1.5 * mother + 0.5 * father \end{aligned}$$

Μόνο δύο από τις τρεις κρατιούνται στο τέλος. Οποιαδήποτε τιμή έξω από τους περιορισμούς απορρίπτεται. Η ευρετική διασταύρωση (heuristic crossover) είναι μια παραλλαγή όπου κάποιος τυχαίος αριθμός  $\beta$  επιλέγεται στο διάστημα  $[0,1]$  και οι μεταβλητές του απογόνου καθορίζονται ως εξής:

$$offspring = \beta * (mother - father) + mother$$

Μια άλλη δυνατότητα είναι να παραχθούν διαφορετικές τιμές  $\beta$  για κάθε μεταβλητή. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή, επιτρέπεται η παραγωγή απογόνου με τιμές μεταβλητών έξω από τις τιμές των δύο γονέων. Μερικές φορές οι τιμές που παράγονται βρίσκονται έξω από τα επιτρεπτά όρια. Όταν συμβαίνει αυτό, ο απόγονος απορρίπτεται και ο αλγόριθμος δοκιμάζει ένα άλλο  $\beta$ . Η δευτεροβάθμια διασταύρωση (quadratic crossover) εκτελεί μια δευτεροβάθμια παρεμβολή (quadratic interpolation) του κόστους ως συνάρτηση κάθε μεταβλητής. Για την μέθοδο αυτή απαραίτητη προϋπόθεση είναι τρεις γονείς και τα κόστη τους. Ο απόγονος από αυτούς τους τρεις γονείς είναι το χρωμόσωμα που αντιστοιχεί στο ελάχιστο της εξίσωσης δευτέρου βαθμού.

Η συνεχής διασταύρωση μονού σημείου (continuous single point crossover) έχει πολλά κοινά στοιχεία με τη διασταύρωση μονού σημείου για τον δυαδικό αλγόριθμο. Η διαδικασία αρχίζει με την τυχαία επιλογή μιας μεταβλητής ως σημείο διασταύρωσης μέσα στα γονικά χρωμοσώματα:

$$q = \text{ceil}(\text{rand} * nvar)$$

Έστω ότι οι δύο γονείς είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} mother &= [m_1 m_2 \dots m_q \dots m_{nvar}] \\ father &= [f_1 f_2 \dots f_q \dots f_{nvar}] \end{aligned}$$

Οι επιλεγμένες μεταβλητές συνδυάζονται για να διαμορφώσουν νέες μεταβλητές που θα βρίσκονται μέσα στον απόγονο:

$$b_q = m_q - \beta[m_q - f_q]$$

$$g_q = f_q + \beta[m_q - f_q]$$

όπου το  $\beta$  έχει μια τυχαία τιμή μεταξύ 0 και 1. Το τελευταίο στάδιο είναι να ολοκληρωθεί η διασταύρωση με το υπόλοιπο του χρωμοσώματος όπως πριν:

$$offspring1 = [m_1 m_2 \dots b_q \dots f_{nvar}]$$

$$offspring2 = [f_1 f_2 \dots g_q \dots m_{nvar}]$$

Εάν έχει επιλεχθεί η πρώτη μεταβλητή των χρωμοσωμάτων, τότε μόνο οι μεταβλητές δεξιά της επιλεγμένης μεταβλητής ανταλλάσσονται. Εάν όμως, έχει επιλεχθεί η τελευταία μεταβλητή των χρωμοσωμάτων, τότε μόνο οι μεταβλητές αριστερά της επιλεγμένης μεταβλητής ανταλλάσσονται. Αυτή η μέθοδος δεν επιτρέπει στις μεταβλητές των απογόνων να παίρνουν τιμές έξω από όρια που τίθενται από το γονέα, εκτός αν  $\beta > 1$ .

Για να καταδειχτεί η έννοια της συνεχούς μεταβλητής διασταύρωσης, έστω ότι έχουμε τους ακόλουθους δύο γονείς:

$$mother = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6]$$

$$father = [3 \ 2 \ 1 \ 0 \ 1 \ 2]$$

Εάν η διασταύρωση γίνει με ένα τυχαίο  $\beta$  (στην περίπτωση μας  $\beta = 0,78642$ ), κοινό για όλες τις μεταβλητές, το αποτέλεσμα θα είναι το εξής:

$$b = rand = 0.78642$$

$$chrom3 = b * chrom1 + (1 - b) * chrom2$$

$$chrom3 = [1.4272 \ 2 \ 2.5728 \ 3.1457 \ 4.1457 \ 5.1457]$$

$$chrom4 = (1 - b) * chrom1 + b * chrom2$$

$$chrom4 = [2.5728 \ 2 \ 1.4272 \ 0.8543 \ 1.8543 \ 2.8543]$$

Εάν όμως, το  $\beta$  έχει τυχαία τιμή, αλλά διαφορετική για κάθε μεταβλητή, το αποτέλεσμα θα είναι το εξής:

$$b = rand(1,6)$$

$$= [0.30415 \ 0.79177 \ 0.22736 \ 0.24999 \ 0.61258 \ 0.61086]$$

$$chrom3 = b.* chrom1 + (1 - b).* chrom2$$

$$chrom3 = [3.2917 \ 2 \ 1.4547 \ 0.99997 \ 3.4503 \ 4.4434]$$

$$chrom4 = (1 - b).* chrom1 + b.* chrom2$$

$$chrom4 = [1.6083 \ 2 \ 2.5453 \ 3 \ 2.5497 \ 3.5566]$$

Εάν χρησιμοποιηθεί γραμμική διασταύρωση, το αποτέλεσμα θα είναι το εξής:

$$chrom3 = 0.5 * chrom1 + 0.5 * chrom2$$

$$chrom3 = [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 4]$$

$$chrom4 = 1.5 * chrom1 - 0.5 * chrom2$$

$$chrom4 = [0 \ 2 \ 4 \ 6 \ 7 \ 8]$$

$$chrom5 = -0.5 * chrom1 + 1.5 * chrom2$$

$$chrom4 = [4 \ 2 \ 0 \ -2 \ -1 \ 0]$$

Εάν χρησιμοποιηθεί ευρετική διασταύρωση, το αποτέλεσμα θα είναι το εξής:

$$\beta = 0.78642$$

$$chrom3 = chrom1 - b * (chrom1 - chrom2)$$

$$chrom3 = [2.5728 \ 2 \ 1.4272 \ 0.85432 \ 1.8543 \ 2.8543]$$

$$chrom4 = chrom1 + b * (chrom1 - chrom2)$$

$$chrom4 = [-0.57284 \ 2 \ 4.5728 \ 7.1457 \ 8.1457 \ 9.1457]$$

Εάν τέλος χρησιμοποιηθεί διασταύρωση μονού σημείου, το αποτέλεσμα θα είναι το εξής:

$$a = \text{round}(\text{rand} * 6)$$

$$a = 5$$

$$chrom3 = [chrom1(1:a-1) \ chrom1(a) - b * (chrom1(a) - chrom2(a)) \ chrom2(a+1:6)]$$

$$chrom3 = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 1.8543 \ 2]$$

$$chrom4 = [chrom2(1:a-1) \ chrom2(a) + b * (chrom1(a) - chrom2(a)) \ chrom1(a+1:6)]$$

$$chrom4 = [3 \ 2 \ 1 \ 0 \ 4.1457 \ 6]$$

#### 4.7 Μετάλλαξη

Η μετάλλαξη προκαλεί τις τυχαίες παραλλαγές στον πληθυσμό. Το ποσοστό μετάλλαξης (mutation rate) καθορίζει το πλήθος των bits ή των τιμών που θα αλλάξουν μέσα σε έναν πληθυσμό. Μια δυαδική μετάλλαξη αλλάζει έναν άσσο σε μηδενικό ή το αντίστροφο. Η εντολή MATLAB που πραγματοποιεί αυτήν την μετάλλαξη είναι η εξής:

$$pop(\text{multindx}) = \text{abs}(pop(\text{multindx}) - 1)$$

Για τις συνεχείς μεταβλητές η μετάλλαξη μπορεί να λάβει πολλές διαφορετικές μορφές. Σε μία απ' αυτές, γίνεται πλήρης αντικατάσταση της επιλεγμένη τιμής με μια νέα τυχαία τιμή:

$$pop(\text{multindx}) = \text{rand}(1, nmut);$$

Η προσέγγιση αυτή, κρατά όλες τις τιμές των μεταβλητών μέσα στα αποδεκτά όρια ενώ μια εναλλακτική λύση είναι να προκληθεί μια τυχαία απόκλιση στην τιμή της επιλεγμένης μεταβλητής. Χρειάζεται όμως προσοχή για να εξασφαλιστεί ότι οι νέες τιμές δεν θα επεκτείνονται έξω από τα αποδεκτά όρια των μεταβλητών.

#### 4.8 Ολοκλήρωση της διαδικασίας

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου επαληθευθεί μια συνθήκη λήξης. Τέτοιες συνθήκες είναι συνήθως οι εξής:

- Καθορισμένος αριθμός επαναλήψεων.
- Καθορισμένος χρόνος.
- Ένα καθορισμένο κόστος που είναι χαμηλότερο από ένα αποδεκτό ελάχιστο.
- Καθορισμένος αριθμός αξιολογήσεων συνάρτησης κόστους.
- Η καλύτερη λύση δεν έχει αλλάξει μετά από έναν καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

Οι διαδικασίες αυτές, οδηγούν τελικά σε έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων που είναι διαφορετικός από αυτόν της πρώτης γενιάς. Γενικά το μέσο fitness των χρωμοσωμάτων θα έχει αυξηθεί μετά από

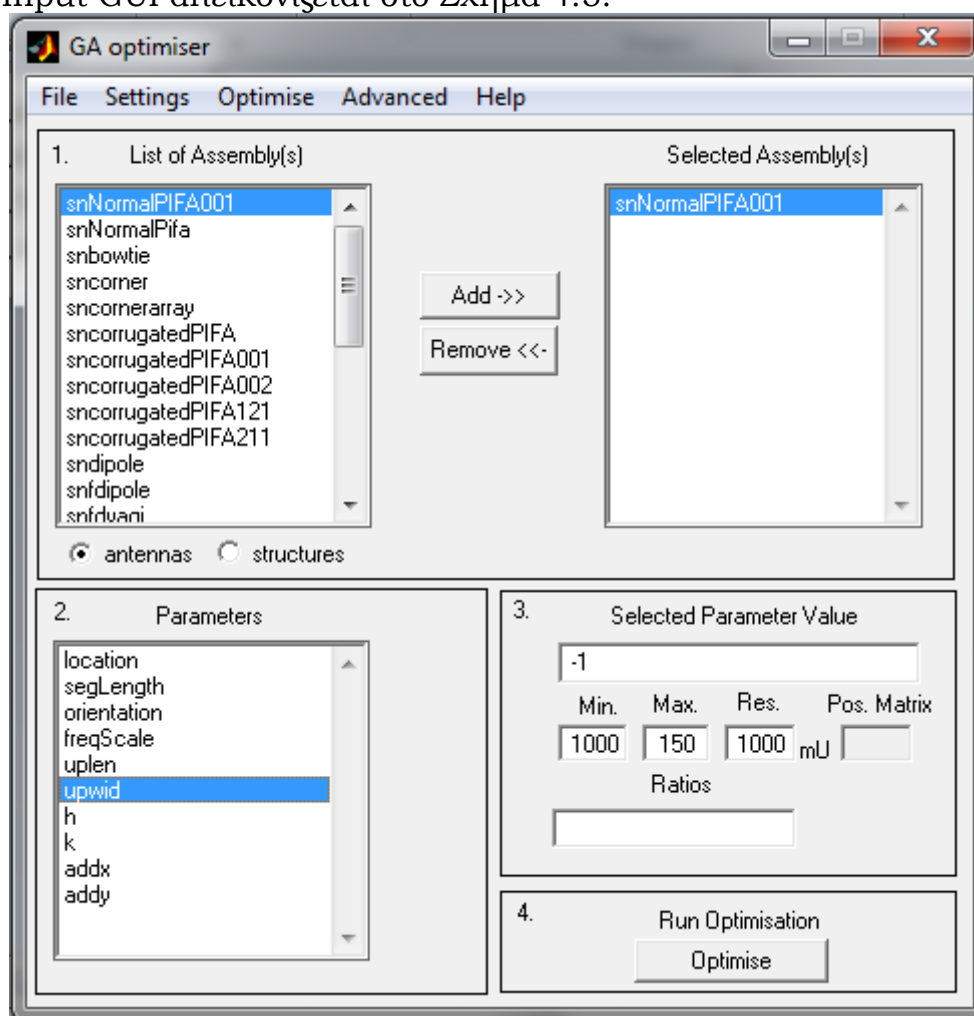
αυτήν την διαδικασία, δεδομένου ότι μόνο τα καλύτερα χρωμοσώματα από την προηγούμενη γενιά επιλέγονται για την αναπαραγωγή.

#### 4.9 Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι στο SuperNEC

Το πακέτο προσομοίωσης SuperNEC, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, έχει ενσωματωμένο λογισμικό βελτιστοποίησης με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Το λογισμικό αυτό είναι το GA Optimizer και όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια παρέχει πολλές διαφορετικές επιλογές για την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων σε σχεδιαστικά προβλήματα.

##### 4.9.1 GA Input GUI (Graphical User Interface)

Η ρύθμιση των παραμέτρων της βελτιστοποίησης στο SuperNEC γίνεται μέσω του GA Input GUI (γραφική διεπαφή χρήση). Η μορφή του GA Input GUI απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.



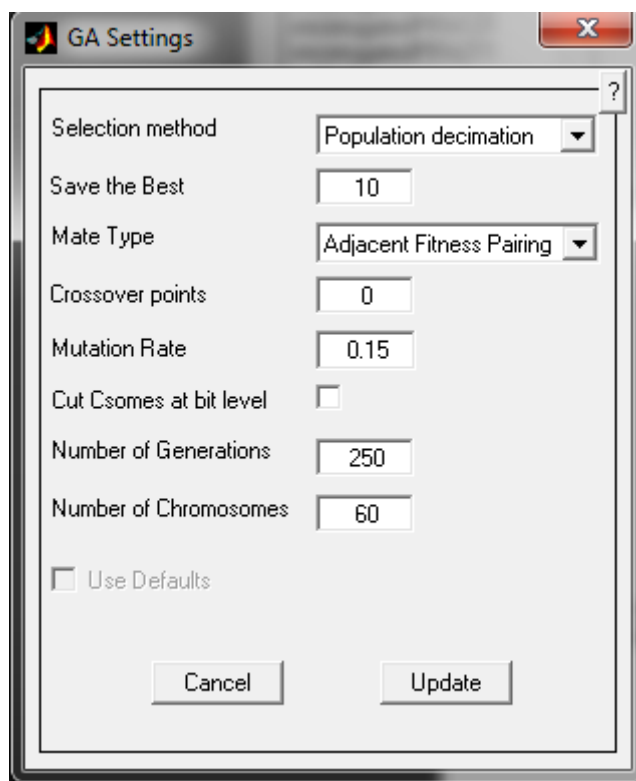
Σχήμα 4.5 - Το GA Input GUI του SuperNEC

Για να εισαχθεί μία διάταξη (assembly) στο μοντέλο βελτιστοποίησης, ο χρήστης επιλέγει από την αριστερή λίστα και πατάει το κουμπί ADD. Για τον καθορισμό των παραμέτρων βελτιστοποίησης, επιλέγει την επιθυμητή παράμετρο του assembly από τη λίστα Parameters κάτω αριστερά και στην συνέχεια, για την επιλεγμένη παράμετρο, καθορίζει τις

μεταβλητές βελτιστοποίησης, θέτοντας για καθεμία ελάχιστη τιμή, μέγιστη τιμή και βήμα. Για όσες παραμέτρους δεν πρόκειται να συμμετάσχουν στην βελτιστοποίηση και επιθυμείται να παραμείνουν σταθερές, η τιμή τους καθορίζεται στο πεδίο Selected Parameter Value. Για τις παραμέτρους βελτιστοποίησης υπάρχουν δύο κατηγορίες, οι ανεξάρτητες και οι εξαρτημένες. Οι ανεξάρτητες παράμετροι καθορίζονται με ένα μηδενικό ή έναν οποιοδήποτε αρνητικό ακέραιο αριθμό στο πεδίο Selected Parameter Value ενώ οι εξαρτημένες παράμετροι, με έναν αρνητικό δεκαδικό αριθμό στο ίδιο πεδίο και κάποια τιμή στο πεδίο Ratios, η οποία καθορίζει τον σταθερό λόγο εξάρτησης της εξαρτημένης παραμέτρου.

#### 4.9.1.1 Καθορισμός των GA Settings.

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των ρυθμίσεων του γενετικού αλγορίθμου. Για να γίνει αυτό, επιλέγεται στο GA Input GUI από το αναδυόμενο μενού Settings η επιλογή GA Settings. Το παράθυρο στο οποίο καθορίζονται οι ρυθμίσεις αυτές φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Σε αυτό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει τις δικές του ρυθμίσεις για τις παραμέτρους:



Σχήμα 4.6 - Το παράθυρο GA Settings

- Selection method:  
Στο πεδίο αυτό, ο χρήστης καθορίζει τη μέθοδο επιλογής την οποία θα χρησιμοποιήσει κατά την βελτιστοποίηση μεταξύ των Population Decimation, Proportionate Selection και Tournament Selection. Οι μηχανισμοί επιλογής αυτοί, καθορίζουν ποια χρωμοσώματα θα λάβουν μέρος στη διαδικασία της εξέλιξης. Σύμφωνα με το GA optimizer User Manual, η μέθοδος Population



Decimation οδηγεί σε εξαιρετική σύγκλιση και έχει αποδειχτεί ότι για την περίπτωση βελτιστοποίησης κεραιών, προσφέρει τις καλύτερες λύσεις σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Για τον λόγο αυτό προτιμήθηκε και στην παρούσα εργασία. Από κει και πέρα, όσον αφορά τις άλλες δύο μεθόδους, έχει αποδειχτεί από τον Orchard Brandon το 2002, ότι η μέθοδος Tournament Selection οδηγεί σε ελαφρώς καλύτερες λύσεις σε σχέση με την Proportionate Selection, αλλά όχι καλύτερες από την Population Decimation.

- Save the Best:

Στο πεδίο αυτό ο χρήστης εισάγει έναν ακέραιο αριθμό που καθορίζει τον αριθμό των καλύτερων χρωμοσωμάτων τα οποία θα εισαχθούν στη νέα γενιά από την προηγούμενη. Η τεχνική αυτή, είναι ικανή να μειώσει τον χρόνο σύγκλισης.

- Mate Type:

Τα σχήματα ζευγαρώματος (mating schemes) έχουν ως στόχο τον καθορισμό των χρωμοσωμάτων του πληθυσμού, τα οποία θα αποτελέσουν ένα ζεύγος γονέων για την παραγωγή απογόνων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει κάποιον από τους εξής τύπους: Best Mates Worst, Adjacent Fitness Pairing και Emperor Selective mating. Στην πρώτη επιλογή, όπως υπονοείται και από το όνομα Best Mates Worst, τα χρωμοσώματα με την υψηλότερη τιμή καταλληλότητας (fitness) ζευγαρώνουν με αυτά που χαρακτηρίζονται από την χαμηλότερη τιμή καταλληλότητας. Ύστερα από έρευνες διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος αυτή λειτουργεί ανάλογα με την Adjacent Fitness Pairing η οποία είναι αυτή που συνιστάται. Σε αυτήν την μέθοδο, τα δύο χρωμοσώματα με την υψηλότερη τιμή καταλληλότητας ζευγαρώνουν μεταξύ τους, και στη συνέχεια το ίδιο γίνεται με τα δύο επόμενα καταλληλότερα χρωμοσώματα και ούτω καθεξής. Τέλος, στην μέθοδο Emperor Selective mating το πρώτο χρωμόσωμα ζευγαρώνει με το δεύτερο, το τέταρτο κ.τ.λ., ενώ το τρίτο, το πέμπτο κ.τ.λ. παραμένουν ανέπαφα.

- Crossover points:

Στο πεδίο αυτό καθορίζεται το σημείο διασταύρωσης για το ζευγάρι των χρωμοσωμάτων. Οι αποδεκτές τιμές είναι στο πεδίο τιμών  $[0,1]$ . Συγκεκριμένα, αν ο χρήστης θέσει την τιμή 0, το σημείο διασταύρωσης θα είναι τυχαίο, ενώ αν θέσει την τιμή 1 δεν θα γίνει καμία διασταύρωση. Αν όμως για παράδειγμα, ο χρήστης θέσει την τιμή 0.5, όλα τα χρωμοσώματα θα διαμελίζονται ακριβώς στην μέση.

- Mutation Rate:

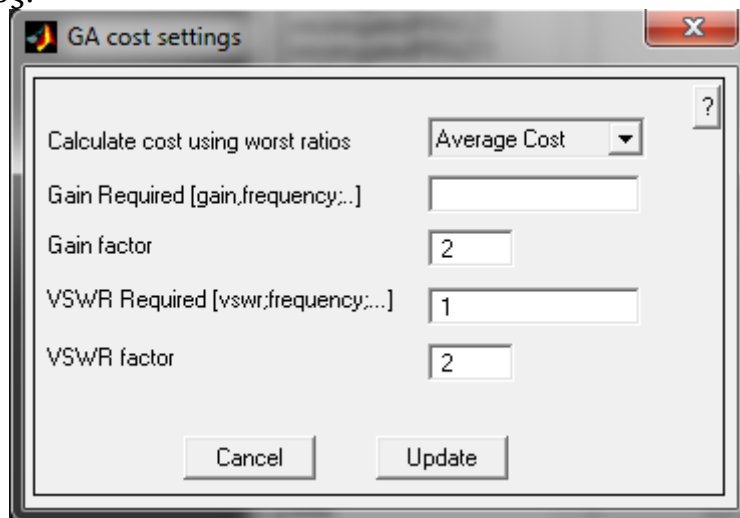
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται το ποσοστό μετάλλαξης για τα χρωμοσώματα. Οι αποδεκτές τιμές βρίσκονται και εδώ στο πεδίο τιμών  $[0,1]$ . Πιο συγκεκριμένα, αν ο χρήστης θέσει την τιμή 0, τότε

δεν θα συμβεί καμία μετάλλαξη σε κανένα χρωμόσωμα. Αν θέσει την τιμή 1, τότε θα γίνει μετάλλαξη σε όλα τα χρωμοσώματα.

- Cut Csomes(Chromosomes) at bit level:  
Αν το πεδίο αυτό είναι επιλεγμένο, αυτό σημαίνει ότι τα χρωμοσώματα θα διαμελιστούν στο επίπεδο των bits, ενώ αν δεν είναι, τότε τα χρωμοσώματα θα διαμελιστούν στο γονιδιακό επίπεδο, δηλαδή τα γονίδια κατά την διασταύρωση θα παραμένουν ανέπαφα και δεν θα τεμαχίζονται.
- Number of Generations:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται ο ακέραιος αριθμός των γενιών που θα δημιουργηθούν για να ολοκληρωθεί η διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου.
- Number of Chromosomes:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται ο ακέραιος αριθμός των χρωμοσωμάτων που θα αποτελούν τον πληθυσμό για κάθε γενιά.

#### 4.9.1.2 Καθορισμός των GA Cost settings

Το επόμενο βήμα μετά τον καθορισμό των βασικών ρυθμίσεων του γενετικού αλγορίθμου, είναι ο καθορισμός των ρυθμίσεων για την συνάρτηση κόστους. Αυτό γίνεται, επιλέγοντας στο GA Input GUI από το αναδυόμενο μενού Settings την επιλογή Cost settings. Το παράθυρο στο οποίο καθορίζονται οι ρυθμίσεις αυτές φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Σε αυτό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει τις δικές του ρυθμίσεις για τις παραμέτρους:



Σχήμα 4.7 - Το παράθυρο GA cost settings

- Calculate cost using worst ratios:  
Στο πεδίο αυτό ο χρήστης επιλέγει την συνάρτηση κόστους που θα χρησιμοποιηθεί για την απόδοση ενός κόστους σε κάθε χρωμόσωμα. Οι επιλογές που έχει ο χρήστης είναι οι εξής: Average Cost, Worst Cost, Multifreq costing, καθώς και οποιαδήποτε άλλη συνάρτηση έχει προσθέσει ο χρήστης στο

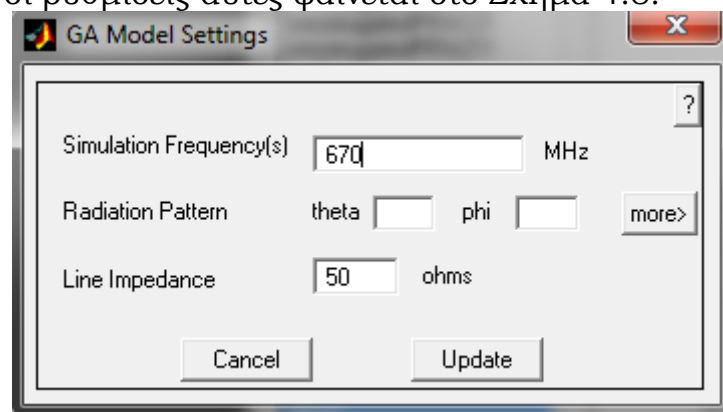
αρχείο cost4.m και έχει καταχωρήσει στο αρχείο gaconfig.ini. Οι τρεις προκαθορισμένες επιλογές έχουν ουσιαστικά να κάνουν με την περίπτωση βελτιστοποίησης σε παραπάνω από μία συχνότητες και τον τρόπο καθορισμού της τελικής τιμής του κόστους. Για τις τρεις αυτές επιλογές, η συνάρτηση κόστους για μια συγκεκριμένη συχνότητα είναι η εξής:

$$\frac{Fitness}{Cost} = \left( \frac{ActualGain}{Req. Gain} \right)^{gainFactor} + \left( \frac{Req. VSWR}{ActualVSWR} \right)^{vswrFactor}$$

- Gain Required:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται το απαιτούμενο κέρδος σε db για κάθε συχνότητα στην οποία θα γίνει βελτιστοποίηση.
- Gain factor:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται ο εκθέτης gFactor της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους.
- VSWR Required:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται ο απαιτούμενος λόγος στάσιμων κυμάτων στην γραμμή μεταφοράς ή VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). Για τέλεια προσαρμογή η τιμή του VSWR πρέπει να είναι ίση με 1, ενώ γενικά αποδεκτές είναι τιμές κάτω από 2.
- VSWR factor:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται ο εκθέτης vFactor της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους.

#### 4.9.1.3 Καθορισμός των GA Model Settings

Το τελευταίο βήμα πριν την εκκίνηση της διαδικασίας του γενετικού αλγόριθμου, είναι ο καθορισμός των ρυθμίσεων του μοντέλου. Αυτό γίνεται, επιλέγοντας στο GA Input GUI από το αναδυόμενο μενού Settings την επιλογή Model Settings. Το παράθυρο στο οποίο καθορίζονται οι ρυθμίσεις αυτές φαίνεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 - Το παράθυρο GA Model Settings

Στο παράθυρο αυτό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει τις δικές του ρυθμίσεις για τις εξής παραμέτρους:

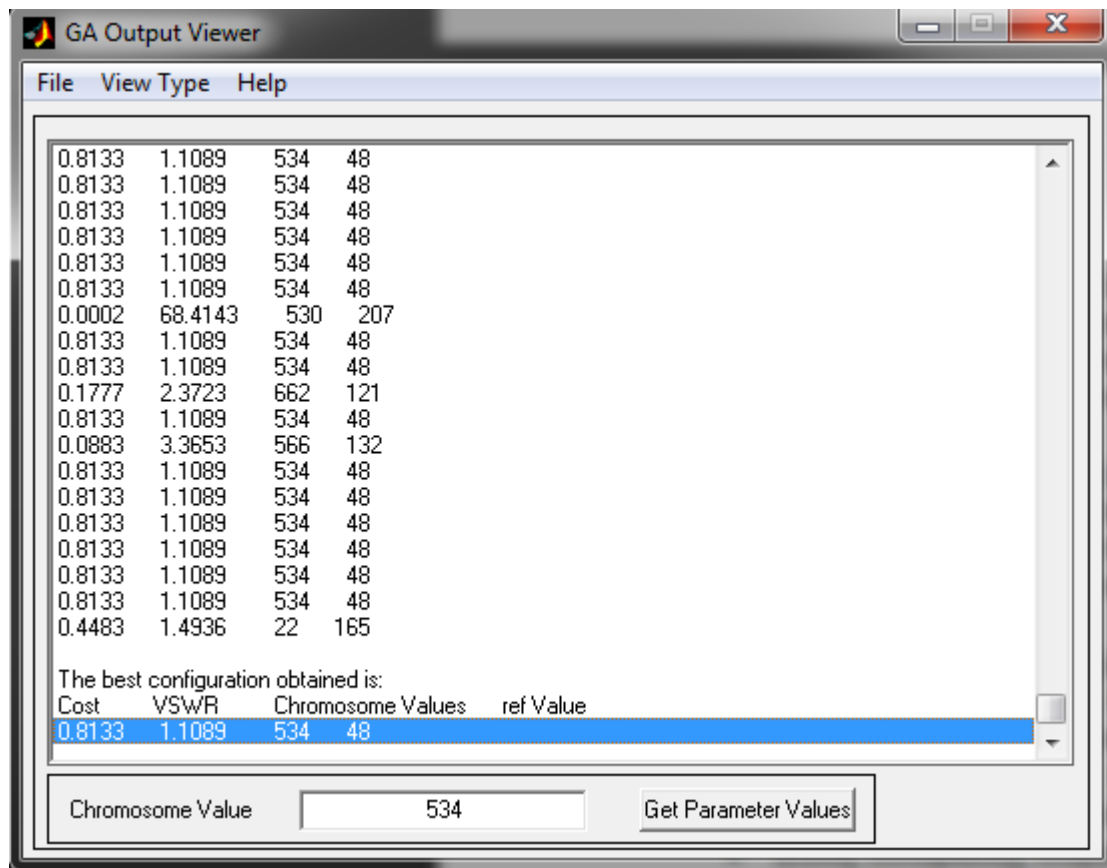
- Simulation Frequency:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζονται οι συχνότητες στις οποίες θα γίνει προσομοίωση.
- Radiation Pattern:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται μέσω ενός πίνακα 13 στοιχείων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, το σημείο του διαγράμματος ακτινοβολίας στο οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί. Για να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς περισσότερα του ενός σημεία ή ακόμα και ολόκληρο το διάγραμμα ακτινοβολίας, θα πρέπει να έχουν δημιουργηθεί από τον χρήστη οι κατάλληλες συναρτήσεις κόστους.
- Line Impedance:  
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται η τιμή της αντίστασης της γραμμής μεταφοράς. Συνήθως οι τιμές είναι τα 50Ω και τα 75Ω.

#### 4.9.2 Genetic Algorithm Output

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης, δημιουργούνται δύο αρχεία εξόδου (output files) με καταλήξεις \*.out και \*.cgv.mat. Το πρώτο αρχείο είναι ένα αρχείο κειμένου (text file), το οποίο μπορεί να διαβαστεί με ένα κοινό πρόγραμμα ανάγνωσης κειμένων, όπως το MS WordPad, και περιέχει μια λίστα με όλα τα χρωμοσώματα κάθε γενιάς μαζί με τα κόστος, το κέρδος, το VSWR και την δεκαδική αναπαράσταση της δυαδικής μορφής για κάθε χρωμόσωμα. Το δεύτερο αρχείο είναι ένα MATLAB αρχείο πίνακα και περιέχει τις ίδιες πληροφορίες με το πρώτο αρχείο, αλλά σε μορφοποίηση πίνακα. Αυτό το αρχείο χρησιμοποιεί το GA Output GUI για την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγόριθμου.

##### 4.9.2.1 GA Output GUI

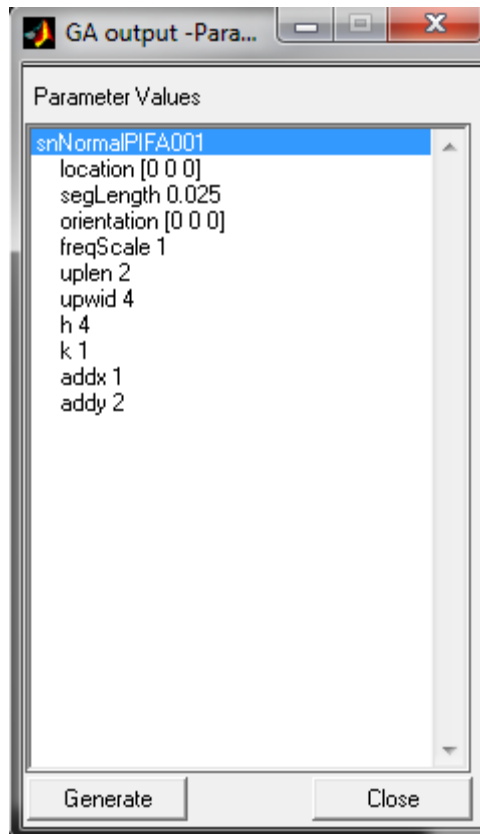
Με το GA Output GUI, το οποίο αποκαλείται GA Output Viewer, μπορεί ο χρήστης να δει τις πληροφορίες που υπάρχουν στο αρχείο \*.cgv.mat, δηλαδή όλα τα χρωμοσώματα που δημιουργήθηκαν από τον αλγόριθμο, καθώς και τις επιμέρους πληροφορίες για το καθένα απ' αυτά. Η μορφή του GA Output Viewer φαίνεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 - Η μορφή του GA Output Viewer

Εάν στον Output Viewer είναι ενεργοποιημένη η επιλογή View entire file, η οποία είναι η προκαθορισμένη επιλογή, τότε παρουσιάζονται όλα τα χρωμοσώματα αρχίζοντας από αυτά της πρώτης γενιάς και συνεχίζοντας προς τα κάτω μέχρι αυτά της τελευταίας γενιάς. Στο τέλος μάλιστα παρουσιάζεται το χρωμόσωμα με το μεγαλύτερο fitness απ' όλα τα υπόλοιπα. Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης ενός αριθμού χρωμοσωμάτων με το μεγαλύτερο fitness. Τον αριθμό αυτό μπορεί να τον ορίσει ο χρήστης.

Για να δει αναλυτικά ο χρήστης τις τιμές των παραμέτρων βελτιστοποίησης που αντιστοιχούν σε ένα χρωμόσωμα, το επιλέγει από την λίστα και στην συνέχεια πατάει το πλήκτρο Get Parameter Values που βρίσκεται κάτω δεξιά. Οι παράμετροι θα εμφανιστούν σε ένα παράθυρο που θα έχει την μορφή όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10. Σε αυτό, μπορεί ο χρήστης να πατήσει το πλήκτρο Generate κάτω αριστερά, ανοίγοντας ένα νέο παράθυρο του SuperNEC, στο οποίο θα έχει παραχθεί η δομή του χρωμοσώματος, με τις αντίστοιχες παραμέτρους του.



Σχήμα 4.10 - Το παράθυρο GA Output

# Κεφάλαιο 5

---

## SuperNEC

### 5.1 Εισαγωγή

Το πρόγραμμα SuperNEC (Super Numerical Electromagnetic Code) αποτελεί μια αντικειμενοστραφή έκδοση του προγράμματος NEC-2, το οποίο σχεδιάστηκε στα εργαστήρια Lawrence Livermore National Laboratory στις αρχές της δεκαετίας του '80 και το οποίο βασιζόταν στην γλώσσα Fortran. Το NEC-2 αποτελούσε ένα αρκετά αξιόπιστο εργαλείο προσομοίωσης, το οποίο βασιζόταν στην μέθοδο των ροπών για την επίλυση των εξισώσεων Maxwell, τεχνική στην οποία στηρίζεται και το σύγχρονο πρόγραμμα SuperNEC.

Το βασικό πλεονέκτημα στη χρησιμοποίηση της C++ έκδοσης του NEC-2, του SuperNEC δηλαδή, είναι η πολύ βελτιωμένη απόδοση όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσής της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός προβλήματος με 3285 τμήματα (segments) που οργανώθηκε σε έναν επεξεργαστή Power2 66 MHZ, η προσομοίωση διήρκησε 38 λεπτά χρησιμοποιώντας τον κώδικα C++ και 2,36 ώρες χρησιμοποιώντας τον κώδικα FORTRAN. Συνεπώς, για αυτό το πρόβλημα, ο κώδικας C++ ήταν 3,7 φορές γρηγορότερος από τον κώδικα FORTRAN. Το χάσμα απόδοσης μεταξύ C++ και του FORTRAN είναι ακόμα μεγαλύτερο σε πιο πολύπλοκα προβλήματα. Αυτή η βελτίωση της απόδοσης παρατηρείται μόνο για προβλήματα που δεν απαιτούν μια λύση εκτός πυρήνα (out of core).

Η έκδοση του SuperNEC που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η 2.4.

### 5.2 Ιστορική Διαδρομή

Το 1989 το πρόγραμμα FORTRAN, NEC-2, τροποποιήθηκε για να λειτουργήσει παράλληλα σε ένα δίκτυο transputers. Στην διάρκεια του προγράμματος αυτού, όλες οι απαιτητικές αριθμητικές ρουτίνες ξαναγράφηκαν για να λειτουργήσουν παράλληλα. Οι αποδοτικότητες που επιτεύχθηκαν για την συμπλήρωση και την παραγοντοποίηση του πίνακα αλληλεπίδρασης πλησίασαν το 90 τοις εκατό. Ακόμα υψηλότερες αποδοτικότητες επιτεύχθηκαν για το διάγραμμα ακτινοβολίας και τους υπολογισμούς κοντινού πεδίου. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η αποδοτικότητα όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσης του κώδικα ήταν πολύ ικανοποιητική, εντούτοις, η προσπάθεια που απαιτούταν για να αλλάξει ο κώδικας FORTRAN ήταν ιδιαίτερη. Αυτό δεν οφειλόταν απαραίτητα στη δομή του κώδικα, αλλά μάλλον στο πρότυπο πάνω στο οποίο γράφτηκε. Η υλοποίηση των περαιτέρω τροποποιήσεων στον κώδικα FORTRAN επομένως ήταν τόσο δύσκολη όσο η προσαρμογή του κώδικα για να τρέχει παράλληλα. Ένας τρόπος να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα ήταν να ξαναγραφτεί το πρόγραμμα NEC2 χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό πρότυπο προγραμματισμού. Το πρότυπο που επιλέχθηκε για την

υλοποίηση αυτή ήταν το αντικειμενοστραφές πρότυπο και η γλώσσα προγραμματισμού η C++.

### **5.3 Τα Προηγμένα Χαρακτηριστικά του SuperNEC**

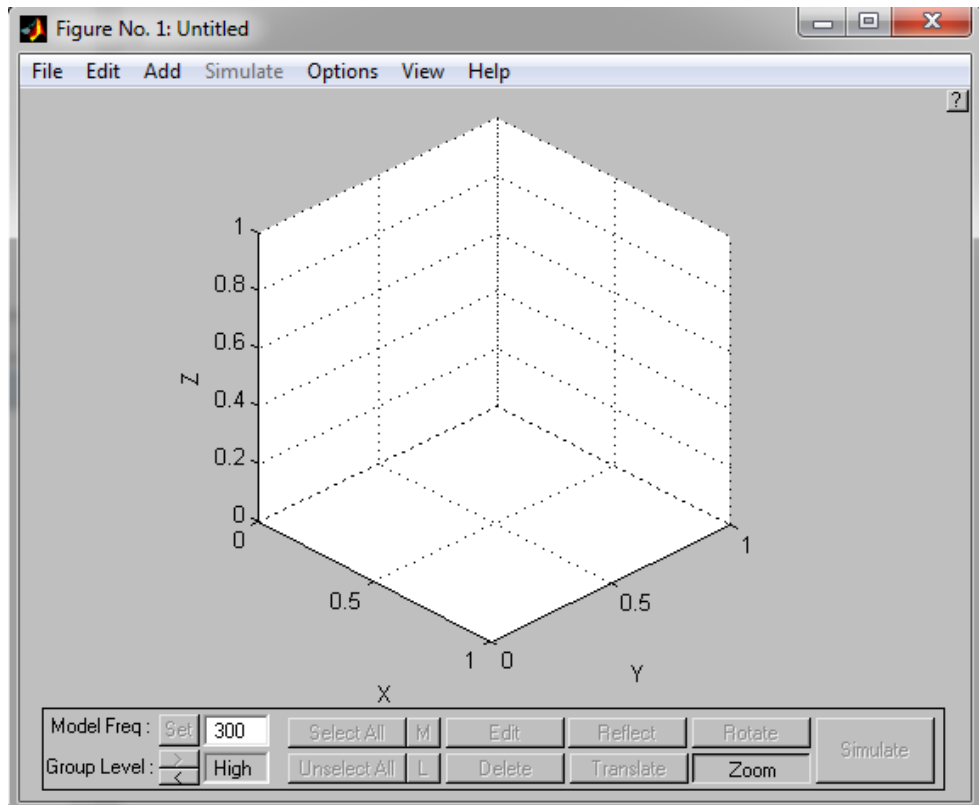
Τα χαρακτηριστικά που έχουν ενσωματωθεί σε πρωτότυπη μορφή στο πακέτο λογισμικού SuperNEC είναι τα ακόλουθα:

- Γρήγορες επαναληπτικές μέθοδοι επίλυσης (solvers) όπως CGS, BiCGS, SIM, Simple Sparse και πολλές άλλες.
- Εκτίμηση παραμέτρων βασισμένη σε προσαρμοστικό μοντέλο. Αυτή είναι μια δυνατότητα που επιτρέπει στο χρήστη να υπολογίσει την συνάρτηση μεταφοράς για οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική παράμετρο μέσα σε ένα καθορισμένο από τον χρήστη εύρος συχνοτήτων. Δεδομένης της συνάρτησης μεταφοράς, είναι δυνατό να ληφθεί μια συνεχής αναπαράσταση για την ηλεκτρομαγνητική παράμετρο μέσα σ' αυτό το εύρος συχνοτήτων.
- Παράλληλη εκτέλεση σε ένα δίκτυο ετερογενών επεξεργαστών. Αυτό το πρόγραμμα έχει εκτελεστεί στην διανεμημένης μνήμης μηχανή 22 επεξεργαστών IBM-SP2. Το πιο σύνθετο πρόβλημα προσομοίωσης που εκτελέστηκε ήταν ένα πρόβλημα 17035 τμημάτων (segments) με χρήση πλήρων τρισδιάστατα διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Ο χρόνος εκτέλεσης ήταν 5.3 ώρες.
- Η μέθοδος των ροπών (MoM – Method of Moments) υβριδοποιήθηκε με την ενιαία θεωρία περίθλασης (UTD – United Theory of Diffraction). Οι δομές UTD που έχουν υλοποιηθεί περιλαμβάνουν κυλίνδρους (cylinders) και πιάτα (plates).
- Χρήση μιας διεπαφής χρήστη βασισμένη σε MATLAB για την κατασκευή και την επεξεργασία των δομών, καθώς και την επισκόπηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.
- Ενσωμάτωση λογισμικού γενετικών αλγορίθμων για την βελτιστοποίηση της σχεδίασης των κεραιών.

### **5.4 Input User Interface**

Το SuperNEC input user interface (διεπαφή εισόδου χρήστη) φαίνεται στο σχήμα 5.1.





Σχήμα 5.1- Το SuperNEC input user interface

Η δομή που επιθυμεί ο χρήστης να προσομοιώσει κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας αρχέγονες δομές (primitives) και συνδυαστικές δομές (assemblies). Τα primitives είναι οι βασικές δομικές μονάδες όλων των δομών στο SuperNEC, ενώ τα assemblies είναι υψηλού επιπέδου συνδυασμοί από primitives. Τα assemblies προσφέρουν μια γρήγορη και κατάλληλη μέθοδο για τον καθορισμό των τμημάτων μιας δομής. Τα primitives που υποστηρίζονται στην έκδοση 2.4 του SuperNEC περιλαμβάνουν:

1. Segments (τμήματα): μικρά κομμάτια σύρματος που μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους άκρη με άκρη για να δημιουργήσουν τις δομές και τις επιφάνειες.

2. UTD Plates (πιάτα): πολύπλευρα πιάτα καλυμμένα με διηλεκτρικό υλικό. Αυτά τα πιάτα αντιμετωπίζονται σε μια προσομοίωση χρησιμοποιώντας την ομοιόμορφη θεωρία της περίθλασης. Η θεωρία αυτή, είναι μια τεχνική υψηλής συχνότητας για την ηλεκτρομαγνητική απόκριση των δομών. Ισχύει μόνο όταν οι διαστάσεις του πιάτου είναι μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της προσομοίωσης.

3. UTD Cylinders (κύλινδροι): ελλειπτικοί κύλινδροι, των οποίων οι άκρες μπορούν να κοπούν έτσι ώστε να διαμορφωθεί μια αυθαίρετη γωνία σε σχέση με το επίπεδο x-z. Οι κύλινδροι αναλύονται και αυτοί χρησιμοποιώντας την ομοιόμορφη θεωρία της περίθλασης και ως εκ τούτου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλοι σε σχέση με το μήκος κύματος της προσομοίωσης.

4. Loads (φορτία): Υπάρχουν πέντε τύποι φορτίων συγκεντρωμένων στοιχείων (lumped element loads) καθώς και ένα διηλεκτρικό περίβλημα (dielectric sheath) που μπορούν να συνδεθούν με τα τμήματα σύρματος.

Τα φορτία δεν μπορούν να συνδεθούν με τα UTD primitives. Τέσσερα από τα έξι φορτία είναι συνδυασμοί δικτύων RLC. Το πέμπτο φορτίο είναι μια συγκεντρωμένη σύνθετη αντίσταση, η οποία είναι ανεξάρτητη της συχνότητας και καθορίζεται από την ωμική αντίσταση (resistance) και την άεργη αντίστασή (reactance) του. Το έκτο φορτίο είναι ένα διηλεκτρικό περιβλήμα καλωδίων που καθορίζεται από την αγωγιμότητα (conductivity), την σχετική επιτρεπτότητα (permittivity) και το πάχος του σε μέτρα.

5. Sources (πηγές): Υπάρχουν δύο τύποι πηγών τάσης που μπορούν να συνδεθούν με τα τμήματα σύρματος (και όχι με τα UTD primitives). Αυτές οι πηγές τάσης είναι η AFVS (Applied Field Voltage Source) και η CSDVS (Current Slope Discontinuity Voltage Source).

6. Transmission lines (γραμμές μεταφοράς): Απλά τμήματα σύρματος (segments) διαμορφώνουν τις γραμμές μεταφοράς.

7. Two-port networks (δίθυρα δίκτυα): Τα δίκτυα αυτά είναι παρόμοια με τις γραμμές μεταφοράς, με την διαφορά ότι αυτά καθορίζονται από τις γ-παραμέτρους τους.

Πέρα από τα primitives, υπάρχει και ένας μεγάλος αριθμός από assemblies που είναι ενσωματωμένα στο πακέτο του SuperNEC. Ο κατάλογος των υποστηριζόμενων assemblies αυξάνεται συνεχώς και είναι αδύνατο να παρατεθεί ο πλήρης κατάλογος όλων των διαθέσιμων assemblies. Ενδεικτικά κάποια από τα υποστηριζόμενα assemblies είναι τα εξής:

1. Box (κουτί): Πρόκειται για ένα κλειστό ορθογώνιο κουτί που κατασκευάζεται με την χρήση τμημάτων σύρματος.

2. Cylinder (κύλινδρος): Πρόκειται για έναν κύλινδρο που διαμορφώνεται από τμήματα σύρματος. Αυτός ο κύλινδρος δεν έχει τους περιορισμούς που επιβάλλονται στον κύλινδρο UTD, δεδομένου ότι δεν είναι απαραίτητο να είναι μεγάλος σε σχέση με το μήκος κύματος προσομοίωσης.

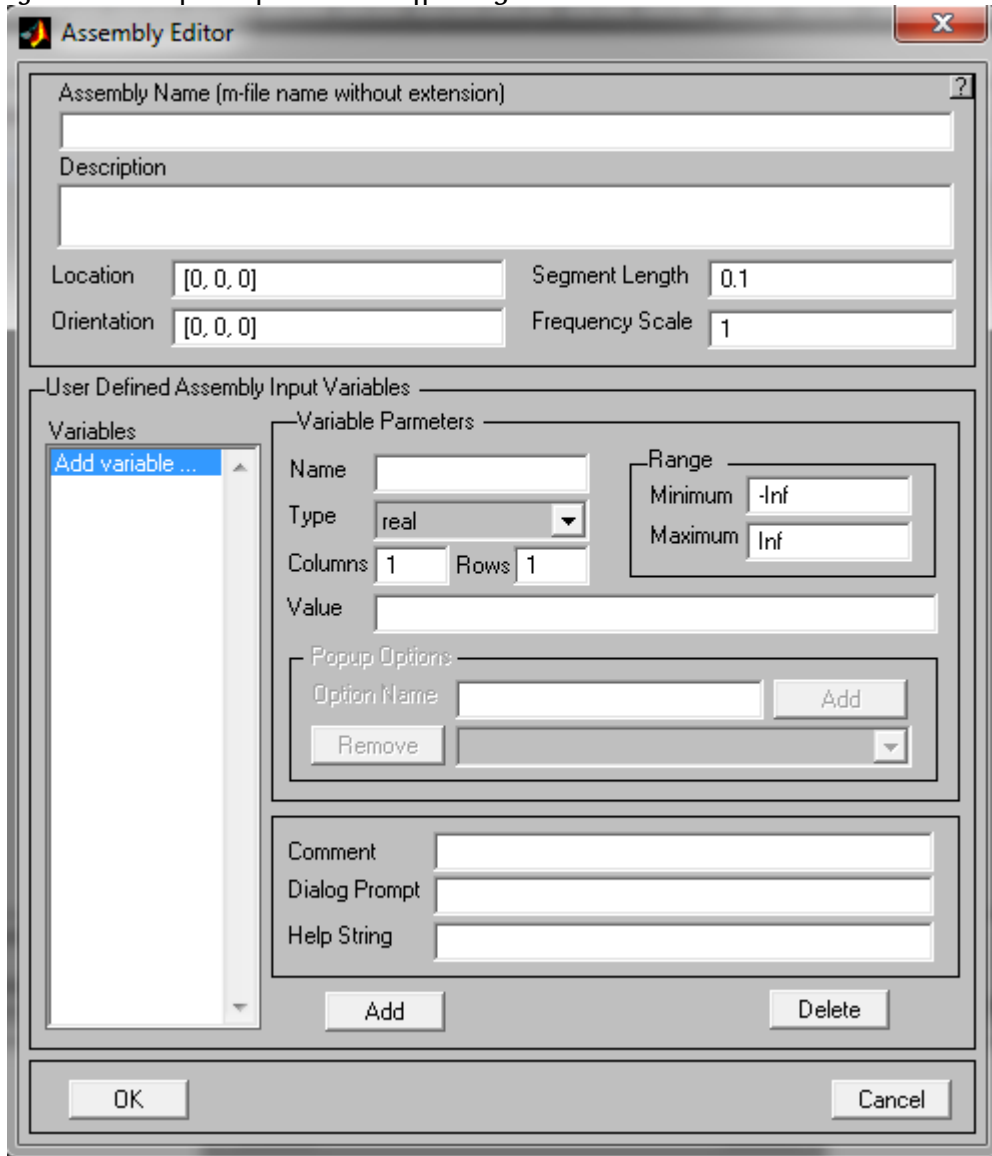
3. Helix (Ελικας): Πρόκειται για μια ελικοειδή δομή κατασκευασμένη από τμήματα σύρματος και διεγερμένη από μία πηγή AFVS.

4. LPDA (λογαριθμικές περιοδικές διπολικές κεραίες): Πρόκειται για μια λογαριθμική περιοδική σειρά διπόλων συμπληρωμένη με διασταυρωμένες γραμμές μεταφοράς και μία διέγερση.

Μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στα primitives και τα assemblies, είναι ότι τα assemblies είναι δομές εξαρτημένες από την συχνότητα προσομοίωσης. Επομένως, το μοντέλο ενός 1m x 1m x 1m κουτιού που δημιουργείται στα 100 MHz θα δείχνει πολύ διαφορετικό σε σχέση με ένα που δημιουργείται στα 300 MHz. Το δεύτερο μοντέλο θα έχει πολλά περισσότερα τμήματα σύρματος. Η διεπαφή επιτρέπει στον χρήστη να καθορίσει αρχικά μια δομή χρησιμοποιώντας assemblies σε μια συχνότητα και έπειτα να αλλάξει την συχνότητα του μοντέλου, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα μοντέλο της ίδιας δομής, αλλά προσαρμοσμένο για μια διαφορετική συχνότητα.

## 5.5 Συγγραφή Νέων Δομών (Assemblies) Από Τον Χρήστη

Κατά τη δημιουργία ενός assembly υπάρχουν δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο, είναι ο ορισμός των μεταβλητών που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του και το δεύτερο είναι η συγγραφή του κώδικα που παράγει τη δομή σε γλώσσα MATLAB. Για τον καθορισμό των μεταβλητών της, ο χρήστης επιλέγει File > New > Assembly και εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 5.2:



Σχήμα 5.2- Το παράθυρο του Assembly Editor

Στο παράθυρο αυτό, ο χρήστης συμπληρώνει κατάλληλα τα ζητούμενα πεδία, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη συμφωνία του ονόματος του αρχείου \*.m και αυτού που καταγράφεται στο πεδίο Assembly Name.

Στο κάτω μισό του παραθύρου γίνεται ο ορισμός των μεταβλητών που απαιτούνται για την κατασκευή της δομής. Για κάθε μία μεταβλητή πρέπει να καθορισθεί μία σειρά από παραμέτρους. Μεταξύ αυτών των παραμέτρων είναι και οι εξής:

- Όνομα.

- Τύπος: Υπάρχει δυνατότητα επιλογής ενός από τους 6 τύπους: real, integer, complex, Boolean, string, list.
- Στήλες και Γραμμές: Σε περίπτωση που η συγκεκριμένη μεταβλητή έχει τη μορφή πίνακα, καθορίζεται ο αριθμός των στηλών και των γραμμών για τον πίνακα αυτό.
- Προκαθορισμένη (default) τιμή.
- Μέγιστη και ελάχιστη τιμή.
- 

Στο δεύτερο στάδιο, ο χρήστης επιλέγει Edit > Assembly > Code και ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου, στο οποίο επιλέγεται το κατάλληλο αρχείο που αντιστοιχεί στο όνομα του νέου assembly. Στην συνέχεια, ο χρήστης συμπληρώνει κατάλληλα τον κώδικα, που έπεται του computer generated τμήματος, ανάλογα με την εφαρμογή.

## 5.6 Ρυθμίσεις Προσομοίωσης

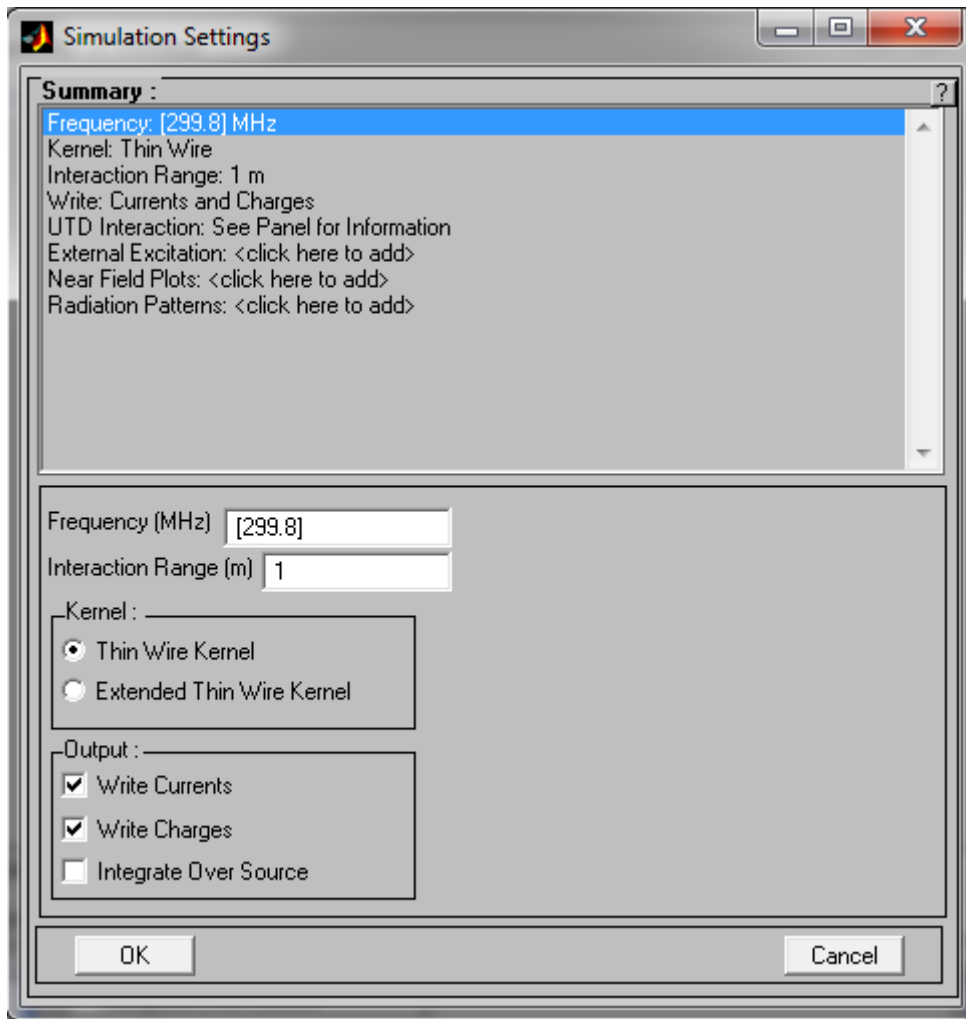
Μετά την ολοκλήρωση του καθορισμού της δομής, πρέπει να καθοριστούν και ορισμένες ρυθμίσεις για την προσομοίωση της δομής αυτής. Οι ρυθμίσεις περιλαμβάνουν:

- Καθορισμό του εύρους συχνοτήτων της προσομοίωσης.
- Ρύθμιση ορισμένων βασικών παραμέτρων του προγράμματος.
- Καθορισμό της επιθυμητής εξόδου.

Χρησιμοποιώντας την επιλογή Edit -> Simulation Settings στο SuperNEC input user interface ανοίγει το παράθυρο που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ρυθμίσεων αυτών. Το παράθυρο αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.3.

Το SuperNEC παρέχει αρκετές δυνατότητες όσον αφορά το είδος των στοιχείων εξόδου από την προσομοίωση. Έτσι, ο χρήστης έχει να επιλέξει ή να συνδυάσει τις εξής επιλογές:

- Μακρινό πεδίο με διάγραμμα ακτινοβολίας τριών διαστάσεων (3D) με διάφορους τρόπους απεικόνισης των λοβών ακτινοβολίας για την καλύτερη κατανόηση.
- Μακρινό πεδίο με διάγραμμα ακτινοβολίας δύο διαστάσεων (2D) επιλέγοντας επίπεδες τομές στα επίπεδα x-y, x-z, y-z, οπότε εμφανίζεται η μεταβολή του πεδίου συναρτήσει είτε της γωνίας αζιμούθιου (azimuth,  $\phi$ ) είτε της γωνίας ανύψωσης (elevation,  $\theta$ ).
- Κοντινό πεδίο όπου ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τόσο την πυκνότητα και τη θέση των σημείων στο τρισδιάστατο διάγραμμα, όσο και το είδος του πεδίου (ηλεκτρικό ή μαγνητικό) και το σύστημα συντεταγμένων (ορθογώνιο ή κυλινδρικό).
- Μεταβολή κάποιας παραμέτρου σε συνάρτηση με τη συχνότητα.
- Μέση ακτινοβολούμενη ισχύς της διάταξης, ισχύς απωλειών, αποδοτικότητα.
- Ρευματική κατανομή και κατανομή φορτίων σε οποιοδήποτε σημείο της διάταξης.



Σχήμα 5.3- Το παράθυρο Simulation Settings

Η επιλογή του μακρινού πεδίου, ή αλλιώς των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, ως εξόδου της προσομοίωσης παρέχει μια σειρά από δυνατότητες. Καταρχάς, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της ακτινικής απόστασης (radial distance), η οποία καθορίζει την απόσταση (σε μέτρα) του εκάστοτε θεωρούμενου σημείου του πεδίου ακτινοβολίας από την πηγή. Αν αυτή η τιμή επιλεγεί 0, αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο αγνοεί τον παράγοντα  $\frac{e^{-jkR}}{R}$ . Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του είδους της πόλωσης μέσω του polarization drop-down menu, που χρησιμεύει στο να δείχνει το πώς το ακτινοβολούμενο πεδίο διασπάται σε δύο ορθογώνιες συνιστώσες. Η πρώτη επιλογή είναι η major/minor, δηλαδή η υπόθεση ελλειπτικής πόλωσης (σε περίπτωση γραμμικής πόλωσης η συνιστώσα major θα είναι μεγάλη και η minor ανύπαρκτη, ενώ στην περίπτωση κυκλικής πόλωσης οι δύο συνιστώσες θα είναι μεταξύ τους ίσες). Η δεύτερη επιλογή είναι η horizontal/vertical, με την πρώτη να αντιστοιχεί στη  $\theta$  συνιστώσα του πεδίου, ενώ την επόμενη στην  $\phi$  συνιστώσα. Μία ακόμα δυνατότητα που παρέχεται στον χρήστη είναι η επιλογή μέσω του μενού gain drop-down menu μεταξύ κατευθυντικότητας (directivity) ή κέρδους ισχύος (power gain). Στο κέρδος ισχύος συμπεριλαμβάνεται η αποδοτικότητα

(efficiency) της κεραίας. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της μέσης ακτινοβολούμενης ισχύος (compute average radiated power) σε όλη την περιοχή του διάγραμμα ακτινοβολίας. Είναι προφανές ότι για ένα 3D διάγραμμα το μέσο κέρδος μιας κεραίας χωρίς απώλειες θα πρέπει να είναι 0db.

Για την ορθή διεξαγωγή της προσομοίωσης ο χρήστης καλείται να ορίσει και κάποιες παραμέτρους όσον αφορά τη μορφή της διάταξης, την διέγερσή της και την επιθυμητή έξοδο. Οι βασικότερες από τις παραμέτρους είναι οι ακόλουθες :

- Μέγιστη ακτίνα αλληλεπίδρασης των συρμάτινων τμημάτων πέρα από την οποία δεν έχουν ισχύ οι υπολογισμοί (interaction range). Σε περίπτωση προσομοίωσης μεγάλων διατάξεων, ο χρήστης πρέπει να προσέξει ιδιαίτερα αυτήν την επιλογή σε συνδυασμό με την αμέσως επόμενη.
- Είδος επίδρασης πυρήνα (kernel approximation).
- Εύρος συχνοτήτων για τις οποίες θα προσομοιωθεί η διάταξη (simulation frequency) με επιπλέον επιλογή και του βήματος από τον χρήστη.
- UTD - Interactions, όπου μπορεί ο χρήστης να καθορίσει το είδος των αλληλεπιδράσεων της πηγής με το έδαφος ή με μια επιφάνεια. Για παράδειγμα μπορεί να καθοριστεί το αν θα ληφθούν ή όχι υπόψη οι ανακλάσεις και οι διαθλάσεις (απλές, διπλές ή τριπλές).
- Εξωτερική διέγερση, όπου ο χρήστης καλείται να επιλέξει μεταξύ του επίπεδου κύματος και του δίπολου Hertz.

## 5.7 Έλεγχος της Δομής

Το SuperNEC έχει μια ενσωματωμένη δυνατότητα έλεγχου, για την επικύρωση της ισχύος των δομών MoM. Το SuperNEC επιβάλλει περιορισμούς στη γεωμετρία των συρμάτων (wires) , που περιορίζουν το μήκος των τμημάτων (segments) σε σχέση με το μήκος κύματος, την ακτίνα των τμημάτων που ενώνονται, τον λόγο του μήκους προς την ακτίνα του κάθε τμήματος και ούτω καθεξής. Είναι σημαντικό να ακολουθηθούν αυτές οι οδηγίες, δεδομένου ότι ακόμα και μικρά λάθη σε ένα μοντέλο μπορούν να οδηγήσουν σε έναν ανακριβή υπολογισμό της κατανομή του ρεύματος. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας και τα ανακλώμενα πεδία για ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να αποδειχτούν πολύ παραπλανητικά. Οι οδηγίες που εφαρμόζονται στο SuperNEC διατυπώθηκαν σε μια εργασία των Trueman και Kubina.

Ο Trueman και ο Kubina συγκέντρωσαν και κατηγοριοποίησαν τις οδηγίες αυτές σε τρεις ομάδες. Οι ομάδες αυτές είναι οι εξής: μεμονωμένα τμήματα (individual segments), συνδέσεις τμημάτων (segment junctions) και αποστάσεις τμημάτων (segment spacing). Οι οδηγίες που συνδέονται με κάθε ομάδα συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 5.1 Προειδοποιήσεις και σφάλματα στο SuperNEC για μεμονωμένα τμήματα

Μεμονωμένα τμήματα	Προειδοποίηση	Σφάλμα
Μήκος τμήματος (Segment length)	$\frac{\lambda}{10} < \Delta < \frac{\lambda}{5}$	$\Delta > \frac{\lambda}{5}$
Ακτίνα (Radius)	$30 < \frac{\lambda}{a} < 100$	$\frac{\lambda}{a} < 30$
Λόγος μήκους προς ακτίνα (Segment length to radius ratio)	$0.5 < \frac{\Delta}{a} < 2$	$\frac{\Delta}{a} < 0.5$

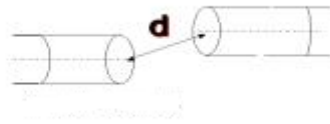
Πίνακας 5.2 Προειδοποιήσεις και σφάλματα στο SuperNEC για ενώσεις τμημάτων

Ενώσεις τμημάτων	Προειδοποίηση	Σφάλμα
Λόγος μήκους προς ακτίνα (Segment length to radius ratio)	$2 < \frac{\Delta}{a} < 6$	$\frac{\Delta}{a} < 2$

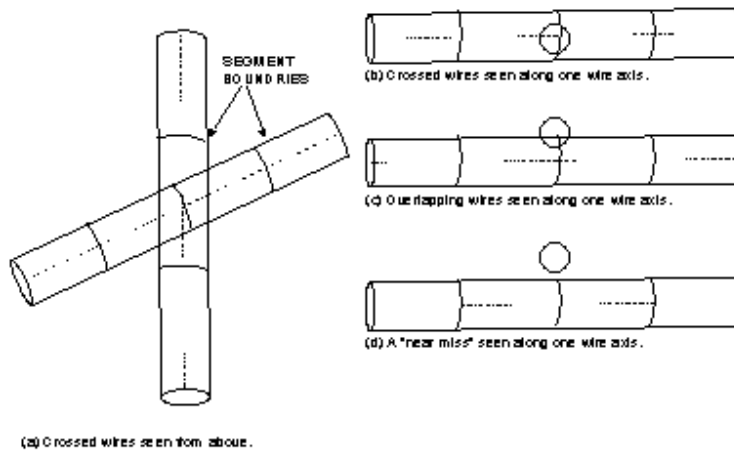
Πίνακας 5.3 Προειδοποιήσεις και σφάλματα στο SuperNEC για αποστάσεις τμημάτων

Αποστάσεις τμημάτων	Προειδοποίηση	Σφάλμα
Διασταυρούμενα τμήματα (Crossed wires)		Οι άξονες των τμημάτων διασταυρώνονται
Πολύ κοντινά τμήματα (Overlapping wires)		Οι άξονες των τμημάτων περνούν πιο κοντά από το άθροισμα των ακτινών τους
Κοντινά τμήματα (Near miss)	Οι άξονες των τμημάτων περνούν πιο κοντά από το 1.5 επί το άθροισμα των ακτινών τους	
Προσέγγιση τμημάτων (Segment proximity)	Τα άκρα των τμημάτων περνούν πιο κοντά από το 1.5 επί το άθροισμα των ακτινών τους	Τα άκρα των τμημάτων περνούν πιο κοντά από το άθροισμα των ακτινών τους

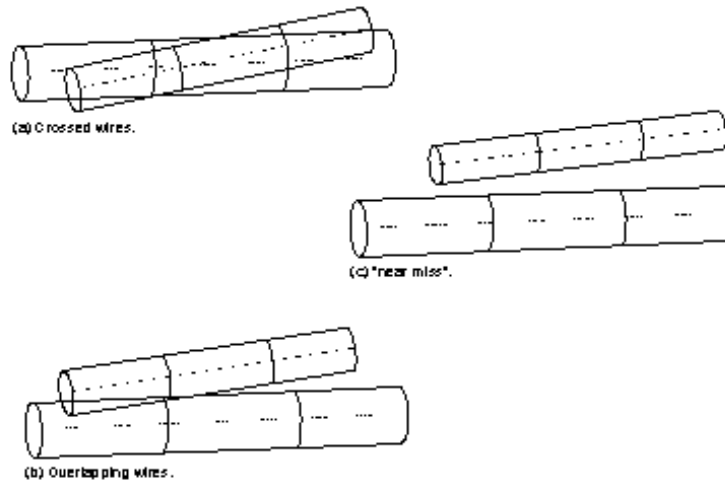
Οι 4 περιπτώσεις προειδοποιήσεων και σφαλμάτων της κατηγορίας των αποστάσεων των τμημάτων φαίνονται στα σχήματα 5.4, 5.5 και 5.6.



Σχήμα 5.4 - Απόσταση τμημάτων



Σχήμα 5.5 - Σφάλματα στις αποστάσεις τμημάτων



Σχήμα 5.6 - Προειδοποιήσεις και σφάλματα στις αποστάσεις τμημάτων

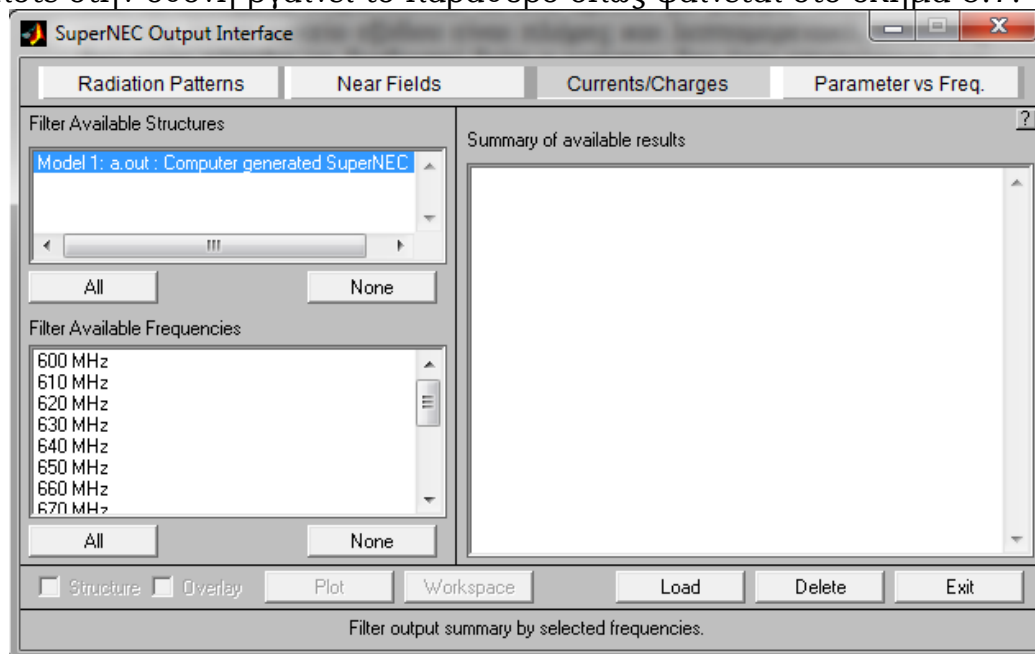
### 5.8 Output User Interface

Αφού οριστεί η δομή και οι παράμετροι προσομοίωσης που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το πρόγραμμα SuperNEC μετά από εντολή του χρήστη εκτελεί την προσομοίωση η οποία φαίνεται σε περιβάλλον DOS. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να απεικονιστούν με διάφορες μορφές ανάλογα με το μέγεθος το οποίο ζητήθηκε να υπολογιστεί και τον τρόπο που επιθυμεί ο χρήστης. Αρχικά



όλα τα δεδομένα παρατίθενται σε ένα αρχείο με μορφή \*.out. Παρά το γεγονός ότι το αρχείο εξόδου είναι πλήρες και λεπτομερειακό, εντούτοις δεν είναι εύκολο να διαβαστεί διότι ο χρήστης δεν έχει επισκόπηση των αποτελεσμάτων σε γραφικό περιβάλλον.

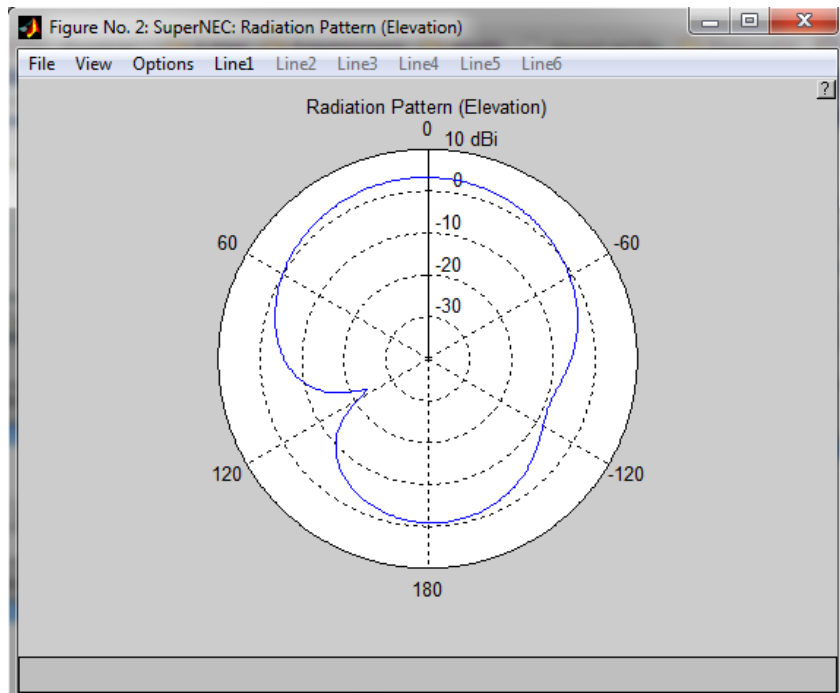
Η δυνατότητα αυτή δίνεται με την επιλογή Simulate -> View Output, οπότε στην οθόνη βγαίνει το παράθυρο όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 - Το SuperNEC Output Interface

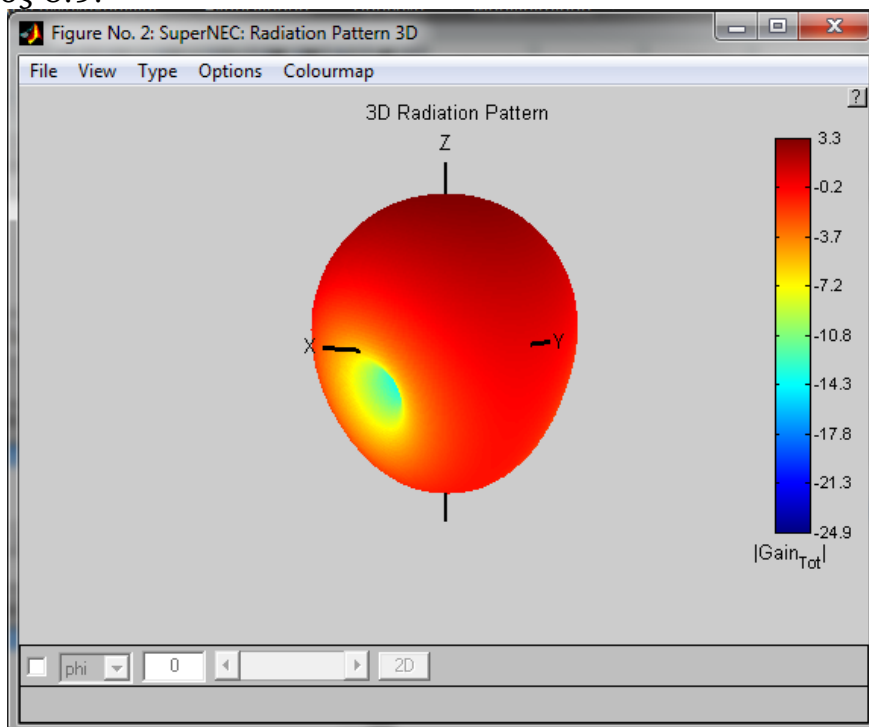
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.7, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ταυτόχρονα παραπάνω από μία δομές και παραπάνω από μία συχνότητες. Η υπέρθεση δύο ή περισσότερων διαγραμμάτων στο ίδιο παράθυρο μπορεί να γίνει με την επιλογή Overlay, ενώ η παράθεση της διάταξης στο διάγραμμα γίνεται με την επιλογή Structure έτσι ώστε να βλέπει ο χρήστης τον προσανατολισμό των λοβών ακτινοβολίας σε σχέση με αυτήν. Οι βασικές δυνατότητες απεικόνισης του SuperNEC είναι οι εξής :

Radiation Patterns: Πρόκειται για διαγράμματα ακτινοβολίας, τα οποία πρέπει να έχουν ζητηθεί πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης και κατά την ρύθμιση των παραμέτρων της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, αν έχει επιλεγεί 2D διάγραμμα που να απεικονίζει την μεταβολή στο αζιμούθιο για  $\theta = 90^0$ , η έξοδος θα δώσει ένα διάγραμμα σαν κι αυτό του σχήματος 5.8.



Σχήμα 5.8 - Ένα 2D διάγραμμα ακτινοβολίας

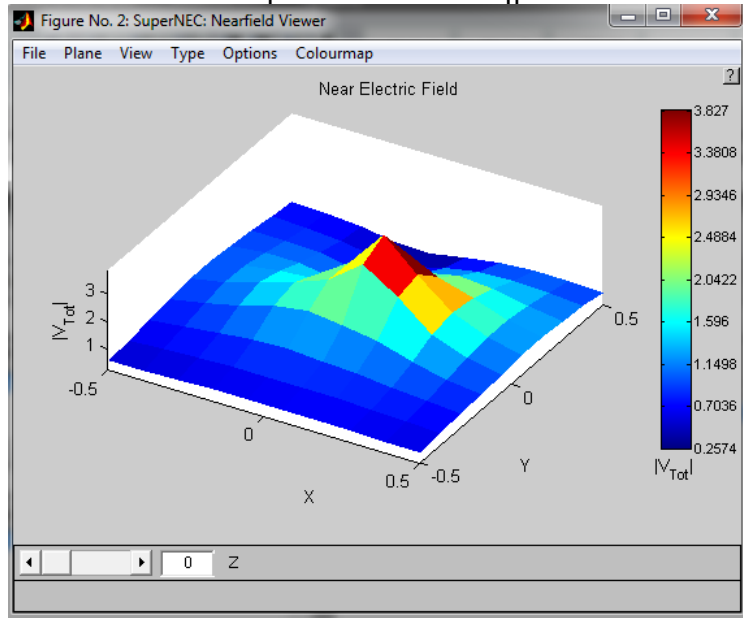
Αν ο χρήστης είχε επιλέξει ένα τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας γύρω από την κεραία που προσομοιώθηκε, η αντίστοιχη απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε γραφικό περιβάλλον θα έμοιαζε με αυτήν του σχήματος 5.9.



Σχήμα 5.9- Ένα 3D διάγραμμα ακτινοβολίας

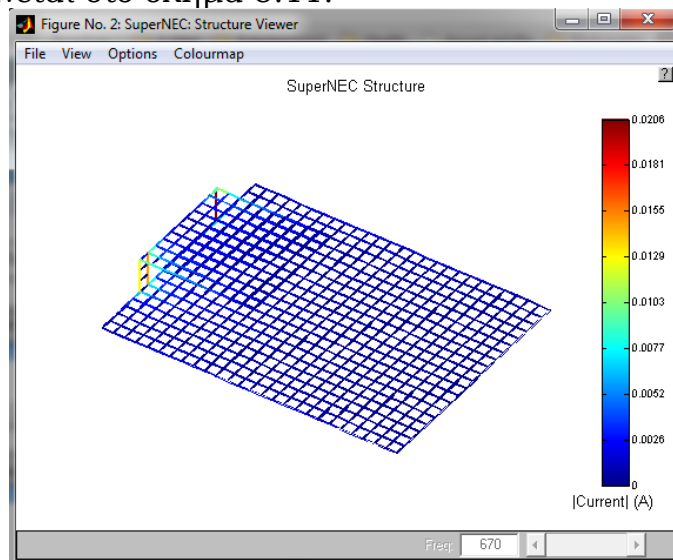
Near Fields: Ο Near-Field Viewer απεικονίζει τα τρισδιάστατα κοντινά ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία στις σφαιρικές και ορθογώνιες συντεταγμένες. Έχει την δυνατότητα να διαχειριστεί πολλαπλά επίπεδα δεδομένων (π.χ. πολλές τιμές για τα x, y και z, ή για τα R, f και q),

καθώς επίσης και πολλαπλές συχνότητες. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει όχι μόνο τον τύπο της σχεδίασης (μεταξύ των επιλογών: wireframe, mesh, surface, 3D contour, contour και pcolor), αλλά και το μέγεθος που θα σχεδιαστεί, με επιπλέον δυνατότητα επιλογής είτε του πλάτους είτε της φάση του μεγέθους αυτού. Ένα τυπικό παράδειγμα απεικόνισης μέσω του Near-Field Viewer φαίνεται στο σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10- Παράδειγμα απεικόνισης στο Near-Field Viewer

Currents/Charges: Πρόκειται για την απεικόνιση, με κατάλληλες χρωματικές διαβαθμίσεις, της ρευματικής κατανομής και της κατανομής των φορτίων επάνω στην διάταξη της προσομοίωσης. Ένα τυπικό παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11 - Παράδειγμα απεικόνισης στο Structure Viewer

Parameter vs. Frequency: Πρόκειται για τη απεικόνιση της αποδοτικότητας, του κέρδους ή της αντίστασης εισόδου, πάντα σε συνάρτηση με την συχνότητα.



# Κεφάλαιο 6

## Βελτιστοποίηση κεραίας PIFA με χρήση γενετικών αλγορίθμων και επίδραση των σχισμών σε αυτή

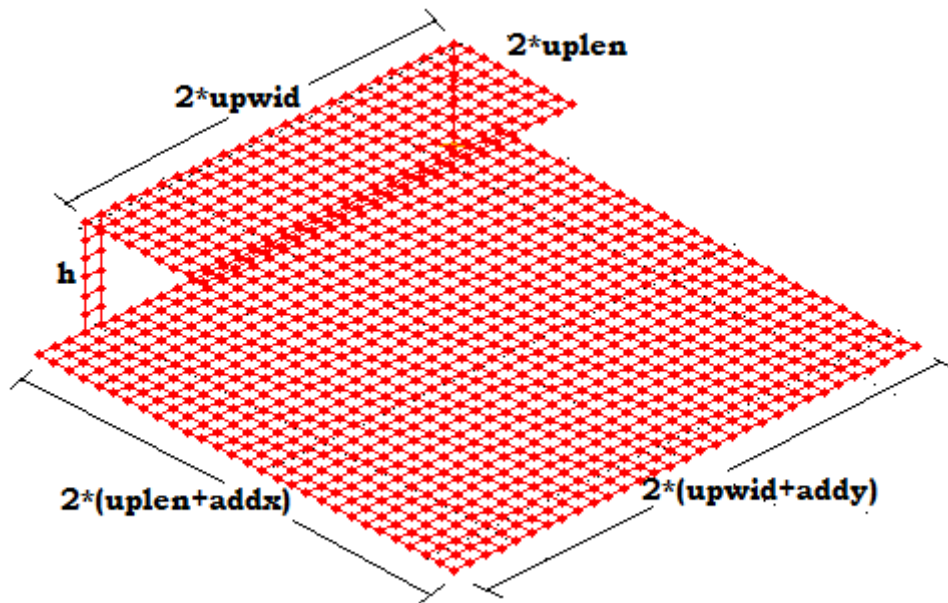
### 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η διαδικασία σχεδίασης της κεραίας PIFA στο πρόγραμμα SuperNEC, η βελτιστοποίησή της για την ζώνη συχνοτήτων του προτύπου DVB-T (470-562 MHz) με χρήση του ενσωματωμένου στο SuperNEC λογισμικού γενετικών αλγορίθμων GA Optimizer, και τέλος θα παρουσιαστούν τα καλύτερα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με βάση ορισμένα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά είναι ο λόγος στάσιμων κυμάτων (VSWR) στη συχνότητα λειτουργίας της διάταξης αλλά και το εύρος ζώνης.

### 6.2 Υλοποίηση PIFA στο SuperNEC

Η υλοποίηση της κεραίας γίνεται με μικρά ευθύγραμμα τμήματα (segments), το μήκος των οποίων είναι συνάρτηση του μήκους κύματος στη συχνότητα που γίνεται η προσομοίωση. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια το ηλεκτρικό μήκος της κεραίας να παραμένει σταθερό με τη μεταβολή του υπό λειτουργία μήκους κύματος. Με τη λογική αυτή επιτυγχάνεται συμβατότητα στο χειρισμό της PIFA με το SuperNEC.

Σε κάθε διαφορετική προσομοίωση, λοιπόν, επιλέγεται ένα εύρος τιμών για τον αριθμό των ευθύγραμμων τμημάτων που θα χρησιμοποιηθούν κατά μήκος και κατά πλάτος για την υλοποίηση της κεραίας, και ορίζονται έτσι οι διαστάσεις της. Στη διάταξη που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία οι μεταβλητές που λάμβαναν διάφορες τιμές ήταν το μήκος (urlen) και το πλάτος (urwid) της άνω πλάκας, το επιπρόσθετο μήκος (addx) και το επιπρόσθετο πλάτος (addy) της κάτω πλάκας (επίπεδο γείωσης) καθώς επίσης και το ύψος του άνω επιπέδου σχετικά με το κάτω. Το πλάτος του αγωγού βραχυκύκλωσης θεωρήθηκε σταθερό κάθε φορά και ίσο με 1 τμήμα (segment). Ορίζοντας το εύρος των μεταβλητών, τίθεται και μια συνθήκη ως προς την οποία βελτιστοποιείται η διάταξη και πιο συγκεκριμένα, η συνθήκη αυτή ήταν για λόγο στάσιμων κυμάτων (VSWR) ίσο με 1 στη συχνότητα που επιλέγουμε. Έχοντας ως στόχο να αναπτυχθεί μια κεραία που θα καλύπτει όλη τη ζώνη συχνοτήτων του προτύπου DVB-T (470 – 862 MHz) επιλέγεται ως συχνότητα βελτιστοποίησης τα 670 MHz (κεντρική συχνότητα του επιθυμητού εύρους ζώνης). Στο τέλος επιστρέφεται ως αποτέλεσμα η τιμή της κάθε μεταβλητής για την οποία επιτυγχάνεται, όσο το δυνατόν καλύτερα, η συνθήκη που έχει δοθεί. Η υλοποίηση της κεραίας καθώς επίσης και οι διαστάσεις της ανάλογα με την τιμή των μεταβλητών που προκύπτουν από τον εκάστοτε γενετικό αλγόριθμο φαίνεται στο σχήμα 6.1 που ακολουθεί.



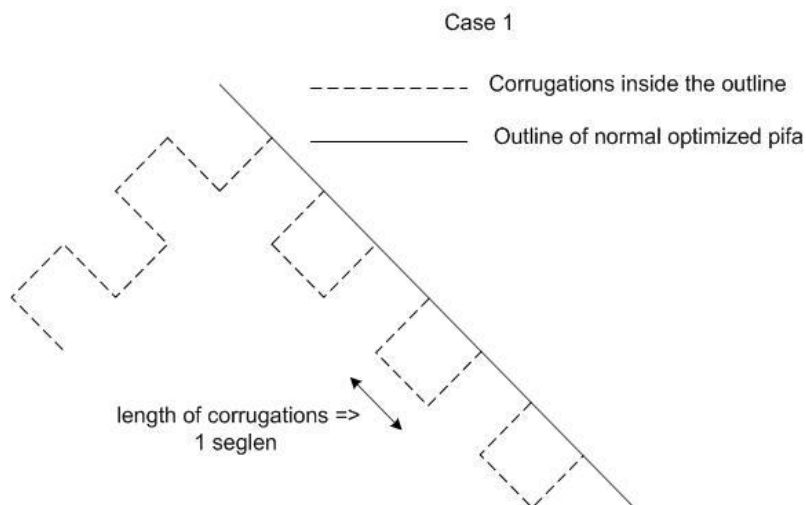
Σχήμα 6.1 Υλοποίηση κεραίας PIFA στο SuperNEC και οι μεταβλητές

### 6.3 Προσθήκη σχισμών ή πτυχώσεων (corrugations) στη διάταξη

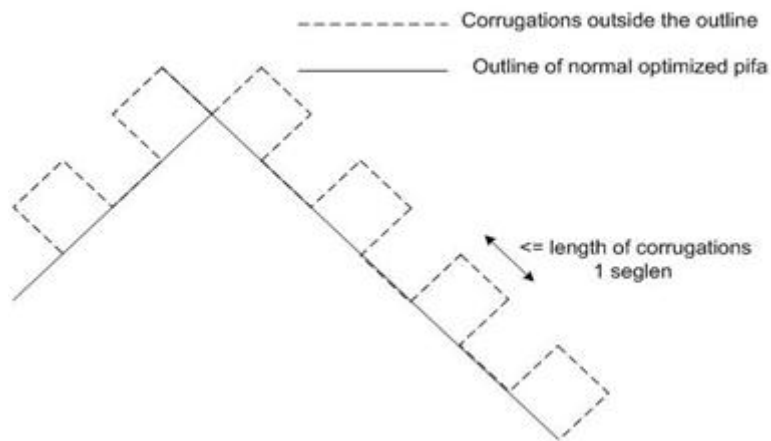
Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή στη διάταξη σχισμών ή πτυχώσεων (corrugations) τόσο στην άνω πλάκα όσο και στην κάτω, όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και εξετάζονται 3 διαφορετικές περιπτώσεις αυτών.

#### 6.3.1 Σχισμές (Corrugations) με πλάτος 1, μήκος 1, απόσταση 1

Η πρώτη περίπτωση (case 1) είναι corrugations με μήκος και πλάτος ίσα με ένα segment, τα οποία εφαρμόζονται τόσο εσωτερικά (σχήμα 6.2), όσο και εξωτερικά (σχήμα 6.3).

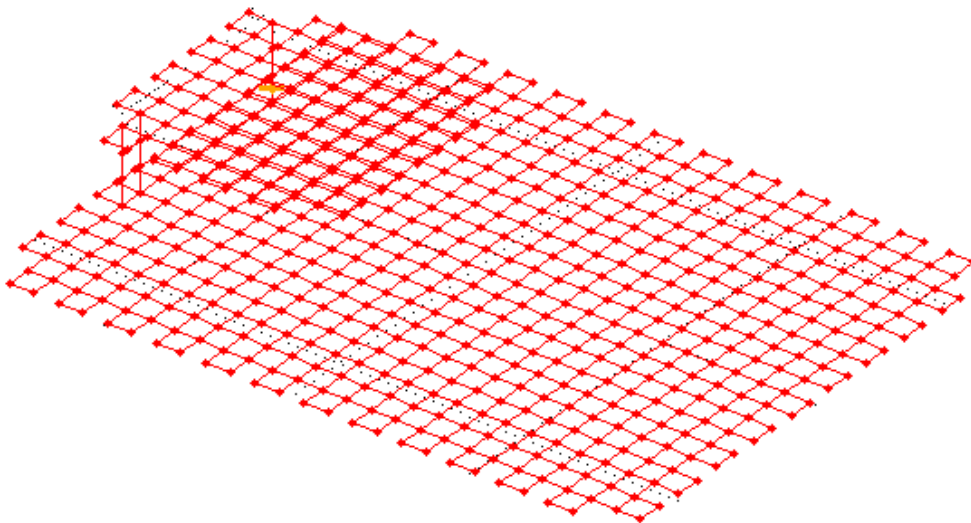


Σχήμα 6.2 Εφαρμογή Σχισμών (Corrugations) εσωτερικά της διάταξης



Σχήμα 6.3 Σχισμές (Corrugations) εξωτερικά της διάταξης

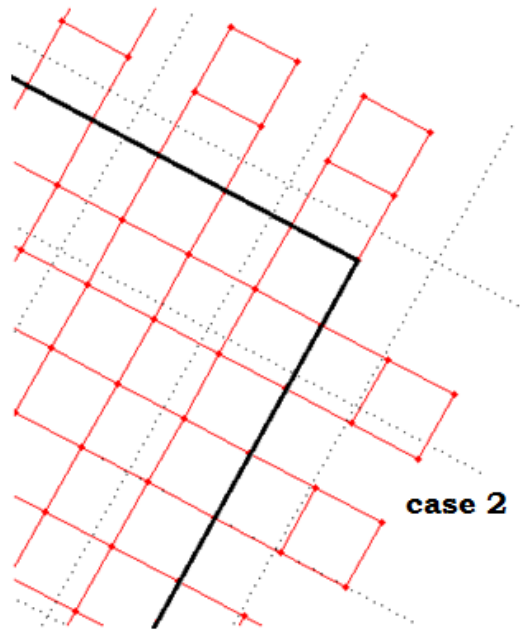
Στο σχήμα 6.4 απεικονίζεται μια ολοκληρωμένη δομή με corrugations με μήκος και πλάτος ίσα με ένα segment, ενώ δύο διαδοχικά απέχουν το ένα από το άλλο απόσταση επίσης ενός segment, η οποία καλείται Corrugated PIFA 111 (απόσταση 1, μήκος 1, πλάτος 1). Όπως έχει προαναφερθεί οι σχισμές εφαρμόζονται τόσο στην άνω αλλά και στην κάτω πλάκα.



Σχήμα 6.4 Δομή Corrugated PIFA 111 (με σχισμές μήκους και πλάτους 1)

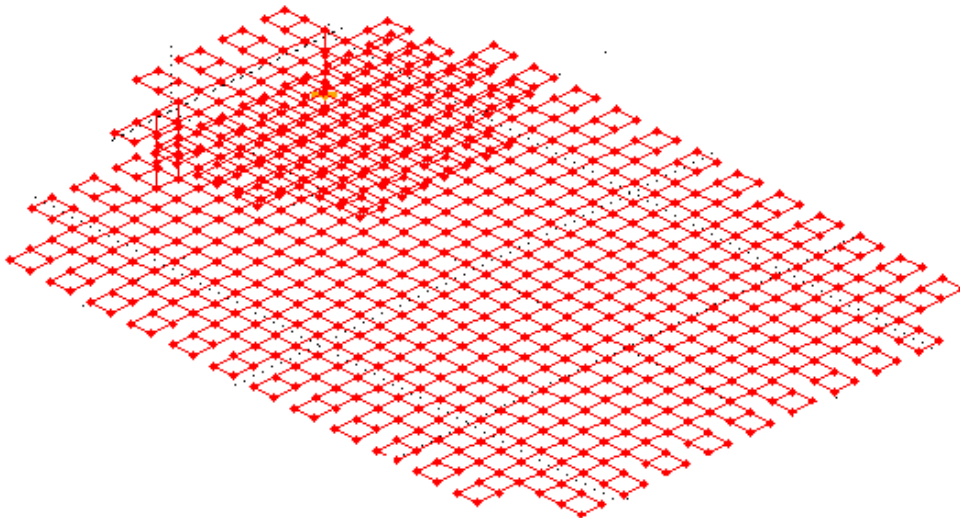
### 6.3.2 Σχισμές (Corrugations) με πλάτος 1, μήκος 2, απόσταση 1

Στην ίδια λογική με πιο πάνω, η δεύτερη περίπτωση (case 2) που εξετάζεται είναι για μήκος (βάθος) μιας σχισμής ίσο με 2 τμήματα (segments) και πλάτος 1 segment, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5. Και σε αυτό το ενδεχόμενο οι σχισμές εφαρμόζονται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά στην άνω και την κάτω πλάκα. Με έντονη μαύρη γραμμή στο σχήμα 6.5 αποτυπώνεται μέχρι που ήταν η διάταξη της κανονικής PIFA (Normal PIFA).



Σχήμα 6.5 Εξωτερικές οχισμές (Corrugations) με μήκος (βάθος) 2 segments

Η υλοποίηση της διάταξης στο SuperNEC φαίνεται στο σχήμα 6.6, ενώ η δομή αυτή καλείται Corrugated PIFA 121 (απόσταση 1, μήκος 2, πλάτος 1).

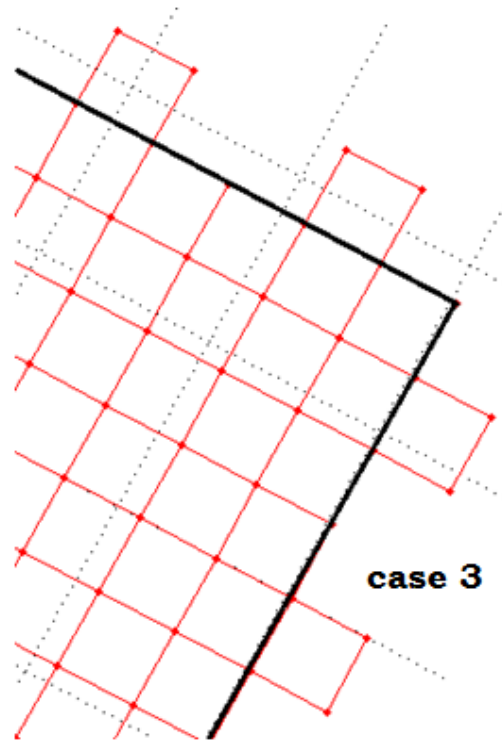


Σχήμα 6.6 Δομή Corrugated PIFA 121 με οχισμές βάθους 2 και πλάτους 1 segment

### 6.3.3 Σχισμές (Corrugations) με πλάτος 1, μήκος 1, απόσταση 2

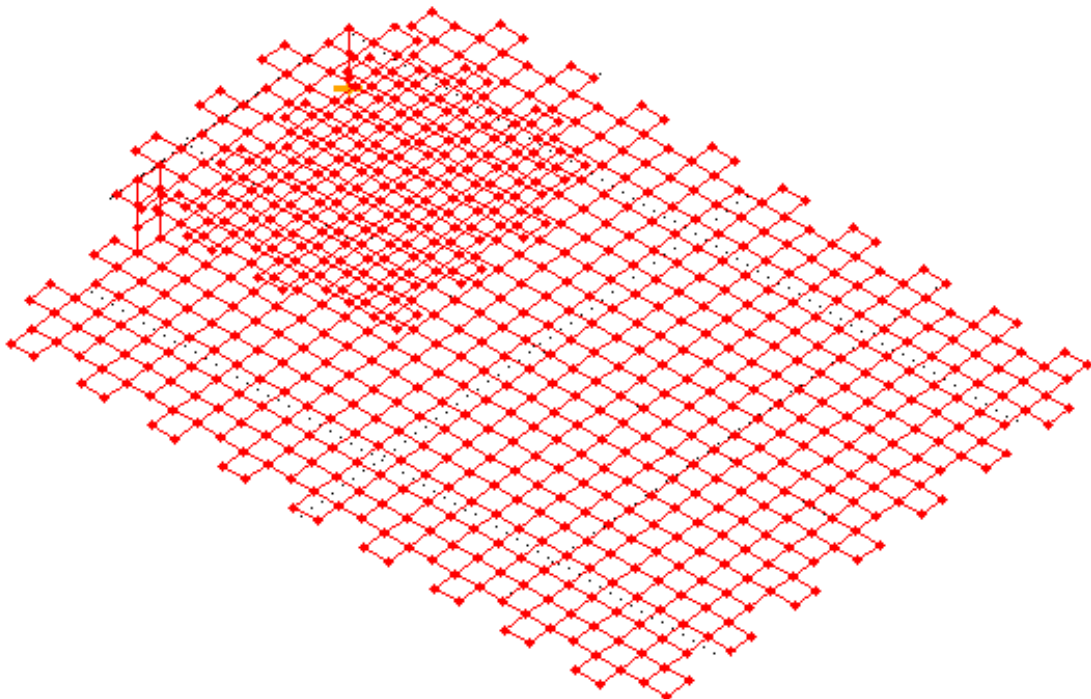
Η τρίτη και τελευταία περίπτωση (case 3) που μελετήθηκε ήταν για οχισμές με πλάτος και μήκος ίσο με ένα τμήμα (segment), αλλά αυτή τη φορά που απέχουν μεταξύ τους δύο segments (σχήμα 6.7). Και εδώ η έντονη μάρνη γραμμή οριοθετεί μέχρι ποιο σημείο έφτανε η κανονική PIFA πριν την εφαρμογή των οχισμών μιας και στη συγκεκριμένη περίπτωση που απεικονίζεται αυτές είναι εξωτερικές.





Σχήμα 6.7 Εξωτερικές σχισμές με μεταξύ τους απόσταση 2 segments

Η υλοποίηση της διάταξης στο SuperNEC φαίνεται στο σχήμα 6.8, και η διάταξη αυτή καλείται Corrugated PIFA 211 (απόσταση 2, μήκος 1, πλάτος 1).



Σχήμα 6.8 Δομή Corrugated PIFA 211 με σχισμές βάθους και πλάτους 1 segment με απόσταση μεταξύ τους 2 segments (περίπτωση 3)

Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι δομές που χρησιμοποιήθηκαν με την αντίστοιχη περιγραφή τους. Υπενθυμίζεται ότι

στις Corrugated PIFA οι σχισμές εφαρμόστηκαν σε κάθε διάταξη στην άνω και κάτω πλάκα, τόσο εξωτερικά, όσο και εσωτερικά.

Πίνακας 6.1 Συνοπτική περιγραφή των δομών που χρησιμοποιήθηκαν

Δομή	Περιγραφή
Normal PIFA	Η κανονική δομή της PIFA χωρίς σχισμές
Corrugated PIFA 111	Η δομή της PIFA με σχισμές πλάτους 1 segment, μήκους 1 segment, μεταξύ τους απόστασης 1 segment
Corrugated PIFA 121	Η δομή της PIFA με σχισμές πλάτους 1 segment, μήκους 2 segment, μεταξύ τους απόστασης 1 segment
Corrugated PIFA 211	Η δομή της PIFA με σχισμές πλάτους 1 segment, μήκους 1 segment, μεταξύ τους απόστασης 2 segment

## 6.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

### 6.4.1 Segment Length = 0.05λ

Η πρώτη προσπάθεια που έγινε ήταν για μήκος των τμημάτων που παράγουν τη διάταξη (segment length) ίσο με 0.05λ. Στον πίνακα 6.2 συνοψίζονται το εύρος των παραμέτρων αλλά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Υπενθυμίζεται ότι η συνθήκη βελτιστοποίησης είναι για VSWR = 1.

Πίνακας 6.2 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για segment length=0.05λ

Μεταβλητή	Εύρος Τιμών	Βήμα	Αποτελέσματα
Uplen	1 seglen – 8 seglen	1 seglen	1 seglen
Upwid	1 seglen – 8 seglen	1 seglen	7 seglen
h	1 seglen – 4 seglen	1 seglen	2 seglen
addx	1 seglen – 5 seglen	1 seglen	1 seglen
addy	1 seglen – 5 seglen	1 seglen	1 seglen

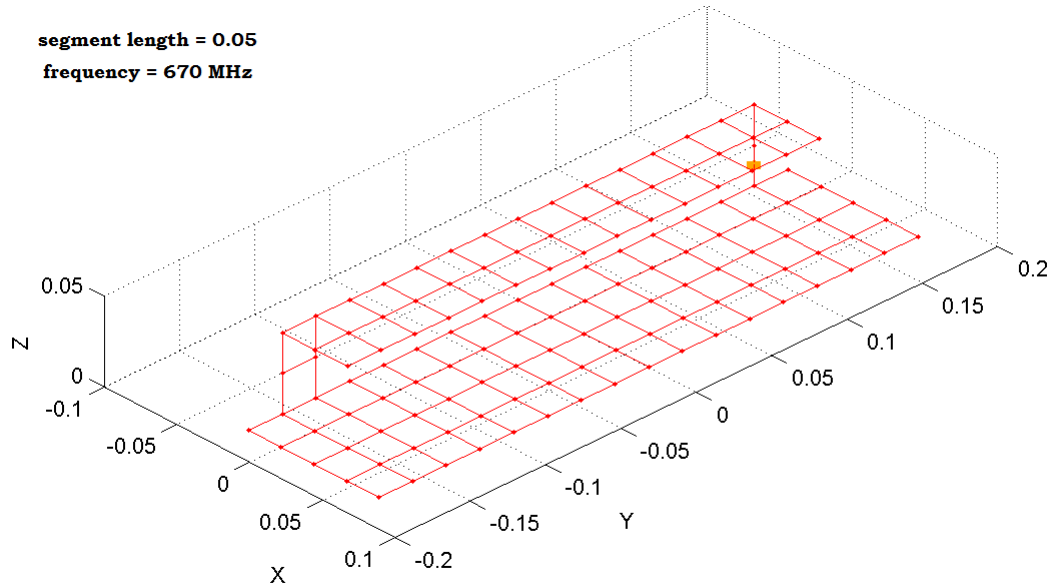
Στον πίνακα 6.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται πώς μεταφράζονται οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων σε διαστάσεις για την κεραία.

Πίνακας 6.3 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για segment length=0.05λ

Διαστάσεις	Εύρος Τιμών	Αποτελέσματα
Μήκος Άνω Πλάκας	2 seglen – 16 seglen	2 seglen
Πλάτος Άνω Πλάκας	2 seglen – 16 seglen	14 seglen
Ύψος Άνω Πλάκας	1 seglen – 4 seglen	2 seglen
Μήκος Κάτω Πλάκας	4 seglen – 26 seglen	4 seglen
Πλάτος Κάτω Πλάκας	4 seglen – 26 seglen	16 seglen

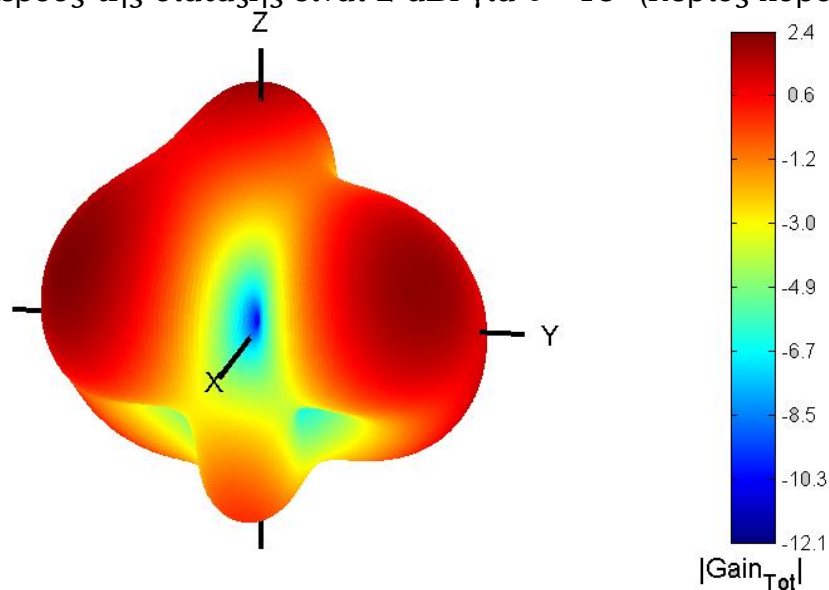
Το μήκος κύματος σε αυτή την περίπτωση είναι  $\lambda = 45$  cm (αφού η διάταξη είναι υλοποιημένη για 670 MHz). Το μήκος ενός τμήματος (segment length) συνεπώς, είναι ίσο με  $0.05 * \lambda = 2.25$  cm. Οπότε από

αυτό προκύπτει ότι το μήκος της κεραίας θα είναι  $4 \text{ segments} * 2.25 = 9 \text{ cm}$ , το πλάτος θα είναι  $16 * 2.25 = 36 \text{ cm}$ , ενώ το ύψος θα είναι  $2 * 2.25 = 4.5 \text{ cm}$ . Η υλοποίηση της συγκεκριμένης κεραίας στην πλατφόρμα SuperNEC φαίνεται στο σχήμα 6.9, όπου είναι ορατές και οι διαστάσεις, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.

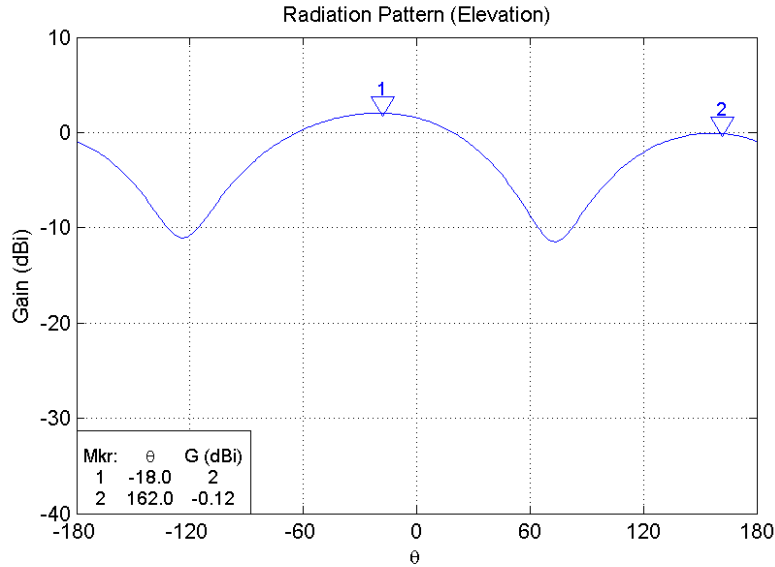


Σχήμα 6.9 Η υλοποίηση της βελτιστοποιημένης Normal PIFA στο SuperNEC για  $\text{segment length}=0.05\lambda$

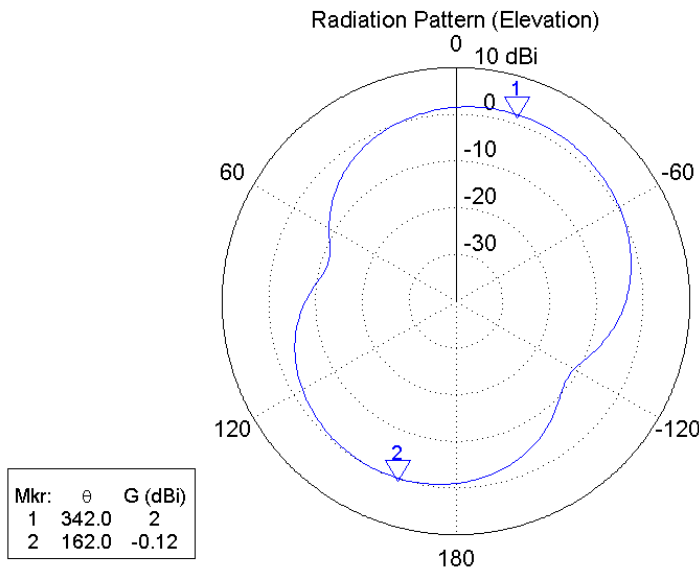
Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας της βελτιστοποιημένης PIFA για την συχνότητα στην οποία υπάρχει συντονισμός (το μικρότερο VSWR δηλαδή), τα 670 MHz. Στο σχήμα 6.9 δίνεται το 3διάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας, και στο σχήμα 6.10 το κέρδος σε συνάρτηση με τη γωνία ανύψωσης  $\theta$ . Όπως φαίνεται, το μέγιστο κέρδος της διάταξης είναι 2 dBi για  $\theta=-18^\circ$  (κύριος λοβός).



Σχήμα 6.10 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας της Normal PIFA για  $\text{segment length}=0.05\lambda$

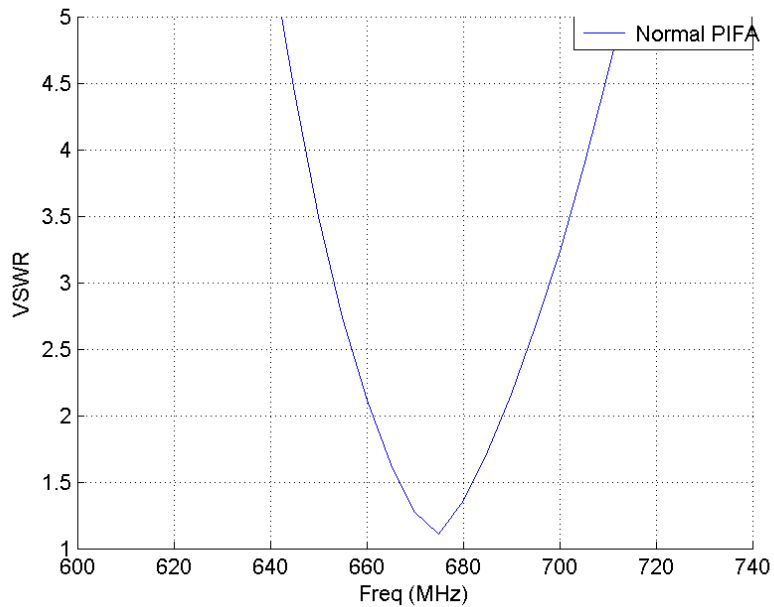


Σχήμα 6.11 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο xz σε επίπεδη μορφή για τη Normal PIFA με  $segment\ length=0.05\lambda$

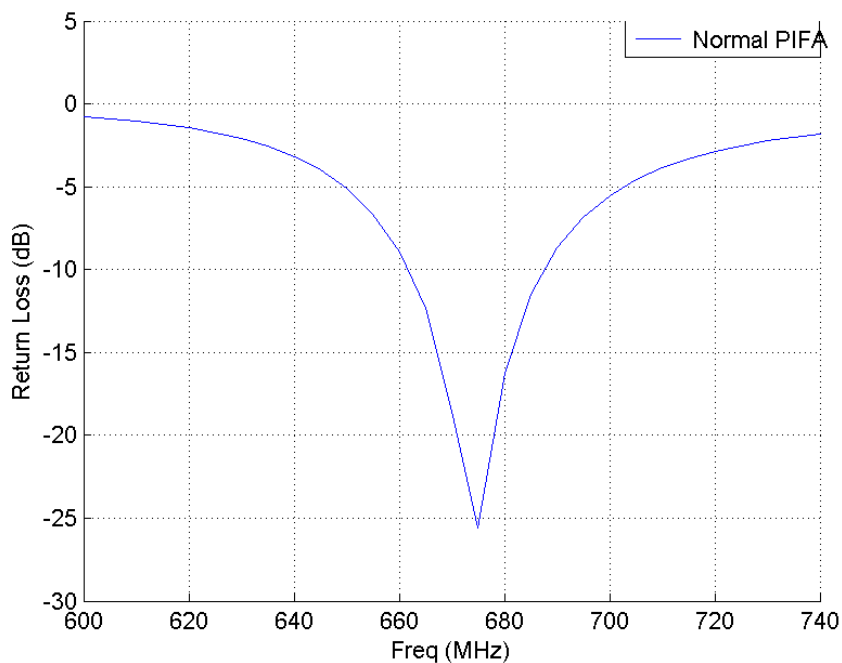


Σχήμα 6.12 Διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο xz σε πολικές συντεταγμένες για τη Normal PIFA με  $segment\ length=0.05\lambda$

Μελετώντας τη βελτιστοποιημένη διάταξη ως προς το εύρος ζώνης, από το σχήμα 6.13 που παρατίθεται παρακάτω, προκύπτει ότι αυτό είναι 30 MHz (660 – 690 MHz). Κριτήριο για τη μέτρηση του εύρους ζώνης (bandwidth) είναι η τιμή του λόγου στάσιμων κυμάτων (VSWR). Εντός του εύρους ζώνης, λοιπόν, θεωρούνται οι συχνότητες στις οποίες η διάταξη παρουσιάζει VSWR μικρότερο του 2 (ισοδύναμα 3 dB) ή αντίστοιχα απώλειες ανάκλασης μικρότερες των -10 dB.

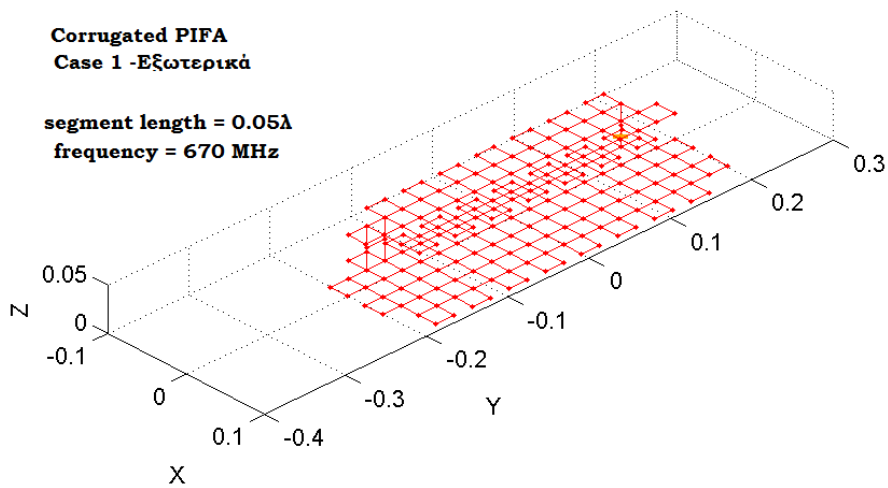


Σχήμα 6.13 Ο λόγος στάσιμων κυμάτων της Normal PIFA με  $segment\ length=0.05\lambda$

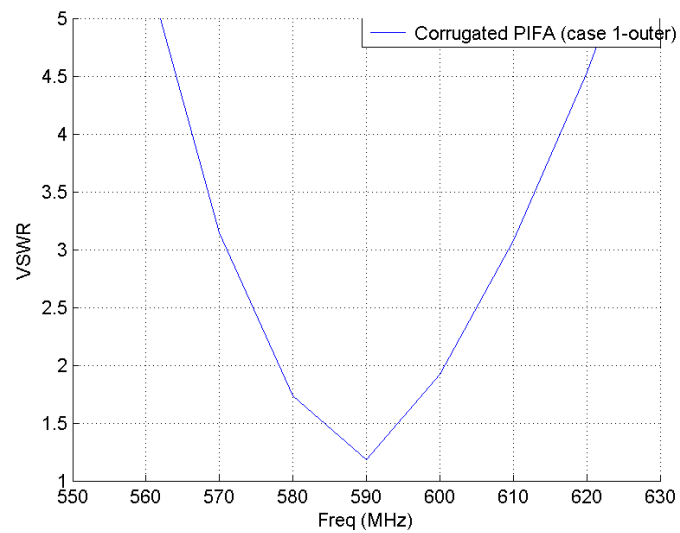


Σχήμα 6.14 Απώλειες ανάκλασης για Normal PIFA με  $segment\ length=0.05\lambda$

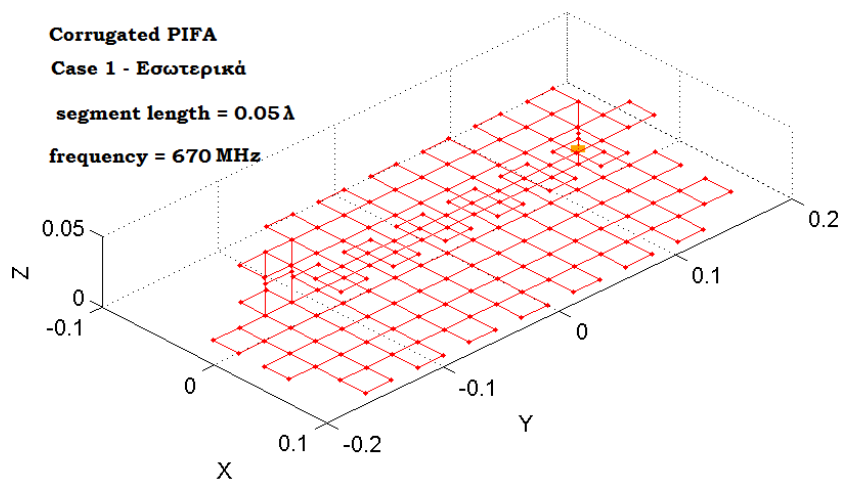
Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι σχισμές, όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 6.3 και αναλύονται οι επιδράσεις που επιφέρουν στην κεραία. Αρχικά εφαρμόζεται η περίπτωση 1 (case 1), όπου οι σχισμές (corrugations) εφαρμόζονται πρώτα εξωτερικά και έπειτα εσωτερικά. Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τόσο οι διατάξεις αυτές όσο και το VSWR, από όπου προκύπτει το εύρος ζώνης στο οποίο λειτουργούν.



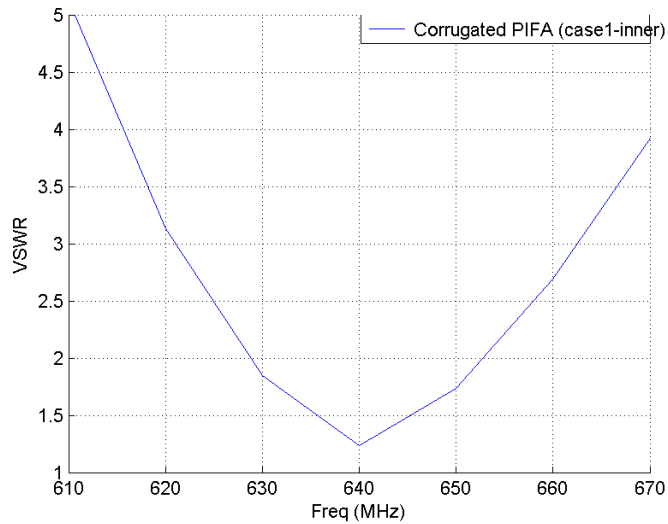
Σχήμα 6.15 Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)



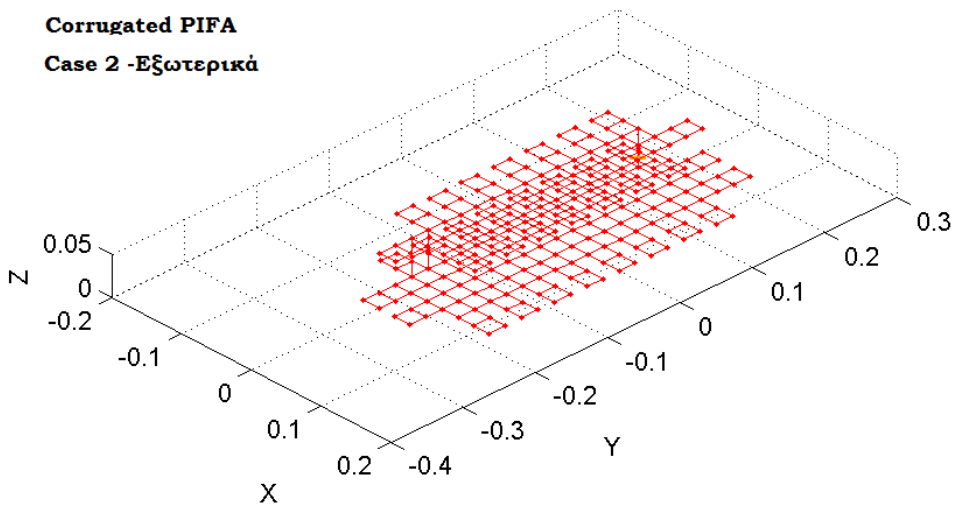
Σχήμα 6.16 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)



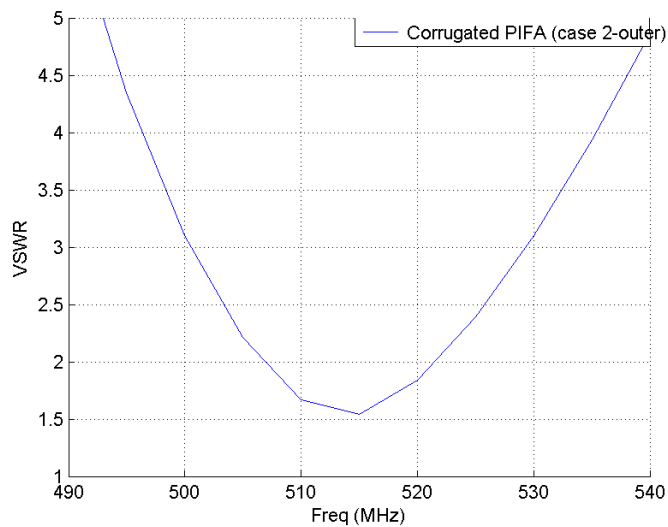
Σχήμα 6.17 Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)



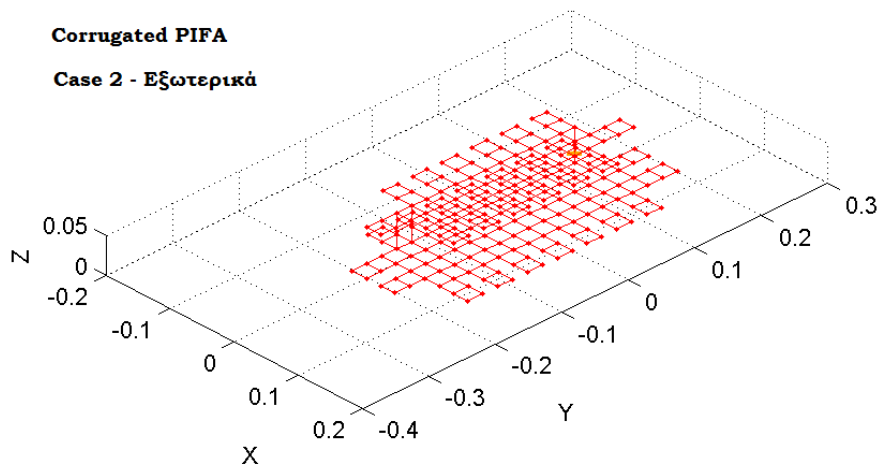
Σχήμα 6.18 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 1)



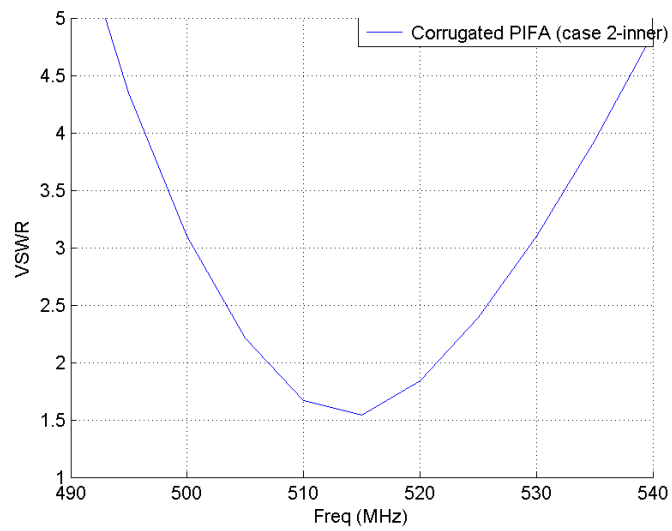
Σχήμα 6.19 Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 2)



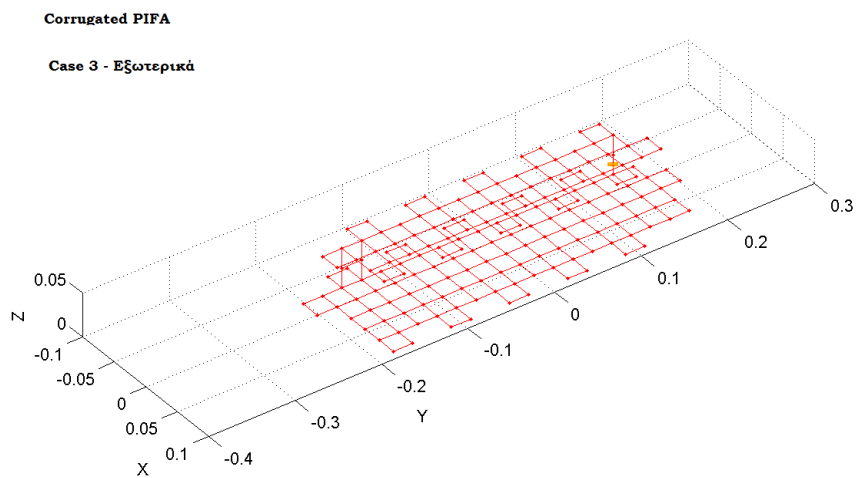
Σχήμα 6.20 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 2)



Σχήμα 6.21 Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 2)

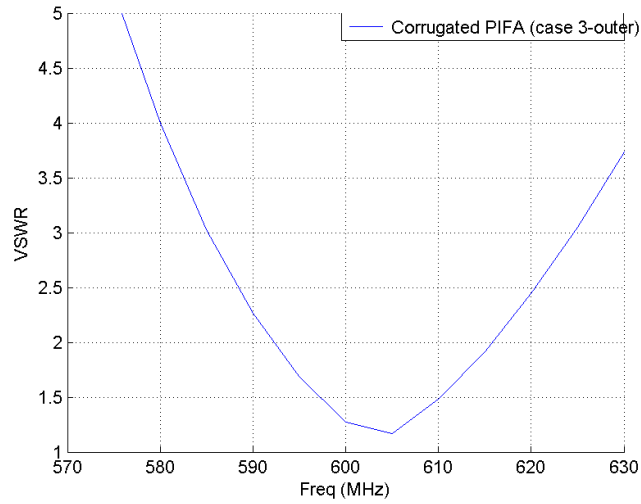


Σχήμα 6.22 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 2)

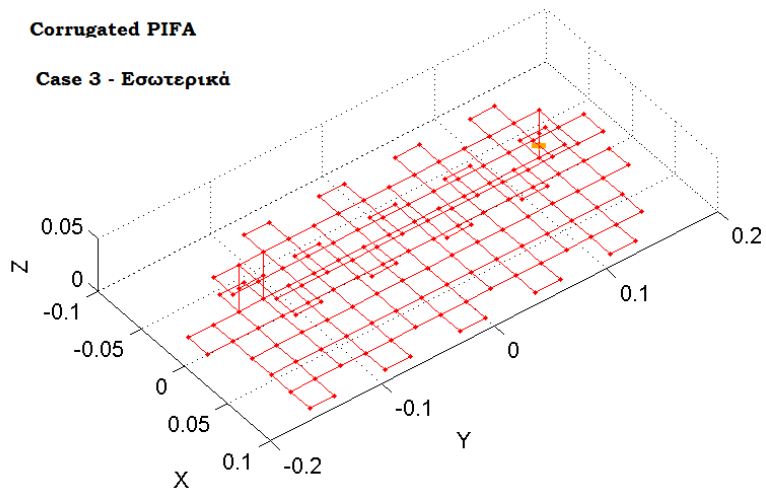


Σχήμα 6.23 Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 3)

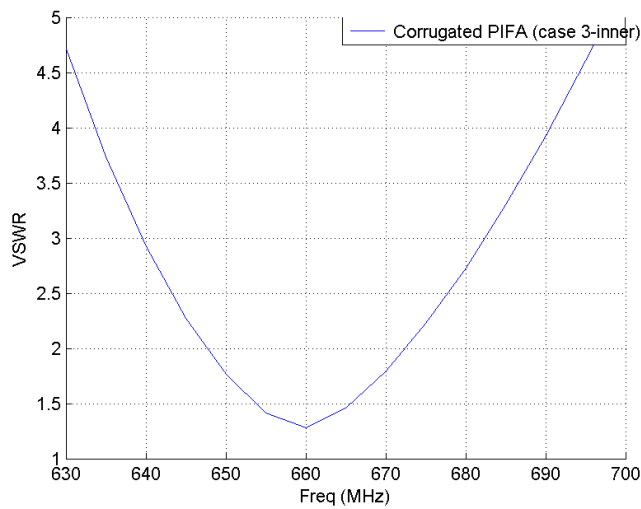




Σχήμα 6.24 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.25 Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.26 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3)

Όλα τα αποτελέσματα από τις διατάξεις που φαίνονται στα πιο πάνω σχήματα συνοψίζονται στον πίνακα 6.4, που ακολουθεί. Στη στήλη με το ελάχιστο VSWR μέσα σε παρένθεση δηλώνεται η συχνότητα στην οποία έχει αυτό επιτευχθεί, στην οποία υπάρχει προσαρμογή και ελαχιστοποιούνται οι απώλειες.

Πίνακας 6.4 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές με  $segment\ length=0.05\lambda$

Κεραία	Ελάχιστο VSWR	Κέρδος [dBi]	Εύρος Ζώνης [MHz]	Συχνότητες Λειτουργίας
<b>Normal PIFA</b>	1.2688 (670 MHz)	2	30 MHz	660 – 690 MHz
<b>Corrugated PIFA 111 (εξωτερικά)</b>	1.1795 (590 MHz)	2	25 MHz	575 – 600 MHz
<b>Corrugated PIFA111 (εσωτερικά)</b>	1.2352 (640 MHz)	2.8	30 MHz	625 – 655 MHz
<b>Corrugated PIFA121 (εξωτερικά)</b>	1.5375 (515 MHz)	2.6	15 MHz	505 – 520 MHz
<b>Corrugated PIFA121 (εσωτερικά)</b>	1.1069 (555 MHz)	2.5	20 MHz	545 – 565 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εξωτερικά)</b>	1.1665 (605 MHz)	2	25 MHz	590 – 615 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εσωτερικά)</b>	1.3243 (660 MHz)	2.6	25 MHz	650 – 675 MHz

Για την πρώτη περίπτωση είναι εμφανές ότι οι σχισμές δεν επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό το εύρος ζώνης. Αντίθετα, όμως άλλαξαν τις συχνότητες στις οποίες λαμβάνει η κεραία, καθώς μετατοπίστηκε και στις δυο περιπτώσεις χαμηλότερα και η συχνότητα στην οποία ο λόγος στάσιμων κυμάτων ελαχιστοποιείται. Επίσης, για τα εξωτερικά corrugations σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται καλύτερη προσαρμογή για τη συχνότητα στην οποία αυτή επιτυγχάνεται καθώς το ελάχιστο VSWR που εμφανίζεται είναι μικρότερο από το αντίστοιχο της Normal PIFA. Από την άλλη όμως με τις εσωτερικές σχισμές αυξάνεται το κέρδος απολαβής που παρουσιάζει η κεραία στη συχνότητα στην οποία εμφανίζεται το ελάχιστο VSWR.

Όσον αφορά στη δεύτερη περίπτωση, μειώνεται το εύρος ζώνης της διάταξης, αν και για εσωτερικές σχισμές η ελάχιστη τιμή του VSWR που εμφανίζεται είναι μικρότερη από τη Normal PIFA. Επίσης και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μετατόπιση χαμηλότερα στη συχνότητα συντονισμού και για τα δύο είδη σχισμών, γεγονός που σημαίνει και αλλαγή του διαστήματος συχνοτήτων που περιλαμβάνει το εύρος ζώνης. Τέλος, και στις δυο περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση του κέρδους της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού.

Για την Τρίτη περίπτωση ισχύουν περίπου τα ίδια με τις προηγούμενες, καθώς και εδώ υπάρχει μετατόπιση σε χαμηλότερες συχνότητες λειτουργίας για τη διάταξη με μια μικρή μείωσή του. Για εσωτερικά corrugations εμφανίζεται μια μικρή αύξηση του κέρδους.

### 6.4.2 Segment Length = 0.02λ

Λόγω του γεγονότος ότι για  $segment\ length = 0.05\lambda$  τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν αρκετά ικανοποιητικά, στη συνέχεια έγινε νέα προσπάθεια για μήκος τμήματος ίσο με  $0.02\lambda$ . Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια.

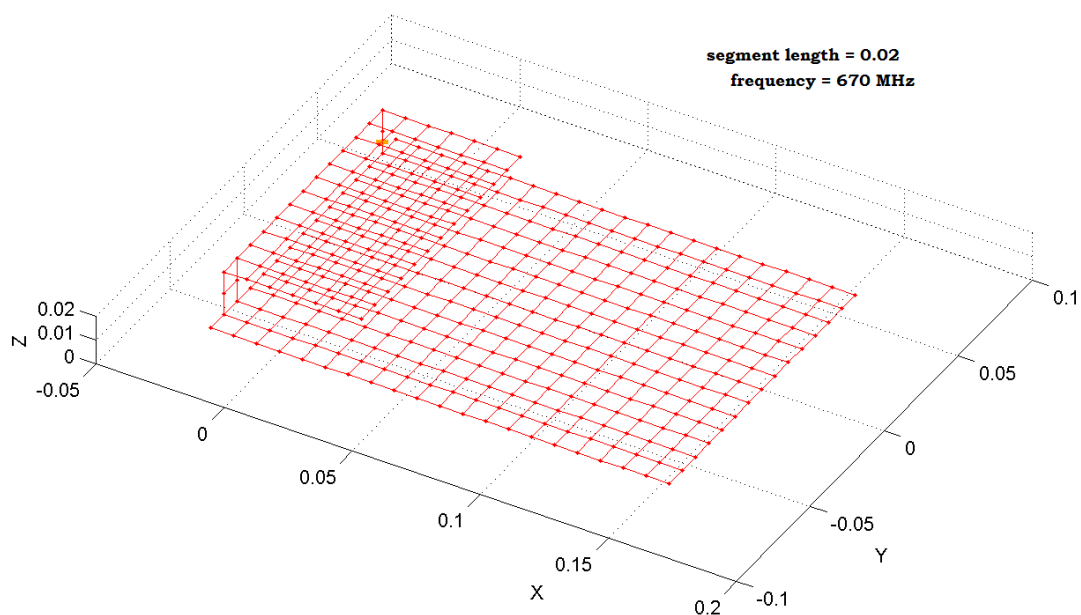
Πίνακας 6.5 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για  $segment\ length=0.02\lambda$

Μεταβλητή	Εύρος Τιμών	Βήμα	Αποτελέσματα
Uplen	1 seglen – 15 seglen	1 seglen	3 seglen
Uprwid	1 seglen – 15 seglen	1 seglen	6 seglen
h	1 seglen – 5 seglen	1 seglen	2 seglen
addx	1 seglen – 7 seglen	1 seglen	7 seglen
addy	1 seglen – 7 seglen	1 seglen	1 seglen

Πίνακας 6.6 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για  $segment\ length=0.02\lambda$

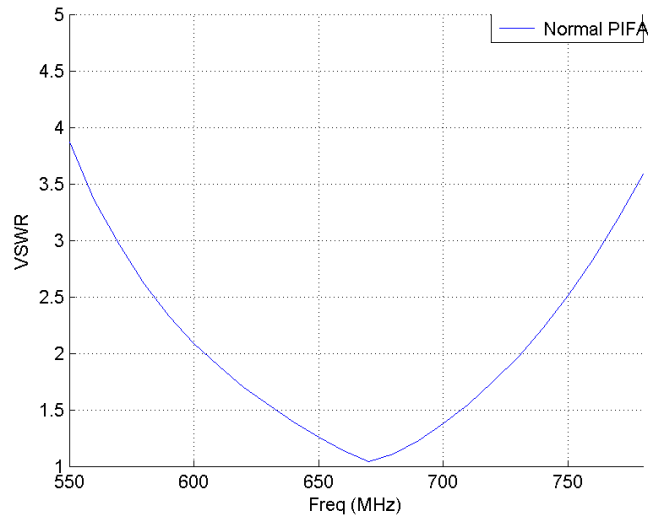
Διαστάσεις	Εύρος Τιμών	Αποτελέσματα
Μήκος Άνω Πλάκας	2 seglen – 30 seglen	6 seglen
Πλάτος Άνω Πλάκας	2 seglen – 30 seglen	12 seglen
Ύψος Άνω Πλάκας	1 seglen – 5 seglen	2 seglen
Μήκος Κάτω Πλάκας	4 seglen – 44 seglen	20 seglen
Πλάτος Κάτω Πλάκας	4 seglen – 44 seglen	14 seglen

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο για το εύρος τιμών για τις παραμέτρους, όπως φαίνονται στον πίνακα 6.5 αποτυπώνονται στη διάταξη στο σχήμα 2.26. Το μήκος ενός τμήματος ( $segment\ length$ ) σε αυτή την περίπτωση είναι  $0.02*\lambda = 0.9\ cm$ . Οι διαστάσεις της κεραίας είναι  $18\ cm \times 12.6\ cm \times 1.8\ cm$ .

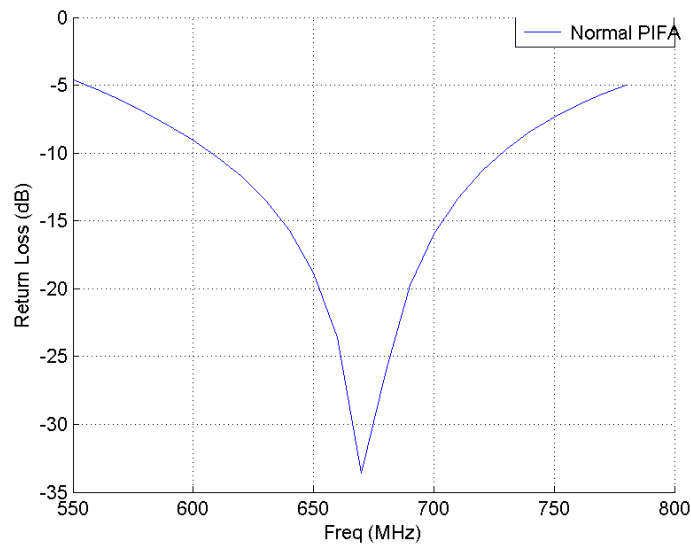


Σχήμα 6.27 Βελτιστοποιημένη δομή Normal PIFA για  $segment\ length=0.02\lambda$

Στο σχήμα 6.29 φαίνεται η γραφική παράσταση του λόγου στάσιμων κυμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Φαίνεται, λοιπόν ότι η συνθήκη για VSWR ικανοποιήθηκε αρκετά καθώς για συχνότητα 670 MHz η τιμή του είναι 1.0429 ελαχιστοποιώντας και τις απώλειες εντός εύρους ζώνης όπως φαίνεται στο σχήμα 6.30. το εύρος ζώνης είναι 130 MHz (600 – 730 MHz), που κρίνεται ικανοποιητικό καθώς καλύπτει τα κανάλια 37 – 53 της ψηφιακής τηλεόρασης.

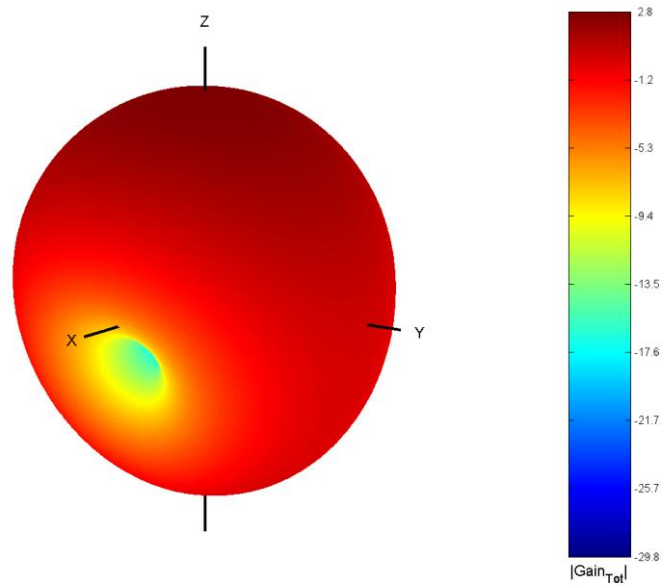


Σχήμα 6.28 Λόγος στάσιμων κυμάτων για βελτιστοποιημένη Normal PIFA με  $segment\ length=0.02\lambda$

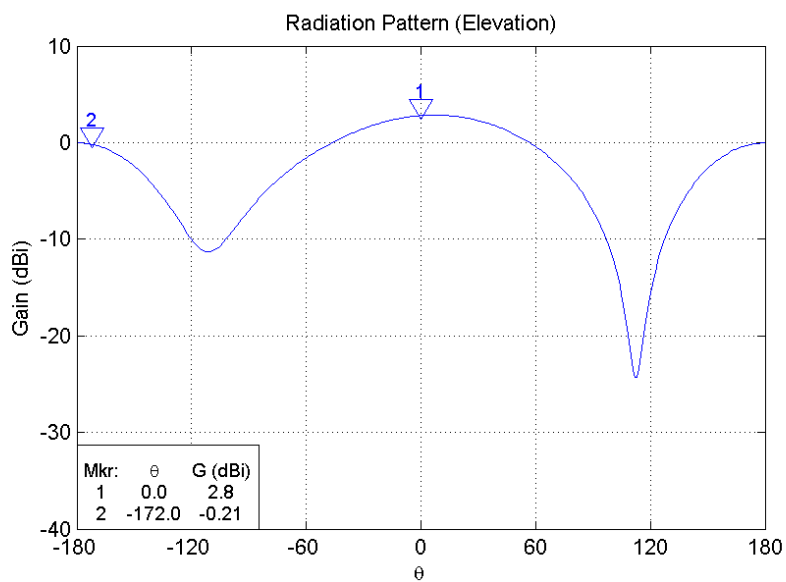


Σχήμα 6.29 Απώλειες ανάκλασης για βελτιστοποιημένη Normal PIFA με  $segment\ length=0.02\lambda$

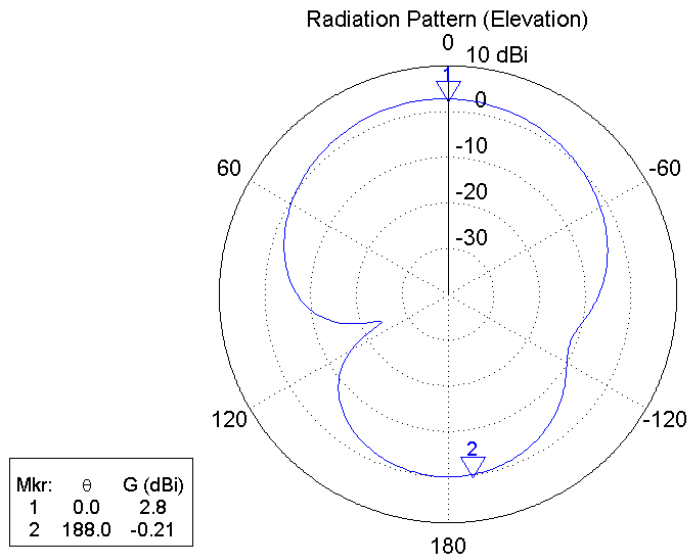
Στα διαγράμματα ακτινοβολίας που ακολουθούν φαίνεται ότι στο xz επίπεδο η κεραία εμφανίζει ένα κύριο λοβό για  $\theta=0^\circ$  με κέρδος απολαβής 2.8 dBi.



Σχήμα 6.30 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.02\lambda$

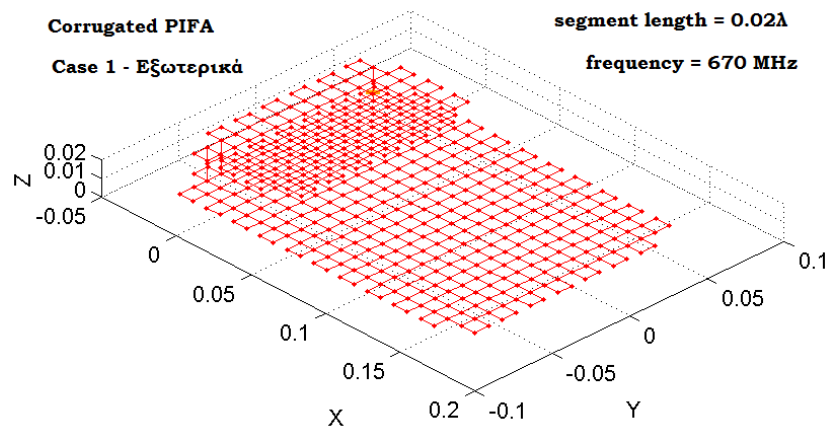


Σχήμα 6.31 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.02\lambda$  στο επίπεδο xz σε επίπεδη μορφή

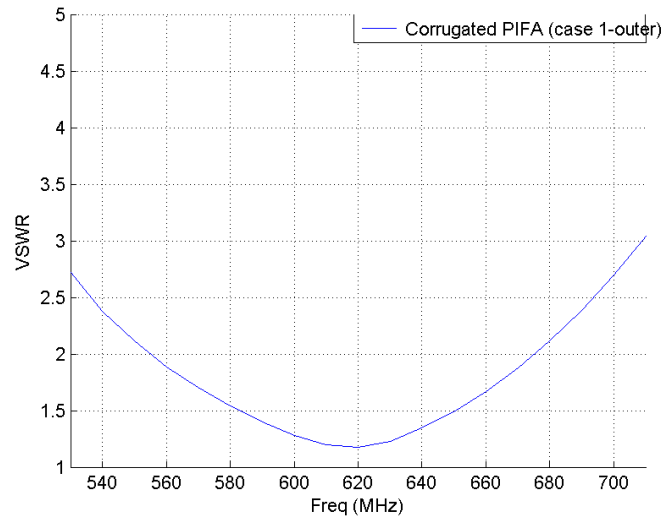


Σχήμα 6.32 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.02\lambda$  στο επίπεδο xz σε πολικές συντεταγμένες

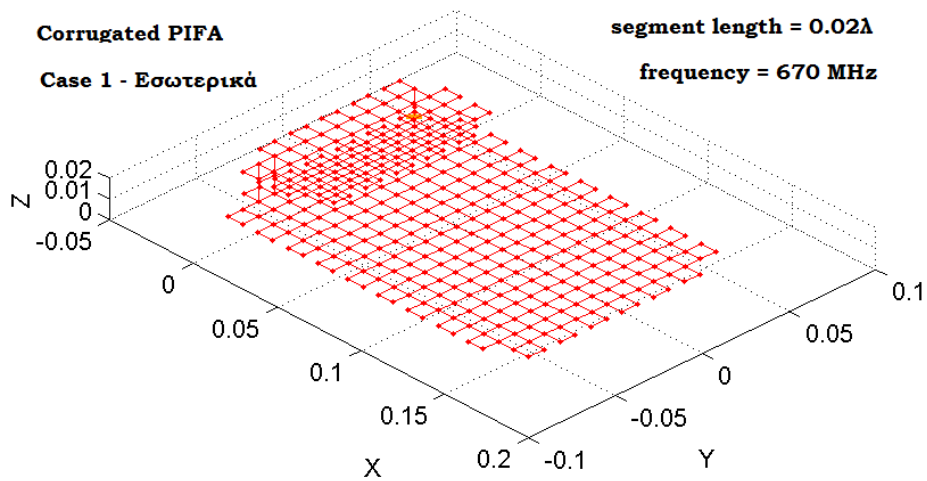
Στη συνέχεια εξετάζονται οι δομές με σχισμές όπως ακριβώς έχει περιγραφεί και στην προηγούμενη ενότητα. Παρατίθενται στα ακόλουθα σχήματα οι δομές όπως έχουν υλοποιηθεί στο SuperNEC και αμέσως μετά η γραφική παράσταση του VSWR σε συνάρτηση με τη συχνότητα.



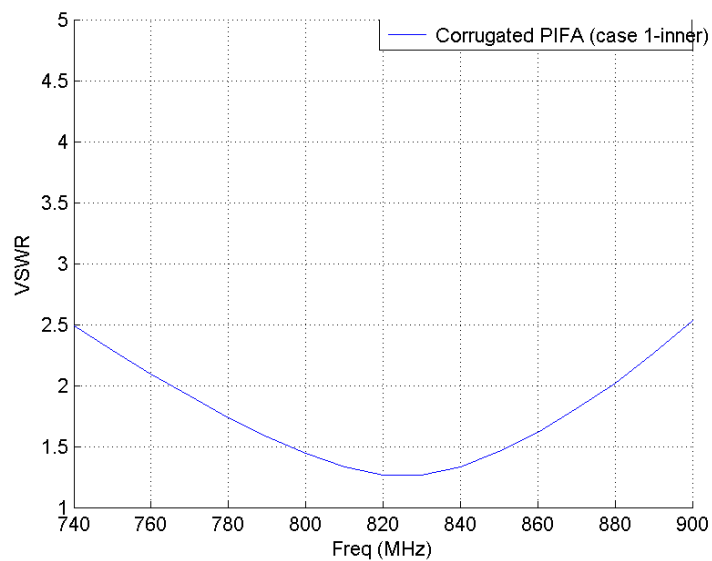
Σχήμα 6.33 Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)



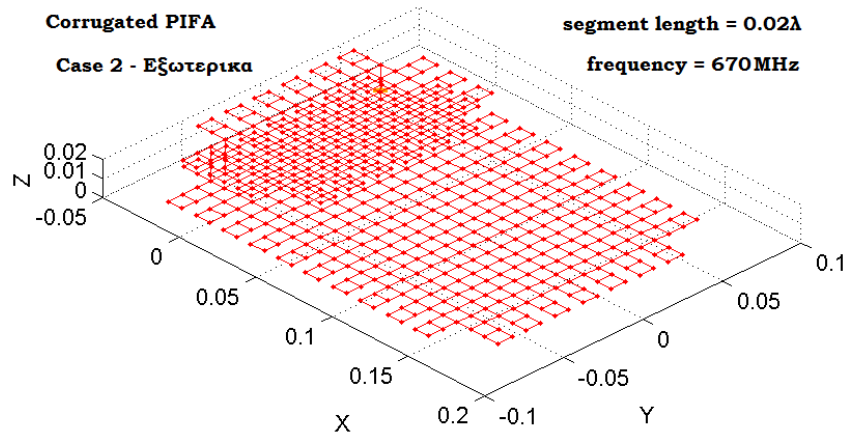
Σχήμα 6.34 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές οχιομές (περίπτωση 1)



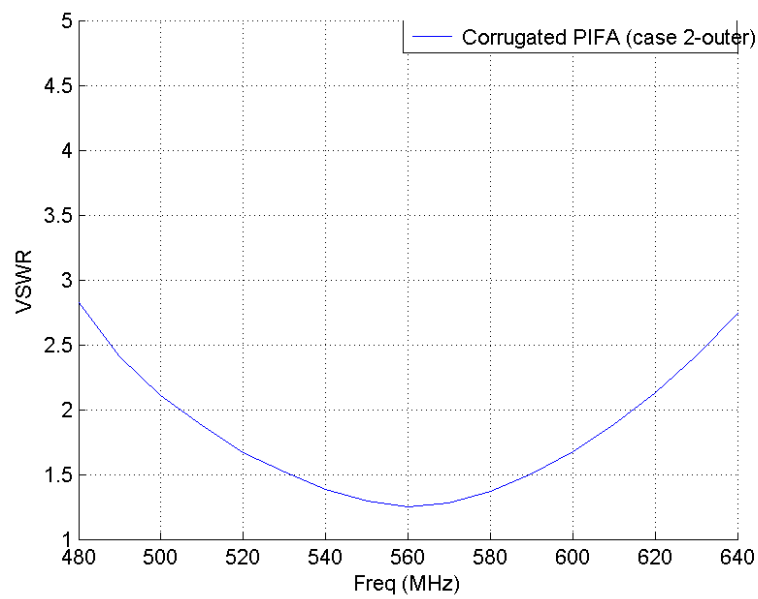
Σχήμα 6.35 Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές οχιομές (περίπτωση 1)



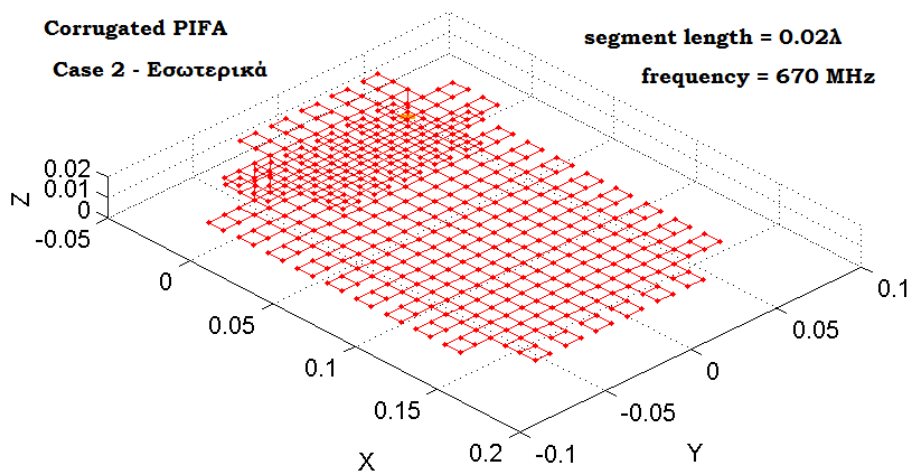
Σχήμα 6.36 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές οχιομές (περίπτωση 1)



Σχήμα 6.37 Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές οχισμές (περίπτωση 2)

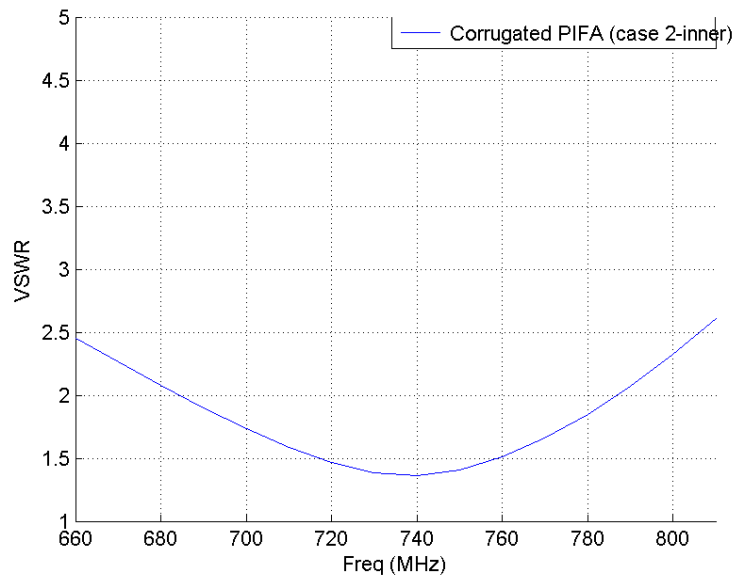


Σχήμα 6.38 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές οχισμές (περίπτωση 2)

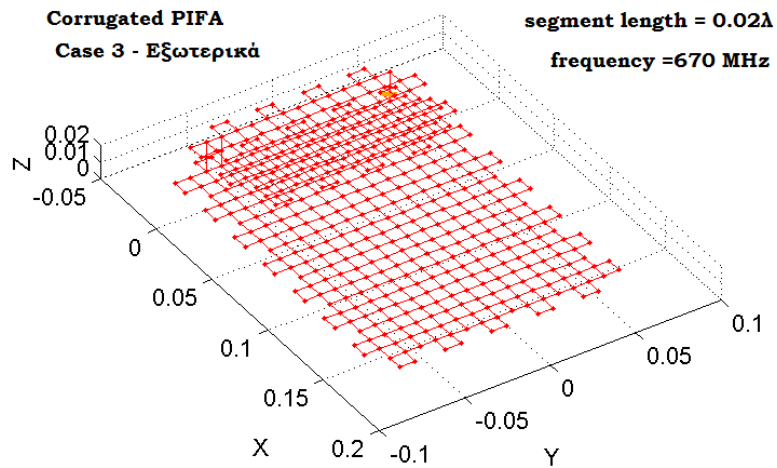


Σχήμα 6.39 Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές οχισμές (περίπτωση 2)

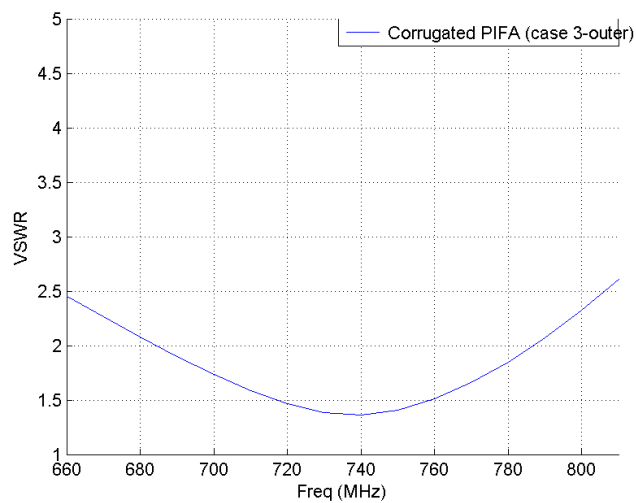




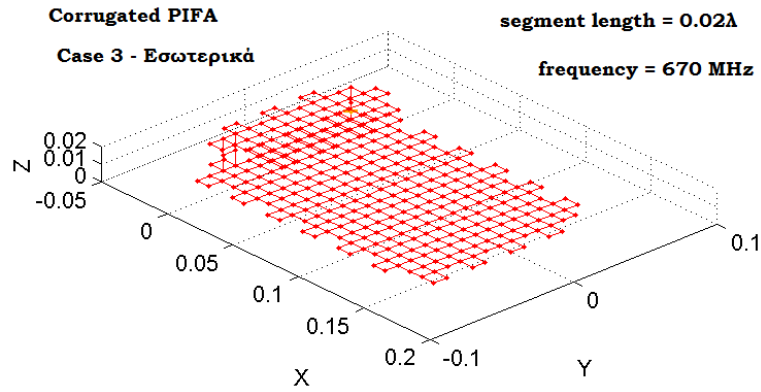
Σχήμα 6.40 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 2)



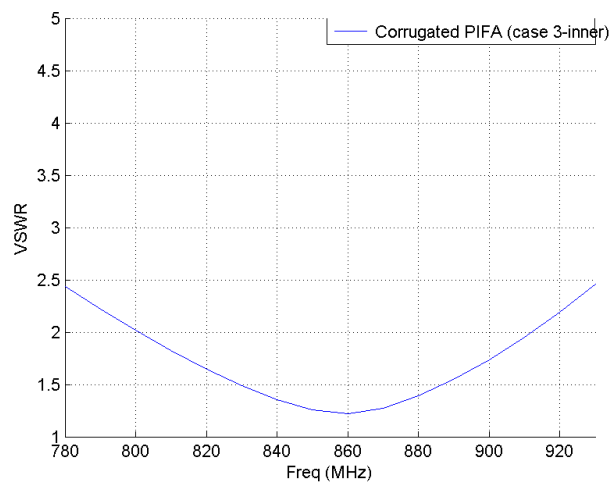
Σχήμα 6.41 Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.42 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.43 Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές οχισμές (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.44 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές οχισμές (περίπτωση 3)

Στον πίνακα 6.7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από τις δομές με οχισμές (είτε εσωτερικές είτε εξωτερικές) που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα. Καταγράφεται η ελάχιστη τιμή για το VSWR που εμφανίζει η κάθε κεραία και σε ποια συχνότητα συμβαίνει αυτό, το κέρδος στη συχνότητα αυτή καθώς επίσης και οι συχνότητες που λαμβάνει η κεραία.

Πίνακας 6.7 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές που μελετήθηκαν για  $segment\ length = 0.02\lambda$

Κεραία	Ελάχιστο VSWR	Κέρδος [dBi]	Εύρος Ζώνης [MHz]	Συχνότητες Λειτουργίας
<b>Normal PIFA</b>	1.0429 (670 MHz)	2.8	130 MHz	600 – 730 MHz
<b>Corrugated PIFA 111 (εξωτερικά)</b>	1.1718 (620 MHz)	2.7	120 MHz	555 – 675 MHz
<b>Corrugated PIFA 111 (εσωτερικά)</b>	1.2523 (825 MHz)	2.7	120 MHz	760 – 880 MHz
<b>Corrugated PIFA 121 (εξωτερικά)</b>	1.2534 (560 MHz)	2.5	120 MHz	500 – 620 MHz
<b>Corrugated PIFA 121(εσωτερικά)</b>	1.3637 (740 MHz)	2.5	110 MHz	680 – 790 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εξωτερικά)</b>	1.1519 (635 MHz)	2.7	120 MHz	570 – 690 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εσωτερικά)</b>	1.2216 (860 MHz)	2.8	110 MHz	800 – 910 MHz

Αναφορικά με την Corrugated PIFA 111 παρατηρείται ότι παρουσιάζει μια μικρή μείωση στο εύρος ζώνης και στην περίπτωση των εσωτερικών σχισμών όσο και σε αυτή των εξωτερικών. Επίσης, και στις δύο περιπτώσεις σχισμών για αυτή τη δομή, το ελάχιστο VSWR που εμφανίζεται είναι ελαφρώς αυξημένο με την Normal PIFA ενώ και το κέρδος μειώνεται ελάχιστα. Στις εξωτερικές σχισμές παρατηρείται μια μετατόπιση των συχνοτήτων που λαμβάνει η κεραία χαμηλότερα καθώς το αντίστοιχο διάστημα είναι για 555 – 675 MHz δηλαδή για τα κανάλια 31 – 46 της ψηφιακής τηλεόρασης. Για εσωτερικές σχισμές αντίστοιχα καλύπτονται οι συχνότητες 760 – 880 MHz, που περιλαμβάνουν το κομμάτι του ψηφιακού μερίσματος (digital dividend), όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 2.

Για την Corrugated PIFA 121 παρατηρείται επίσης μετατόπιση στη ζώνη συχνοτήτων που λαμβάνει στην μεν περίπτωση των εξωτερικών σχισμών χαμηλότερα, ενώ στις εσωτερικές ελαφρώς υψηλότερα, συγκριτικά πάντα με τη Normal PIFA. Η απολαβή (gain) και εδώ είναι ελαφρώς μικρότερη και στις εσωτερικές και εξωτερικές σχισμές, υπάρχει χειρότερη προσαρμογή ενώ και το εύρος ζώνης παρουσιάζει μικρή ελάττωση.

Τέλος, για την Corrugated PIFA 211 παρατηρούνται ότι και στην προηγούμενη περίπτωση. Αξιοσημείωτο εδώ είναι το γεγονός ότι για εσωτερικές σχισμές η διάταξη λαμβάνει σε συχνότητες υψηλότερες από τις επιθυμητές συχνότητες πιάνοντας τα 900 MHz του GSM.

#### 6.4.3 Segment Length = 0.015λ

Αν και η προηγούμενη προσπάθεια με τον γενετικό είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα, εντούτοις δεν ήταν τα επιθυμητά. Γι' αυτό στη συνέχεια ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για μήκος τμημάτων (segment length) ίσο με 0.015λ. Το εύρος των τιμών που λάμβαναν οι μεταβλητές, όπως

και τα αποτελέσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στον πίνακα 6.8 που ακολουθεί:

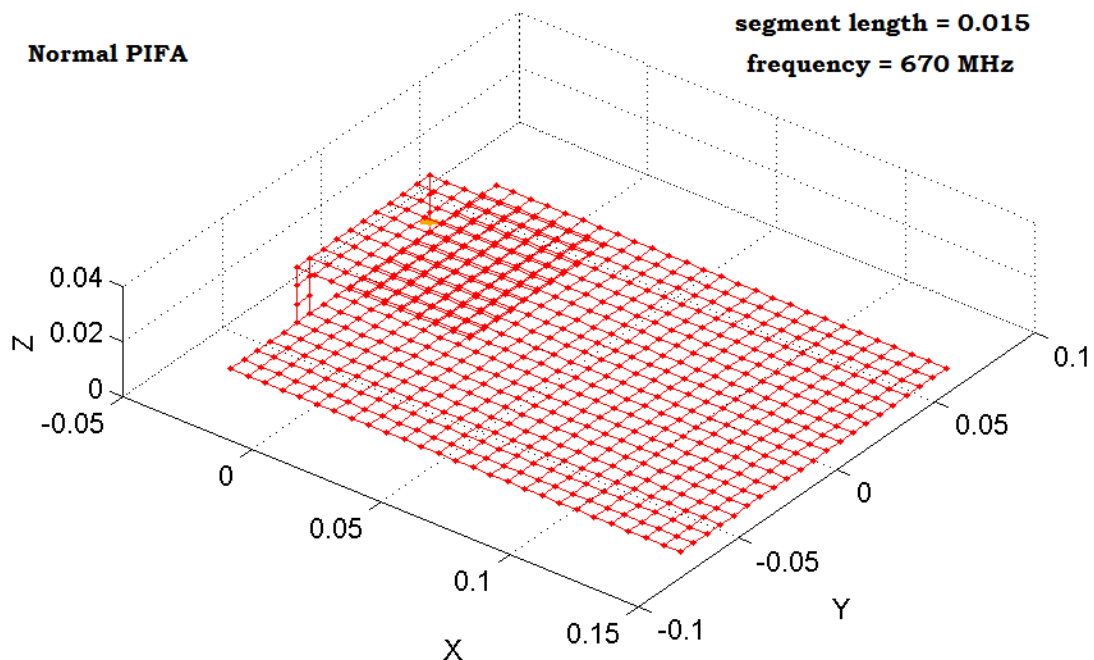
Πίνακας 6.8 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για  $segment\ length=0.015\lambda$

Μεταβλητή	Εύρος Τιμών	Βήμα	Αποτελέσματα
Uplen	1seglen – 12seglen	1 seglen	5 seglen
Urwid	1seglen – 12seglen	1 seglen	5 seglen
h	1seglen – 6seglen	1 seglen	3 seglen
addx	1seglen – 10seglen	1 seglen	8 seglen
addy	1seglen – 10seglen	1 seglen	5 seglen

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο για το εύρος τιμών για τις παραμέτρους, όπως φαίνονται στον πίνακα 6.8 αποτυπώνονται στη διάταξη στο σχήμα 6.45. Το μήκος ενός τμήματος ( $segment\ length$ ) σε αυτή την περίπτωση είναι  $0.015*\lambda = 0.675\ cm$ . Οι διαστάσεις της κεραίας είναι  $17.55\ cm \times 13.5\ cm \times 2.025\ cm$ . Είναι εμφανές ότι η ανάγκη για μια μικρή διάταξη ικανοποιείται σχετικώς.

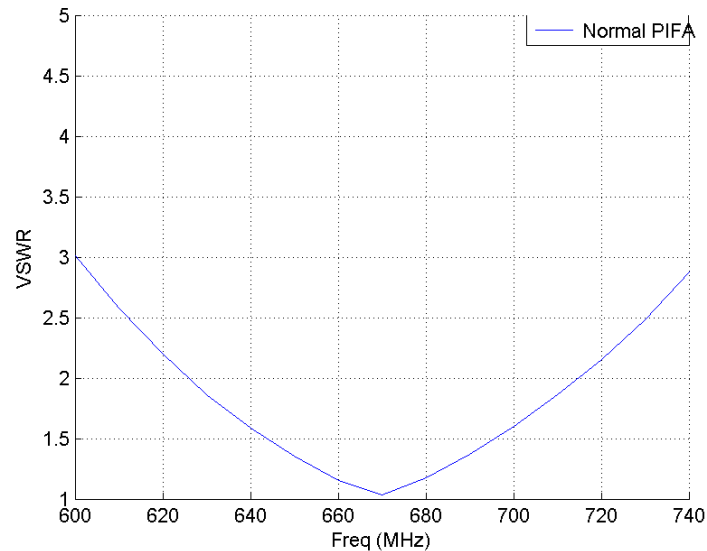
Πίνακας 6.9 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για  $segment\ length=0.015\lambda$

Διάσταση	Εύρος Τιμών	Αποτελέσματα
Μήκος Άνω Πλάκας	2seglen – 24seglen	10 seglen
Πλάτος Άνω Πλάκας	2seglen – 24seglen	10 seglen
Ύψος Άνω Πλάκας	1seglen – 6seglen	3 seglen
Μήκος Κάτω Πλάκας	4seglen – 44seglen	26 seglen
Πλάτος Κάτω Πλάκας	4seglen – 44seglen	20 seglen



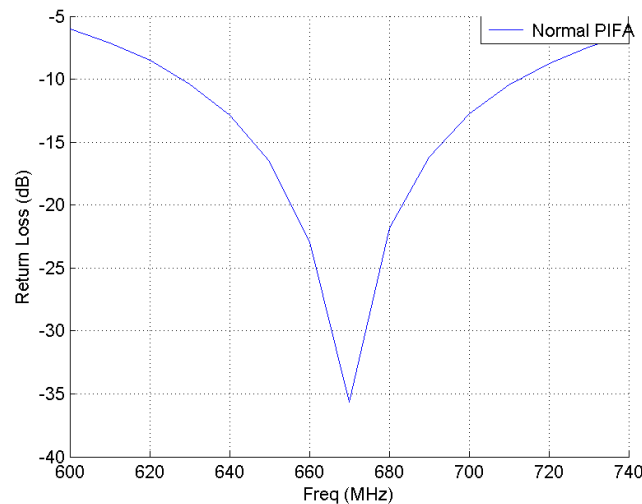
Σχήμα 6.45 Βελτιστοποιημένη δομή Normal PIFA για  $segment\ length=0.015\lambda$

Στο σχήμα 6.46 είναι εμφανές ότι η συνθήκη βελτιστοποίησης που είχαμε θέσει ικανοποιήθηκε καθώς ο λόγος στάσιμων κυμάτων για τη συχνότητα των 670 MHz ισούται με 1.0335 που κρίνεται ως μια πολύ ικανοποιητική τιμή. Επίσης, η βελτιστοποιημένη κεραία λαμβάνει για συχνότητες 625 – 715 MHz, που αντιστοιχούν στα κανάλια 40 – 51 της ψηφιακής τηλεόρασης.



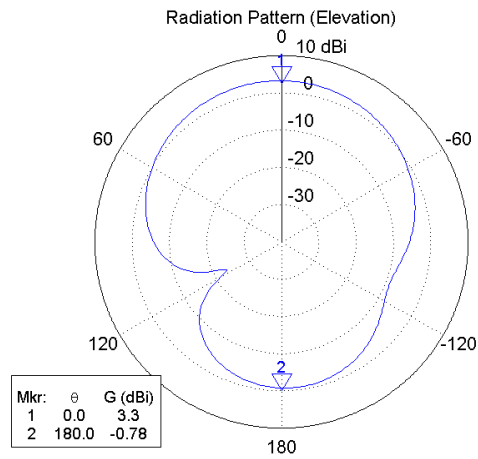
Σχήμα 6.46 Λόγος στάσιμων κυμάτων για βελτιστοποιημένη Normal PIFA με  $segment\ length=0.015\lambda$

Στο σχήμα 6.47 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι απώλειες ανάκλασης λόγω μη τέλει προσαρμογής σε κάθε συχνότητα. Εντός εύρους ζώνης θεωρούνται οι συχνότητες που οι απώλειες δεν υπερβαίνουν τα -10 dB.

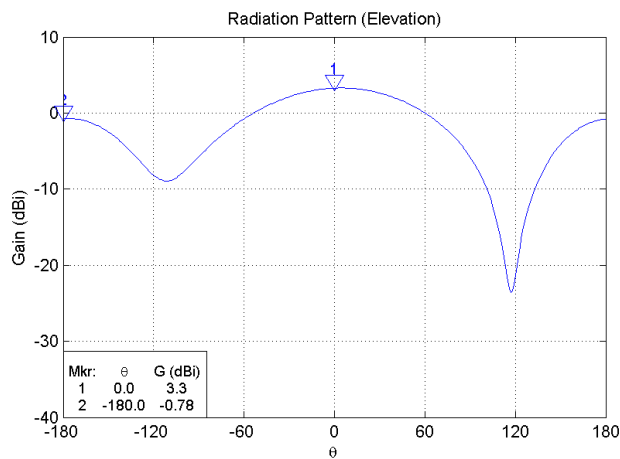


Σχήμα 6.47 Απώλειες ανάκλασης για βελτιστοποιημένη Normal PIFA με  $segment\ length=0.015\lambda$

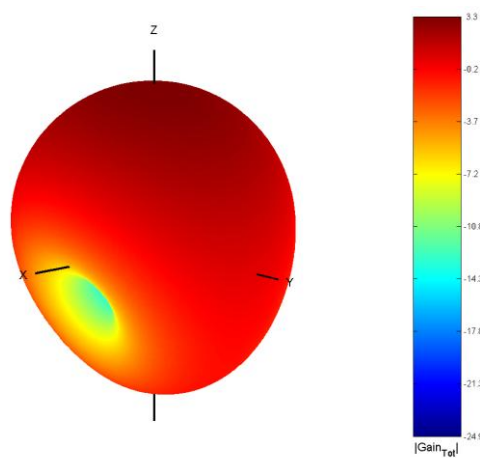
Μελετώντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας που ακολουθούν προκύπτει ότι η κεραία παρουσιάζει μια καλή τιμή κέρδους, 3.3 dBi με κύριο λοβό για  $\theta=0^\circ$ , ενώ ο οπίσθιος λοβός είναι μειωμένος αλλά όχι σημαντικά.



Σχήμα 6.48 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.015\lambda$  στο επίπεδο xz σε πολικές συντεταγμένες

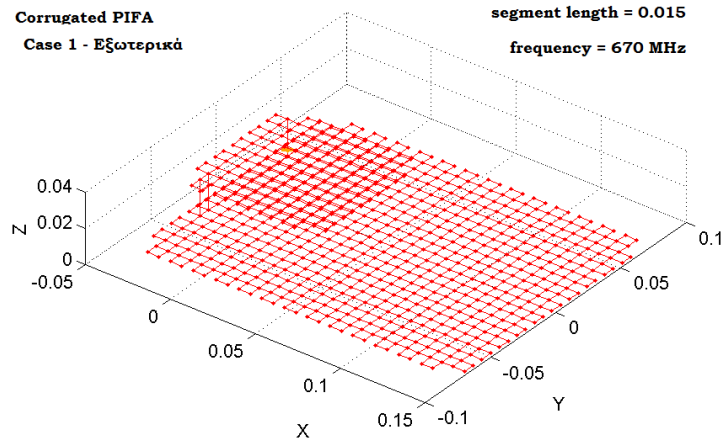


Σχήμα 6.49 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.015\lambda$  στο επίπεδο xz σε επίπεδη μορφή

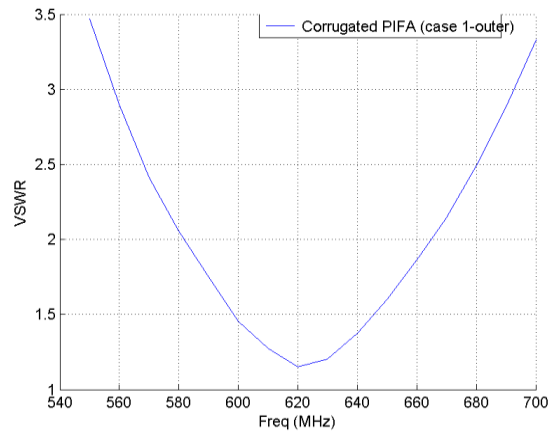


Σχήμα 6.50 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.015\lambda$

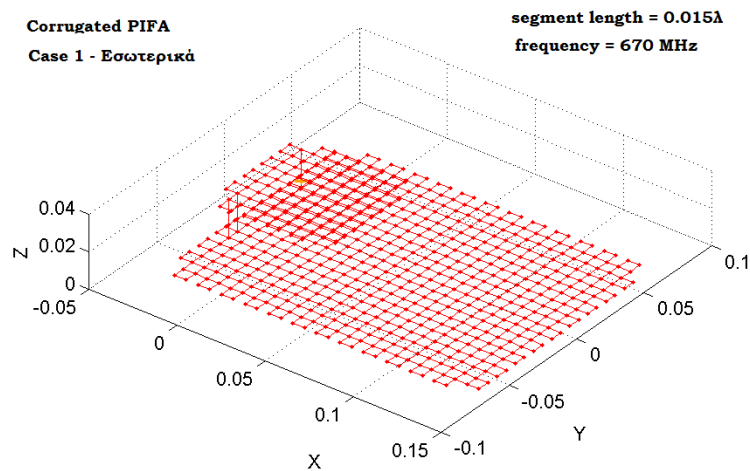
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δομές με σχισμές όπως υλοποιήθηκαν στο SuperNEC και ακριβώς κάτω από κάθε δομή το διάγραμμα του λόγου στάσιμων κυμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητα.



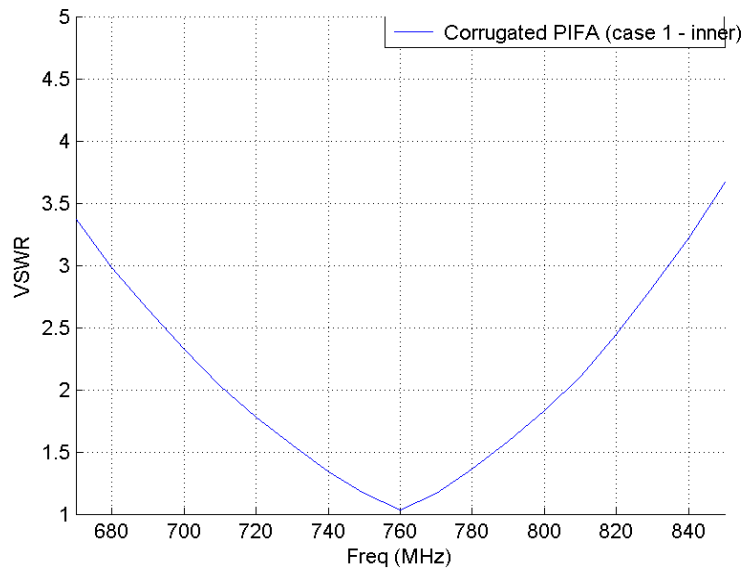
Σχήμα 6.51 Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)



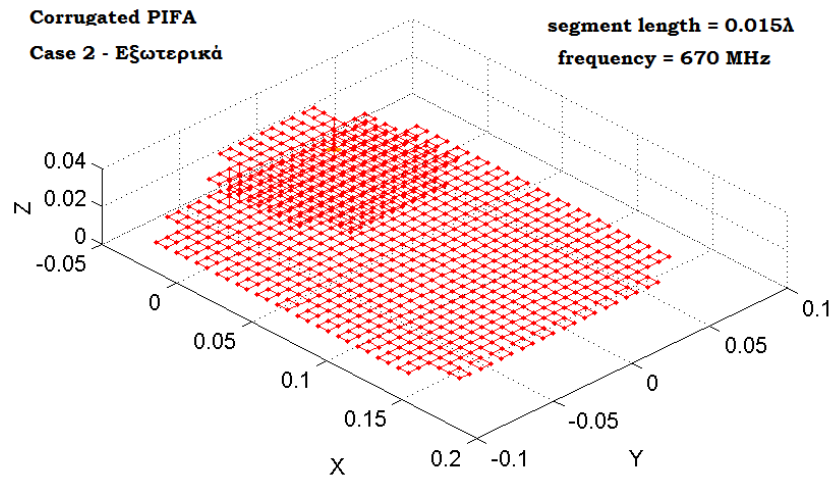
Σχήμα 6.52 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)



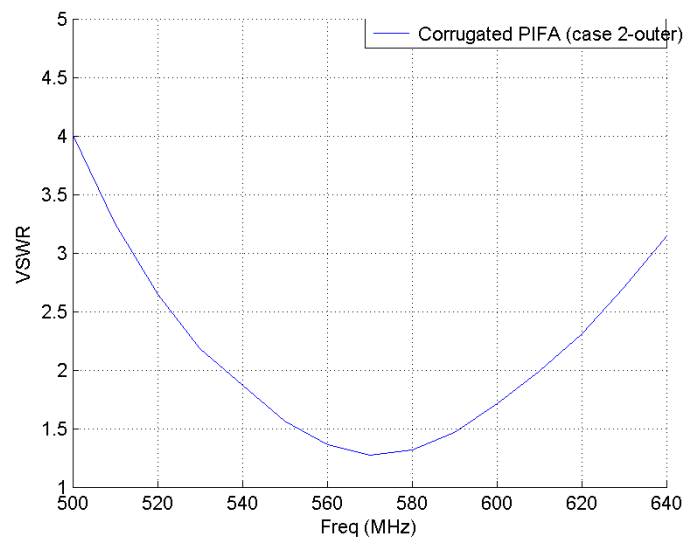
Σχήμα 6.53 Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)



Σχήμα 6.54 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)

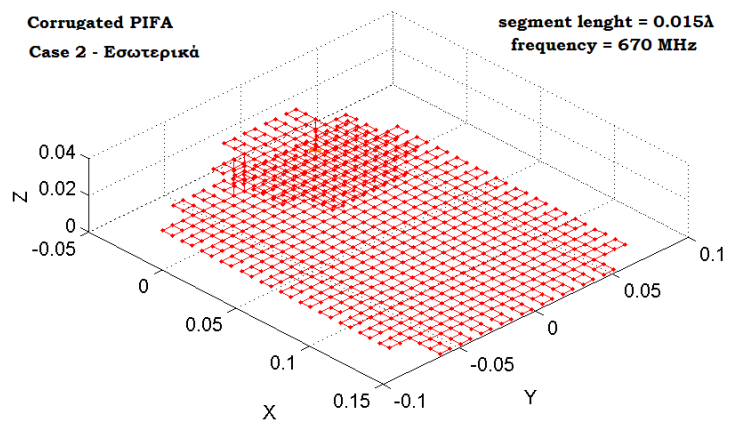


Σχήμα 6.55 Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2)

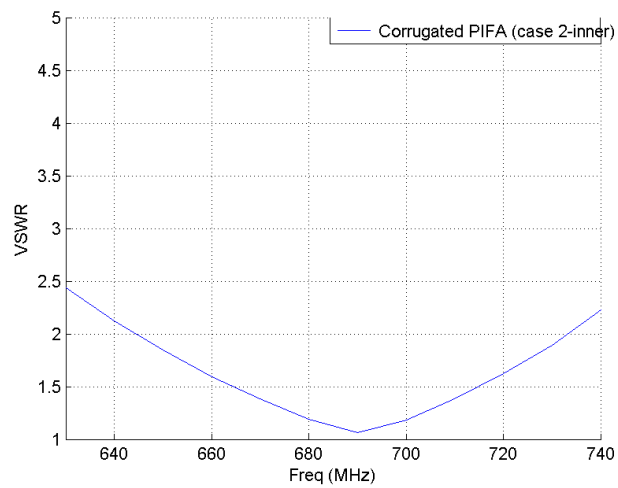


Σχήμα 6.56 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2)

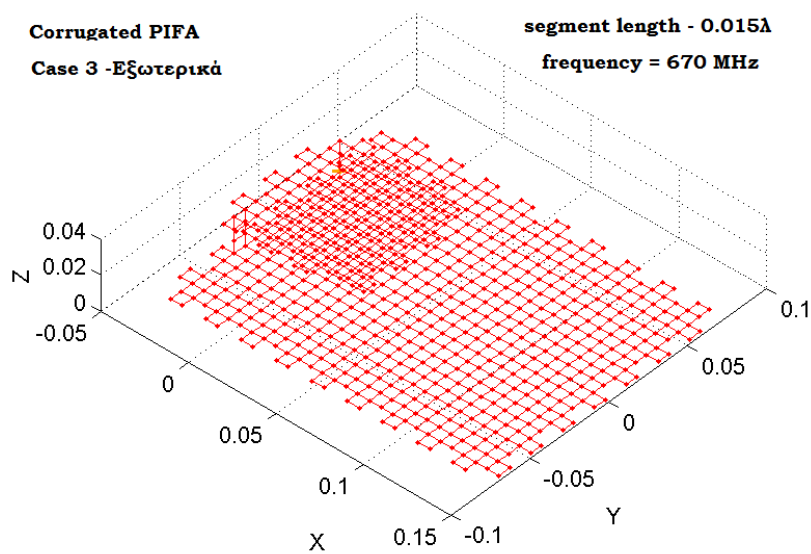




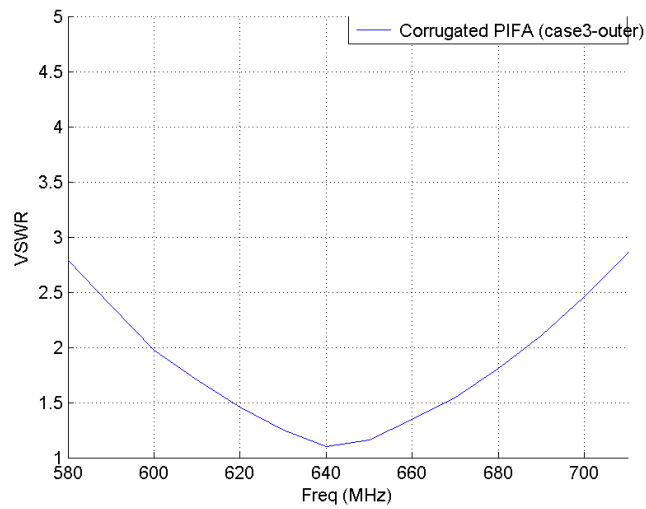
Σχήμα 6.57 Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές οχισμές (περίπτωση 2)



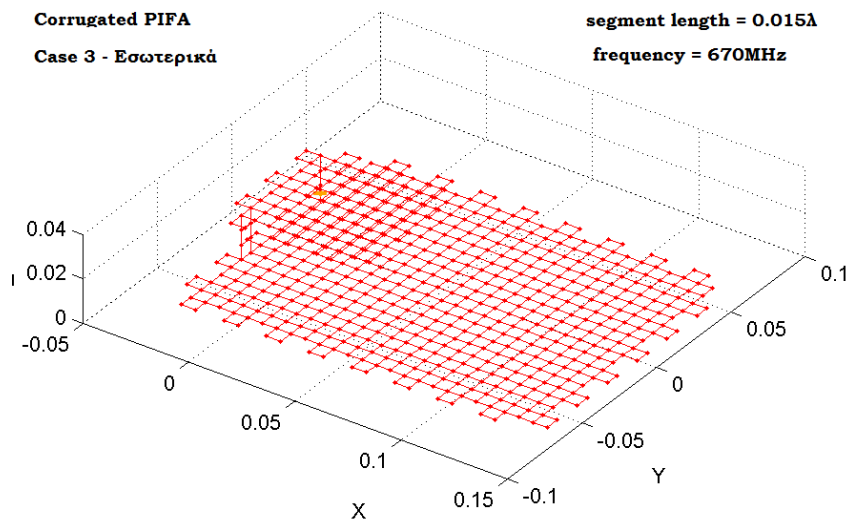
Σχήμα 6.58 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές οχισμές (περίπτωση 2)



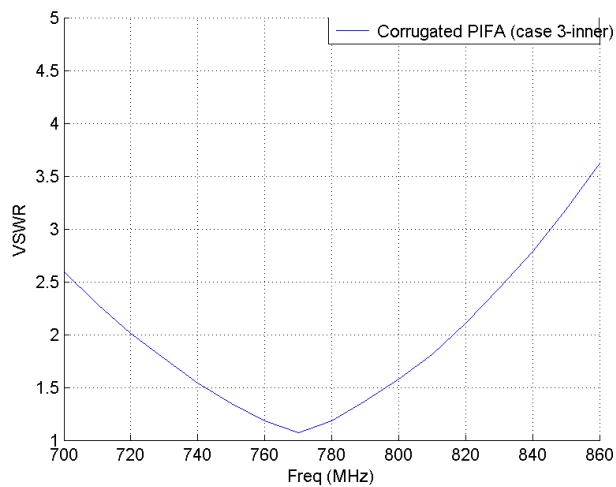
Σχήμα 6.59 Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές οχισμές (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.60 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.61 Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.62 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 3)

Στον πίνακα 6.10 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από τις δομές με οχισμές (είτε εσωτερικές είτε εξωτερικές) που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα. Καταγράφεται η ελάχιστη τιμή για το VSWR που εμφανίζει η κάθε κεραία και σε ποια συχνότητα συμβαίνει αυτό, το κέρδος στη συχνότητα αυτή καθώς επίσης και οι συχνότητες που λαμβάνει η κεραία.

Πίνακας 6.10 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές που μελετήθηκαν για  $segment\ length = 0.015\lambda$

Κεραία	Ελάχιστο VSWR	Κέρδος [dBi]	Εύρος Ζώνης [MHz]	Συχνότητες Λειτουργίας
<b>Normal PIFA</b>	1.0335 (670 MHz)	3.3	90 MHz	625 – 715 MHz
<b>Corrugated PIFA 111 (εξωτερικά)</b>	1.1506 (620 MHz)	3	85 MHz	580 – 665 MHz
<b>Corrugated PIFA 111(εσωτερικά)</b>	1.0354 (760 MHz)	3.2	100 MHz	710 – 810 MHz
<b>Corrugated PIFA 121(εξωτερικά)</b>	1.2732 (570 MHz)	2.9	80 MHz	530 – 610 MHz
<b>Corrugated PIFA 121 (εσωτερικά)</b>	1.0668 (690 MHz)	3	90 MHz	645 – 735 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εξωτερικά)</b>	1.1038 (640 MHz)	3.1	90 MHz	600 – 690 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εσωτερικά)</b>	1.0725 (770 MHz)	3.3	100 MHz	720 – 820 MHz

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πως για την Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές οχισμές υπάρχει μια μείωση στο μέγεθος τους εύρους ζώνης συγκριτικά με τη Normal PIFA, ενώ αντίθετα για τις εξωτερικές οχισμές υπάρχει μικρή αύξηση. Για τις εξωτερικές οχισμές παρουσιάζεται και χειρότερη προσαρμογή ενώ η συχνότητα που συμβαίνει αυτό είναι χαμηλότερη, γεγονός που εξηγεί και τη μετατόπιση προς τα κάτω στις συχνότητες λήψης καλύπτοντας τα κανάλια 34 – 44 της ψηφιακής επίγειας τηλεόρασης. Αντίθετα, για τις εσωτερικές οχισμές το ελάχιστο VSWR που παρουσιάζει η διάταξη είναι στα ίδια χαμηλά επίπεδα με της Normal PIFA, μόνο που και εδώ υπάρχει μετατόπιση στη συχνότητα που συμβαίνει αυτό καθώς είναι υψηλότερη. Το ίδιο ισχύει και για το εύρος ζώνης της Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές οχισμές.

Για την περίπτωση της Corrugated 121 φαίνεται να υπάρχει μια πτώση στο μέγεθος του εύρους ζώνης για εξωτερικές οχισμές, ενώ για εσωτερικές παρουσιάζεται το ίδιο εύρος ζώνης. Υπάρχει και εδώ η αντίστοιχη μετατόπιση του εύρους ζώνης, ως προς την κεντρική συχνότητα προς τα κάτω για την περίπτωση των εσωτερικών οχισμών και ελαφρώς προς τα πάνω για την περίπτωση των εσωτερικών. Παρατηρείται ακόμα χειρότερη προσαρμογή για την περίπτωση των εξωτερικών οχισμών, ενώ για την περίπτωση των εσωτερικών και πάλι ο ελάχιστος λόγος στάσιμων κυμάτων είναι στα ίδια επίπεδα με της Normal PIFA.

Για την τελευταία περίπτωση της Corrugated PIFA 211 και τα δύο σενάρια οχισμών λειτουργούν καλά στην κεραία καθώς με τις εξωτερικές

η διάταξη παρουσιάζει το ίδιο εύρος ζώνης με τη Normal PIFA, μετατοπισμένη όμως κεντρική συχνότητα του διαστήματος προς τα κάτω. Αντίθετα στην περίπτωση των εσωτερικών σχισμών υπάρχει αύξηση του bandwidth κατά 10 MHz (επί της ουσίας επιτυγχάνεται η λήψη ενός ακόμα καναλιού ψηφιακής τηλεόρασης), με ταυτόχρονη μετατόπιση του σε υψηλότερες συχνότητες.

#### 6.4.4 Segment Length = 0.01λ

Επειδή στην προηγούμενη περίπτωση δεν υπήρξαν τα ζητούμενα αποτελέσματα έγινε μια ακόμα προσπάθεια για μήκος τμημάτων (segment length) ίσο με 0.01λ. Το εύρος τιμών των παραμέτρων της Normal PIFA που εξετάστηκε παρουσιάζεται στον πίνακα 6.11 που ακολουθεί:

*Πίνακας 6.11 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για segment length=0.01λ*

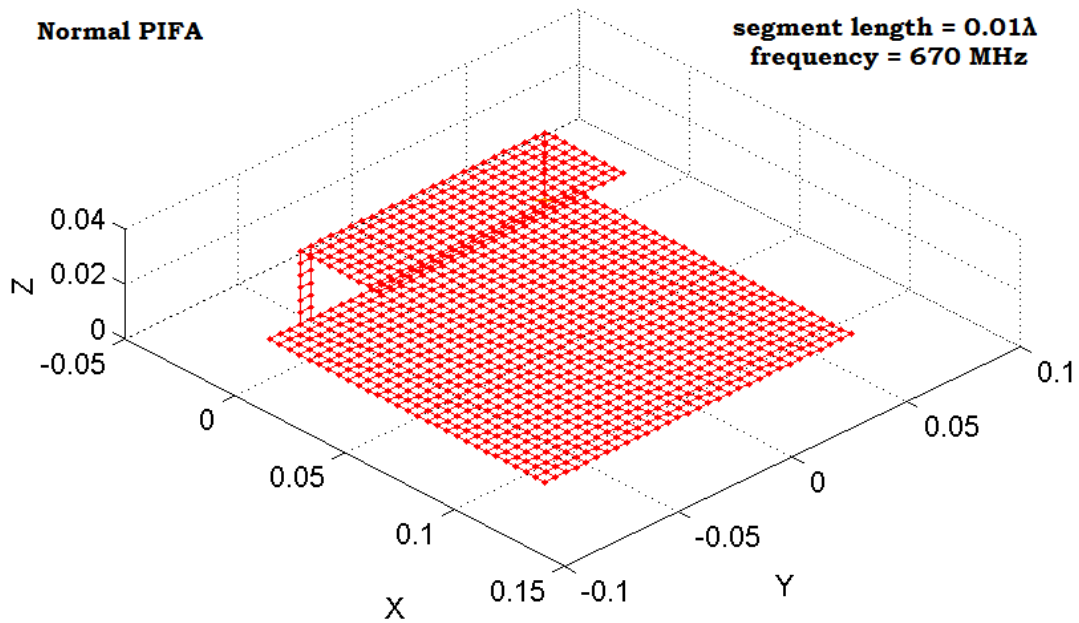
Μεταβλητή	Εύρος Τιμών	Βήμα	Αποτελέσματα
uplen	1seglen – 12seglen	1 seglen	4 seglen
upwid	1seglen – 12seglen	1 seglen	12 seglen
h	1seglen – 6seglen	1 seglen	6 seglen
addx	1seglen – 15seglen	1 seglen	10 seglen
addy	1seglen – 15seglen	1 seglen	3 seglen

Στον πίνακα 6.12 που έπεται καταγράφεται το πώς μεταφράζονται οι παραπάνω τιμές για τις μεταβλητές σε διαστάσεις για την κεραία.

*Πίνακας 6.12 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για segment length=0.01λ*

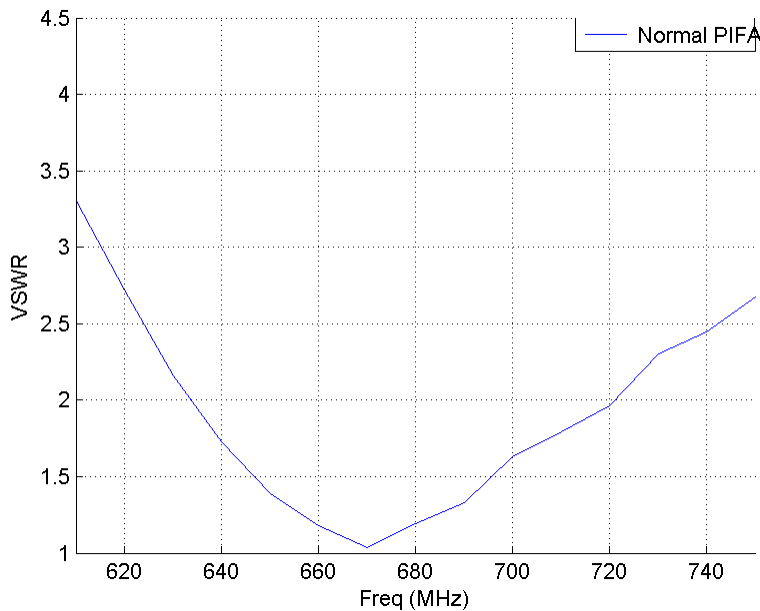
Διάσταση	Εύρος Τιμών	Αποτελέσματα
Μήκος Άνω Πλάκας	2seglen – 24seglen	8 seglen
Πλάτος Άνω Πλάκας	2seglen – 24seglen	24 seglen
Ύψος Άνω Πλάκας	1seglen – 6seglen	6 seglen
Μήκος Κάτω Πλάκας	4seglen – 54seglen	28 seglen
Πλάτος Κάτω Πλάκας	4seglen – 54seglen	30 seglen

Από τις τιμές που εκφράζουν τον αριθμό των τμημάτων που απαιτούνται για να υλοποιηθεί η κεραία, είναι εφικτό να υπολογιστούν και οι διαστάσεις της. Έτσι, από τη στιγμή που και αυτή η δομή είναι υλοποιημένη στα 670 MHz, και άρα το μήκος κύματος είναι 45 cm και το μήκος ενός segment είναι 0.01λ οι διαστάσεις της κεραίας είναι: 12.6 cm × 13.5 cm × 2.7 cm, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 6.61 που απεικονίζει την υλοποίησή της στο SuperNEC.



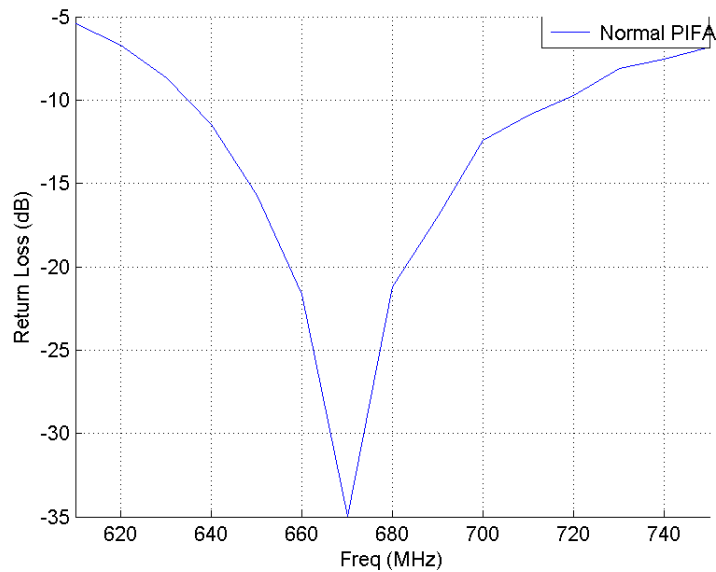
Σχήμα 6.63 Βελτιστοποιημένη δομή Normal PIFA για  $segment\ length=0.01\lambda$

Στο σχήμα 6.64 που ακολουθεί, φαίνεται πως και σε αυτή την περίπτωση η συνθήκη βελτιστοποίησης που είχε τεθεί πριν το γενετικό αλγόριθμο ( $VSWR = 1$ ) έχει ικανοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό καθώς στα 670 MHz η τιμή του λόγου στάσιμων κυμάτων είναι 1.0367. Το εύρος ζώνης από την άλλη είναι 90 MHz καθώς η διάταξη καλύπτει τις συχνότητες 630 – 720 MHz που αντιστοιχούν στα κανάλια 41-52 της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης.



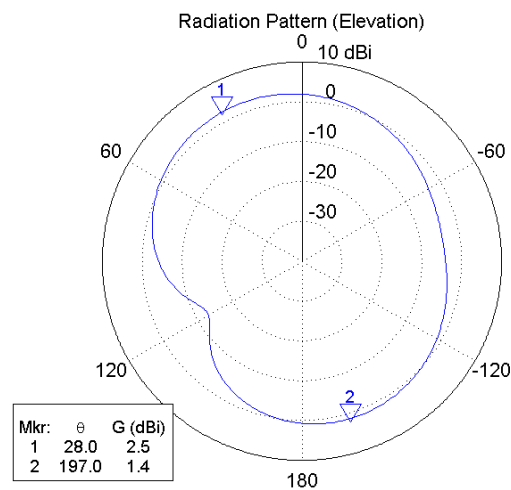
Σχήμα 6.64 Λόγος στάσιμων κυμάτων για βελτιστοποιημένη Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$

Στο σχήμα 6.65 που ακολουθεί φαίνεται πόσο χαμηλό είναι το επίπεδο των απωλειών ανάκλασης για τη συχνότητα των 670 MHz, όπου επιτυγχάνεται η προσαρμογή.

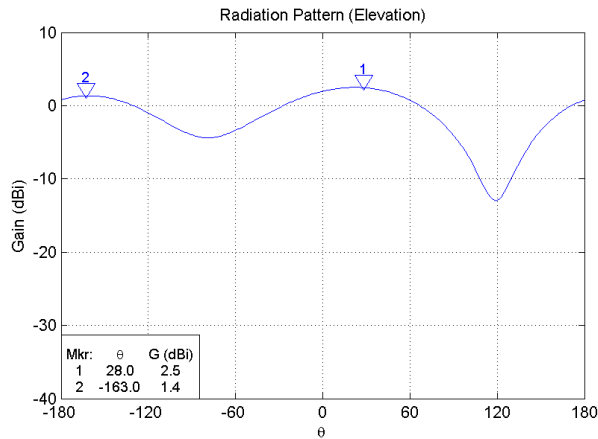


Σχήμα 6.65 Απώλειες ανάκλασης για βελτιστοποιημένη Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$

Στα επόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας φαίνεται ότι η συγκεκριμένη διάταξη παρουσιάζει κύριο λοβό στο επίπεδο xz, για  $\theta=28^\circ$  με απολαβή 2.5 dB ενώ αρκετά καλή απολαβή παρουσιάζει και ο οπίσθιος λοβός (1.4dB).

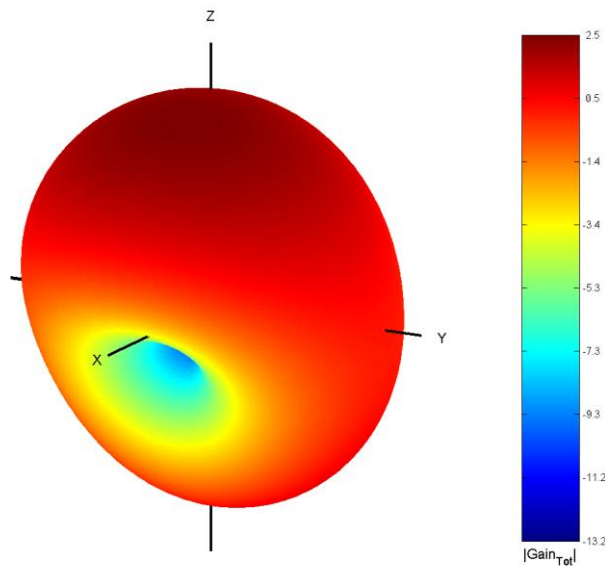


Σχήμα 6.66 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$  στο επίπεδο xz σε πολικές συντεταγμένες



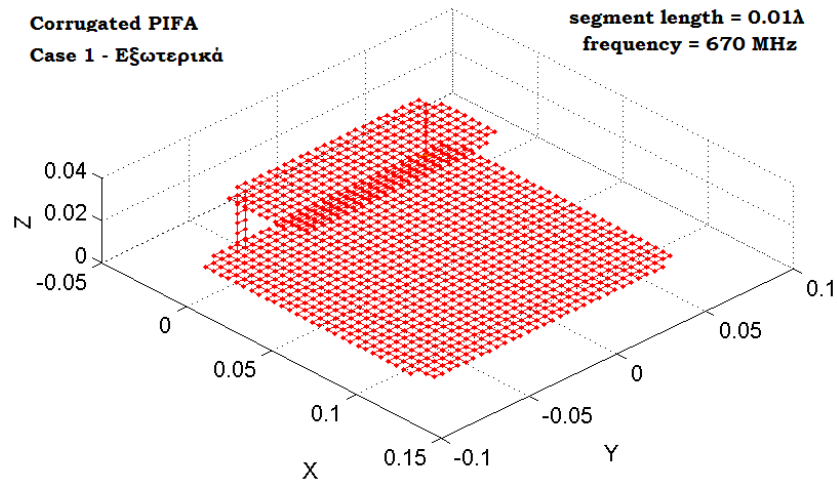
Σχήμα 6.67 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$  στο επίπεδο  $xz$  σε επίπεδη μορφή

Στο σχήμα 6.68 δίνεται σε τρισδιάστατη μορφή το διάγραμμα ακτινοβολίας για να γίνει περισσότερο κατανοητός ο τρόπος που ακτινοβολεί η κεραία ενώ από το χρωματικό κώδικα γίνεται εμφανές το μέγεθος της απολαβής προς κάθε κατεύθυνση.

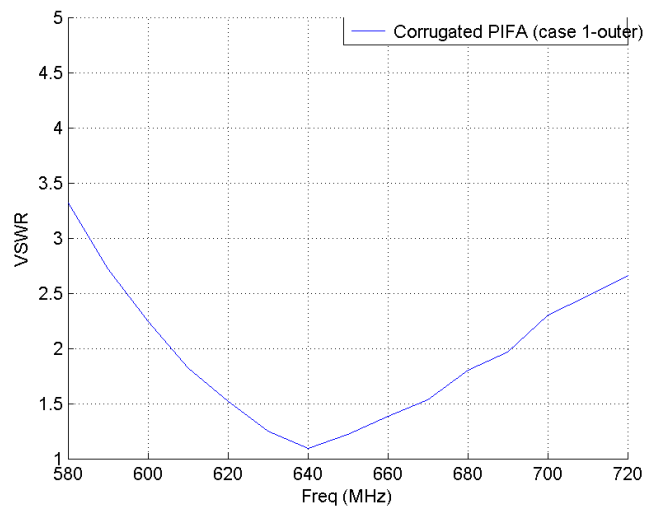


Σχήμα 6.68 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$

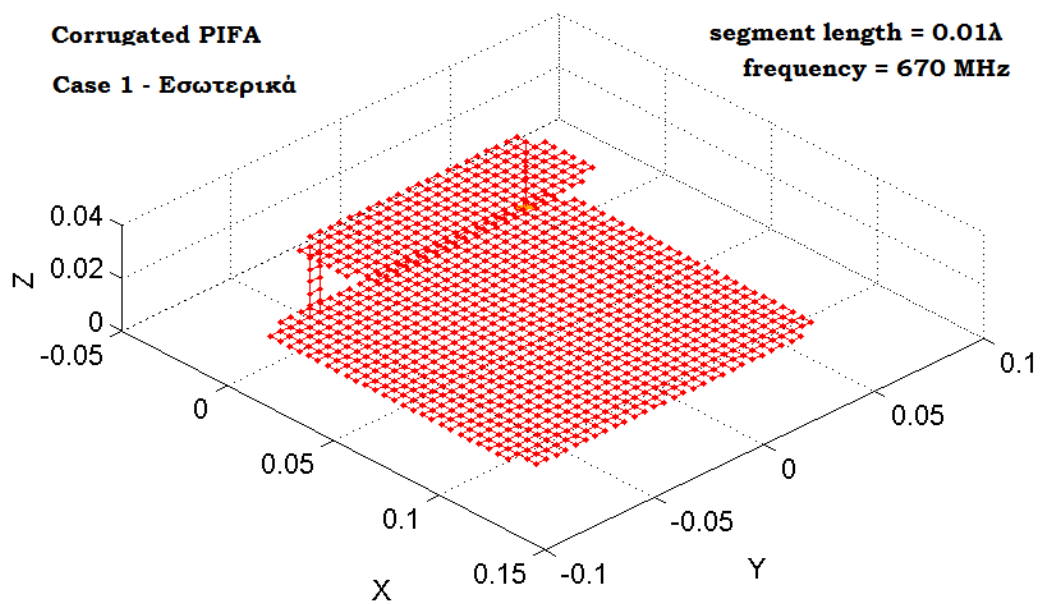
Εν συνεχεία, γίνεται εφαρμογή των σχισμών, όπως έχει περιγραφεί στην ενότητα 6.3 και προσομοιώνεται κάθε δομή που προκύπτει έτσι ώστε να μετρηθεί ο λόγος στάσιμων κυμάτων, για να εξαχθεί συμπέρασμα για το εύρος ζώνης τους.



Σχήμα 6.69 Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)

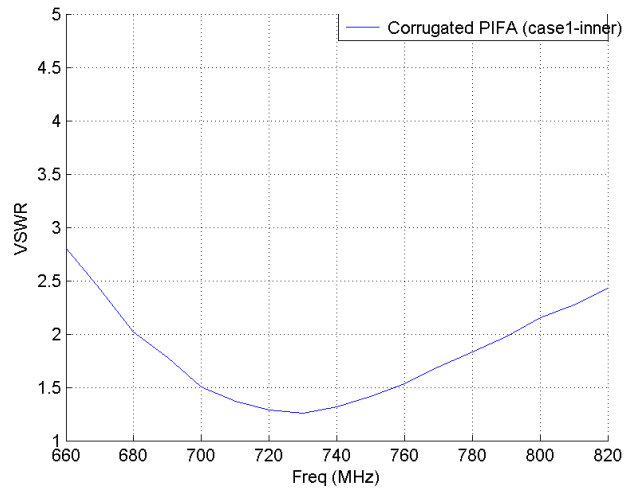


Σχήμα 6.70 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)

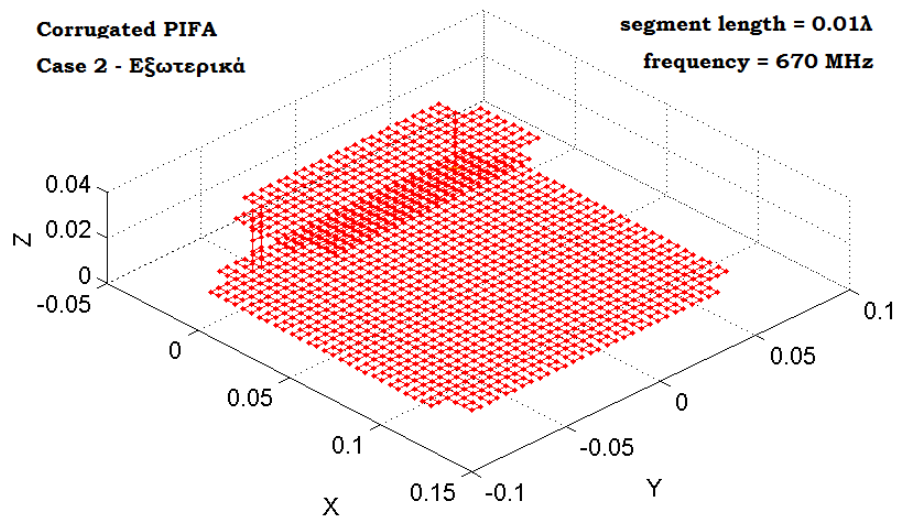


Σχήμα 6.71 Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)

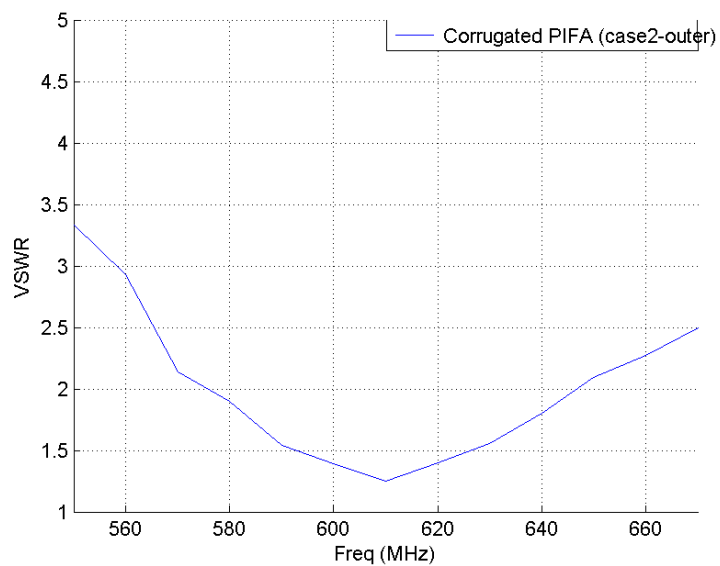




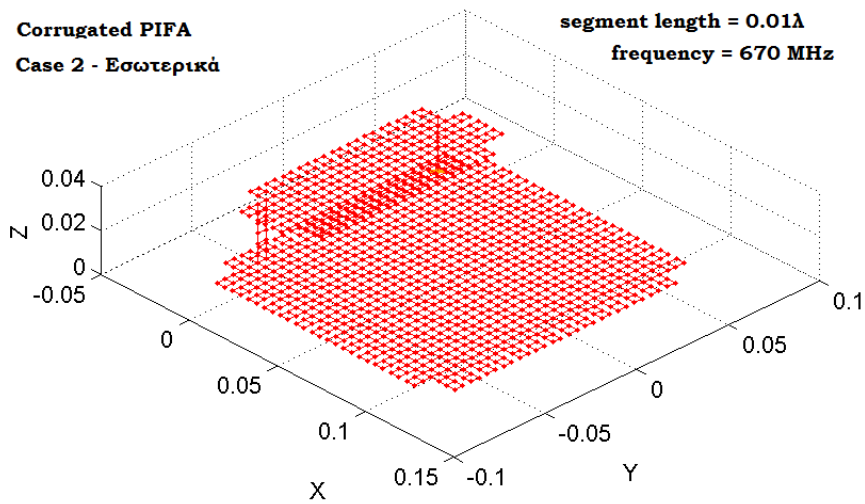
Σχήμα 6.72 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 1)



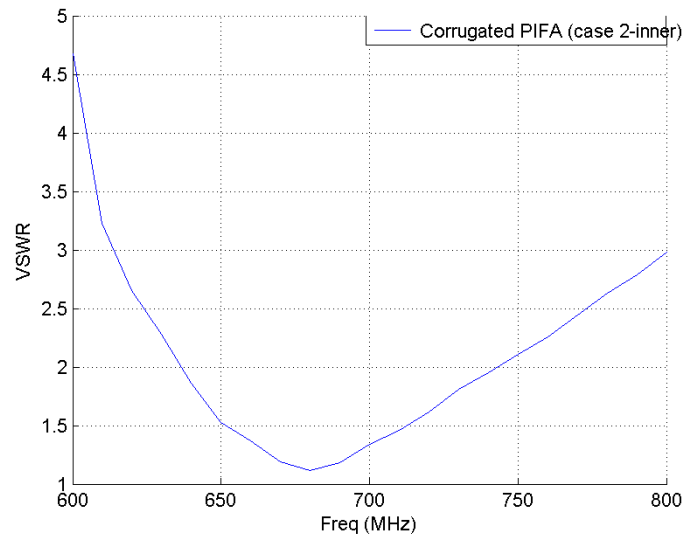
Σχήμα 6.73 Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2)



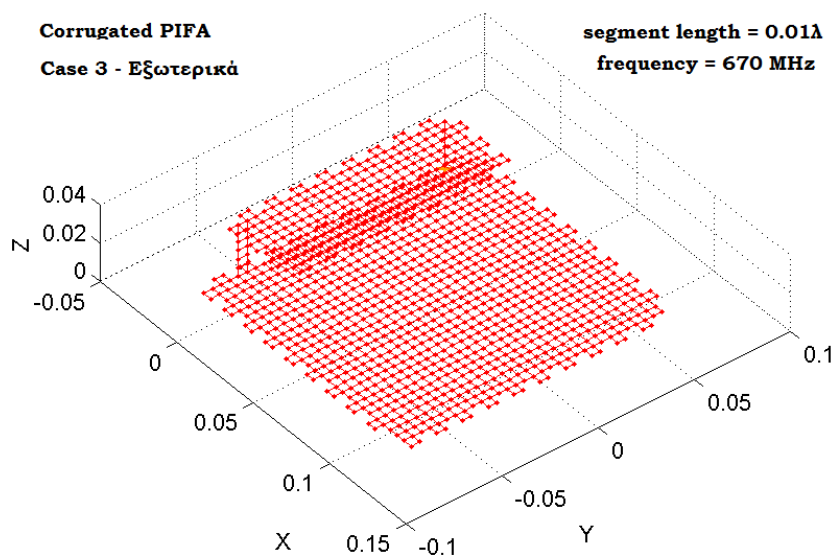
Σχήμα 6.74 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 2)



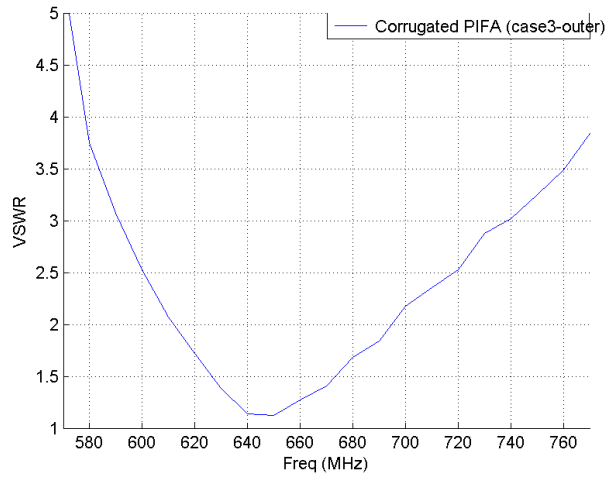
Σχήμα 6.75 Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2)



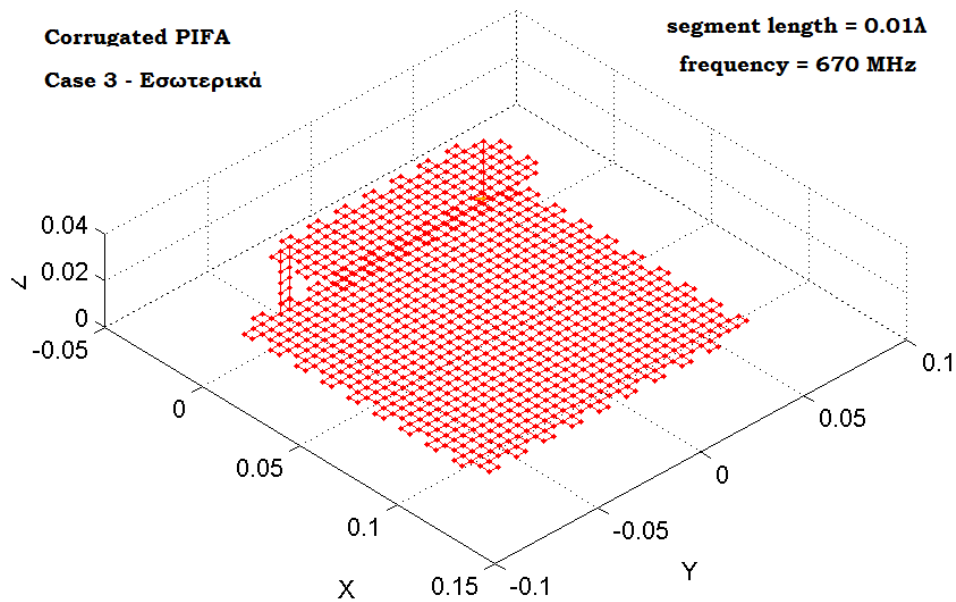
Σχήμα 6.76 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 2)



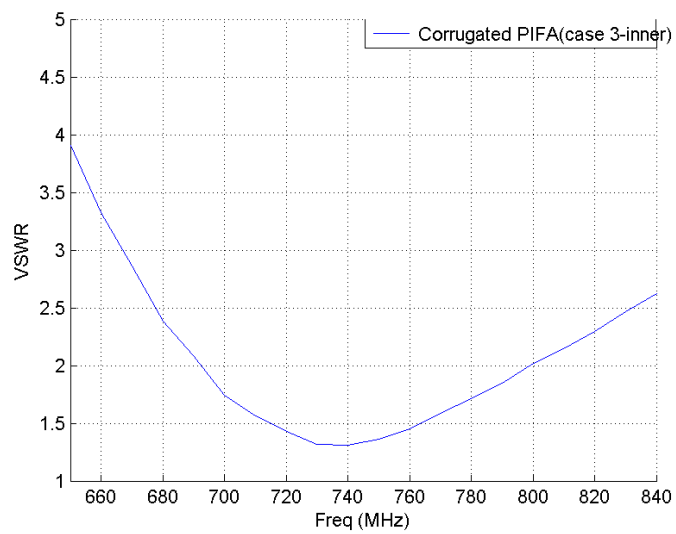
Σχήμα 6.77 Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.78 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές σχισμές (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.79 Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.80 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές σχισμές (περίπτωση 3)

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις παραπάνω δομές που αποτυπώνονται στα διαγράμματα, συνοψίζονται στον πίνακα 6.13. Τα μεγέθη που αναφέρονται σε αυτόν για κάθε διάταξη είναι η ελάχιστη τιμή του VSWR και σε ποια συχνότητα αυτή εμφανίζεται (προσαρμογή), το κέρδος της κεραίας στη συχνότητα συντονισμού, το εύρος ζώνης της και σε ποιες συχνότητες αυτό εκτείνεται.

Πίνακας 6.13 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές που μελετήθηκαν για  $segment\ length = 0.01\lambda$

Κεραία	Ελάχιστο VSWR	Κέρδος [dBi]	Εύρος Ζώνης [MHz]	Συχνότητες Λειτουργίας
<b>Normal PIFA</b>	1.0367 (670 MHz)	2.5	90 MHz	630 – 720 MHz
<b>Corrugated PIFA 111 (εξωτερικά)</b>	1.0942 (640 MHz)	2.3	85 MHz	605 – 690 MHz
<b>Corrugated PIFA 111 (εσωτερικά)</b>	1.2602 (730 MHz)	2.4	110 MHz	680 – 790 MHz
<b>Corrugated PIFA 121 (εξωτερικά)</b>	1.2483 (610 MHz)	2.3	70 MHz	575 – 645 MHz
<b>Corrugated PIFA 121 (εσωτερικά)</b>	1.1147 (680 MHz)	2.3	100 MHz	640 – 740 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εξωτερικά)</b>	1.1204 (650 MHz)	2.3	85 MHz	610 – 695 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εσωτερικά)</b>	1.3121 (740 MHz)	2.5	110 MHz	690 – 800 MHz

Αρχικά, για την Corrugated PIFA 111 με εξωτερικά corrugations, παρατηρείται μια μικρή μείωση στο εύρος ζώνης, το οποίο έχει μετατοπιστεί ελάχιστα προς πιο χαμηλές συχνότητες. Επίσης η ελάχιστη τιμή του VSWR είναι κοντά σε αυτή της Normal PIFA μόνο που αυτό εντοπίζεται σε χαμηλότερη συχνότητα, γεγονός που δικαιολογεί και τη μετατόπιση των συχνοτήτων λήψης. Αντίθετα, για τη Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές σχισμές, συμβαίνει μια αύξηση του εύρους ζώνης κατά 20 MHz, με αλλαγμένη και την κεντρική συχνότητα του διαστήματος προς τα πάνω. Παρόλη την αύξηση στο εύρος ζώνης η ελάχιστη τιμή του VSWR που εμφανίζεται είναι μεγαλύτερη από της Normal PIFA. Αναφορικά με την απολαβή και των σεναρίων για σχισμές στην Corrugated PIFA 111, εμφανίζεται μια μικρή μείωση και τις δύο περιπτώσεις σχισμών.

Εν συνεχεία, για την Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές σχισμές υπάρχει μια μείωση στο εύρος ζώνης, και η διάταξη λειτουργεί σε χαμηλότερες συχνότητες συγκριτικά με την Normal PIFA, ενώ και η ελάχιστη τιμή του λόγου στάσιμων κυμάτων είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα όταν εφαρμόζονται εσωτερικές σχισμές υπάρχει αύξηση του εύρους ζώνης και μετατόπισής του σε υψηλότερες συχνότητες, όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις.

Τα ίδια με τις παραπάνω περιπτώσεις ισχύουν και για την Corrugated PIFA 211. Το αξιοσημείωτο σε αυτή την περίπτωση είναι πως για εσωτερικές σχισμές υπάρχει αύξηση του εύρους ζώνης. Αυτό συμβαίνει

παρόλο που το ελάχιστο VSWR που εμφανίζεται είναι 1.3121, αυξημένο δηλαδή από το αντίστοιχο της Normal PIFA ενώ αυτό συμβαίνει σε υψηλότερη συχνότητα. Η Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές σχισμές λαμβάνει καλά στις συχνότητες 690 – 800 MHz που είναι το μεγαλύτερο κομμάτι του ψηφιακού μερίσματος όπως αυτό έχει αναπτυχθεί στη Αμερική και την Ασία.

#### 6.4.5 Segment Length = 0.01λ (Μία ακόμα περίπτωση)

Λόγω του γεγονότος ότι ούτε στην προηγούμενη περίπτωση είχαμε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά το εύρος ζώνης των δομών που αναπτύχθηκαν έγινε μια τελευταία προσπάθεια. Αυτή τη φορά το μήκος τμήματος (segment length) ήταν ίσο και πάλι με 0.01λ, όμως το εύρος των πιθανών τιμών για τις παραμέτρους ήταν διαφορετικό, όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.14. Αυτό έγινε διότι ο σκοπός ήταν να περιοριστούν οι πιθανές τιμές των μεταβλητών έτσι ώστε να πλησιάσουν οι διατάξεις που θα προκύψουν αυτή που είχε βγει με μήκος τμήματος 0.02λ και είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Απλά σε αυτή την περίπτωση η δομή που θα προκύψει θα αποτελείται από περισσότερα segments ενώ η οι σχισμές που θα εφαρμοστούν θα είναι πιο πολλές στον αριθμό σε κάθε πλευρά των δύο πλακών, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό μεγαλύτερες διαταραχές για τα ρεύματα που αναπτύσσονται.

Πίνακας 6.14 Παράμετροι Εισόδου και Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων για segment length=0.01λ

Μεταβλητή	Εύρος Τιμών	Βήμα	Αποτελέσματα
uplen	6seglen – 10seglen	1seglen	6seglen
upwid	10seglen – 15seglen	1seglen	10seglen
h	4seglen – 7seglen	1seglen	4seglen
addx	7seglen – 12seglen	1seglen	12seglen
addy	1seglen – 5seglen	1seglen	2seglen

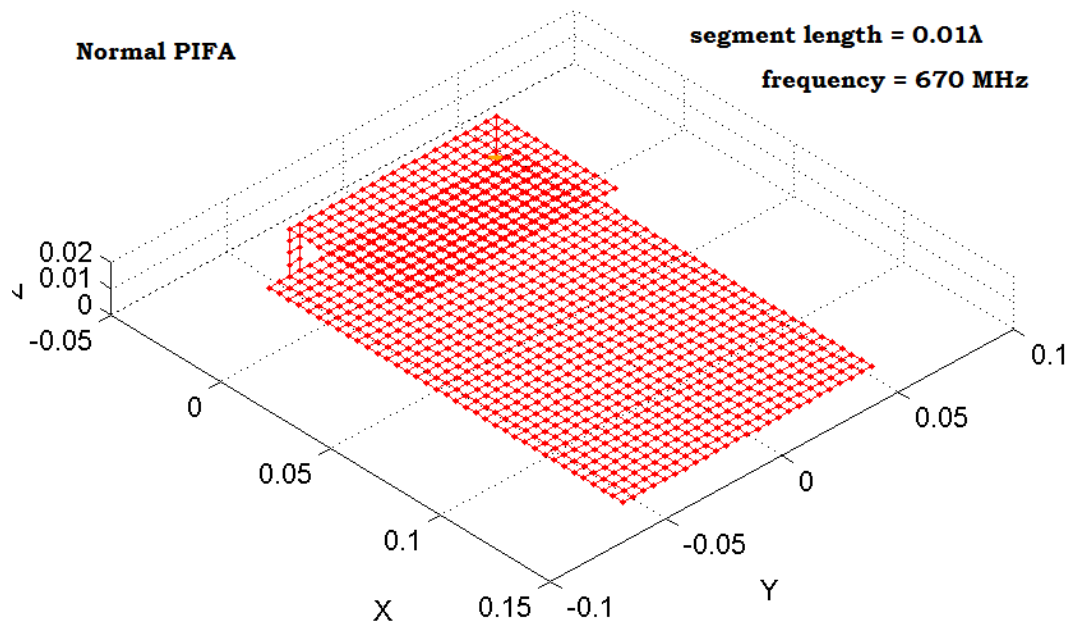
Στον πίνακα 6.15 που έπεται καταγράφεται το πώς μεταφράζονται οι παραπάνω τιμές για τις μεταβλητές σε διαστάσεις για την κεραία.

Πίνακας 6.15 Εύρος τιμών διαστάσεων και αποτελέσματα για τη βελτιστοποιημένη κεραία για segment length=0.01λ

Διάσταση	Εύρος Τιμών	Αποτελέσματα
Μήκος Άνω Πλάκας	12seglen – 20seglen	12 seglen
Πλάτος Άνω Πλάκας	20seglen – 30seglen	20 seglen
Ύψος της Άνω Πλάκας	4 seglen – 7 seglen	4 seglen
Μήκος της Κάτω Πλάκας	26seglen – 44seglen	36 seglen
Πλάτος της Κάτω Πλάκας	22seglen – 40seglen	24 seglen

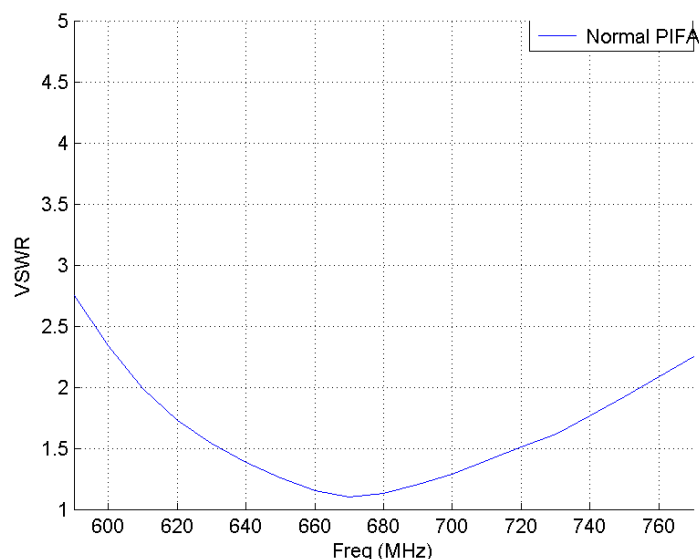
Από τις τιμές που εκφράζουν τον αριθμό των τμημάτων που απαιτούνται για να υλοποιηθεί η κεραία, είναι εφικτό να υπολογιστούν και οι διαστάσεις της. Έτσι, από τη στιγμή που και αυτή η δομή είναι υλοποιημένη στα 670 MHz, και άρα το μήκος κύματος είναι 45 cm και το μήκος ενός segment είναι 0.01λ οι διαστάσεις της κεραίας είναι:

16.2 cm × 10.8 cm × 1.8 cm, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 6.81 που απεικονίζει την υλοποίησή της στο SuperNEC.



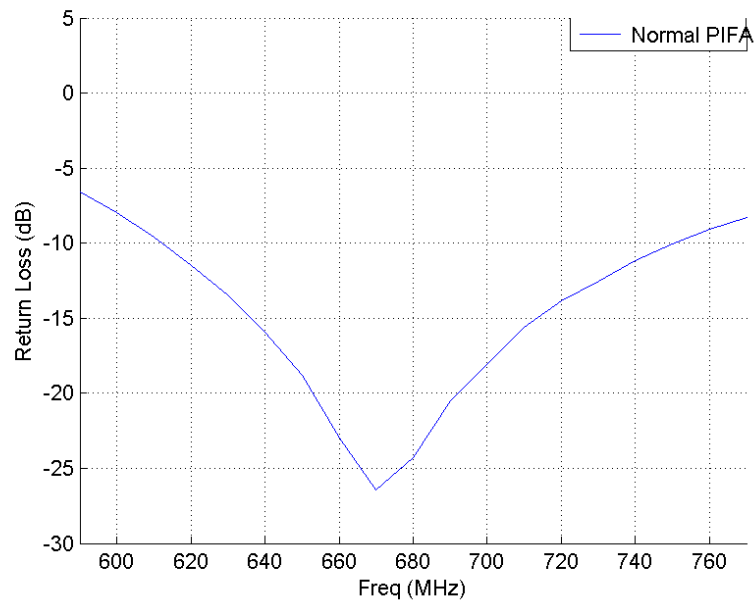
Σχήμα 6.81 Βελτιστοποιημένη δομή Normal PIFA για  $segment\ length=0.01\lambda$

Στο σχήμα 6.82 απεικονίζεται η γραφική παράσταση του λόγου στάσιμων κυμάτων σε συνάρτηση με την συχνότητα. Η συνθήκη βελτιστοποίησης για  $VSWR=1$  έχει ικανοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό καθώς για τα 670 MHz ο λόγος στάσιμων κυμάτων ισούται με 1.1004. Το εύρος ζώνης της βελτιστοποιημένης Normal PIFA είναι 145 MHz καλύπτοντας τις συχνότητες 610 – 755 MHz, δηλαδή τα κανάλια 38 – 56 της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης.



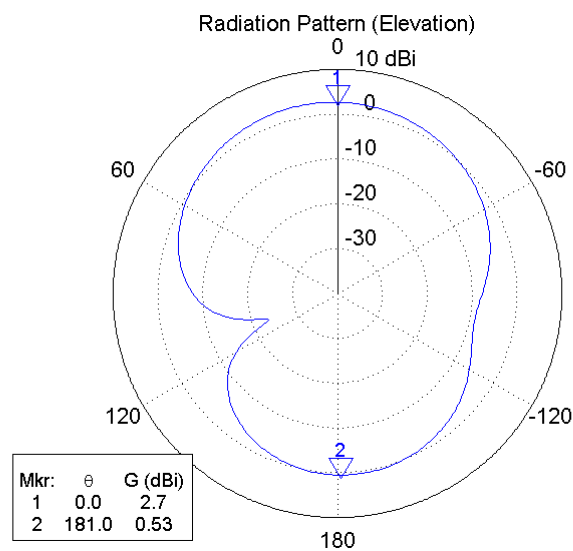
Σχήμα 6.82 Λόγος στάσιμων κυμάτων για βελτιστοποιημένη Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$

Στο σχήμα 6.83 παρουσιάζονται οι απώλειες ανάκλασης λόγω κακής προσαρμογής, σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

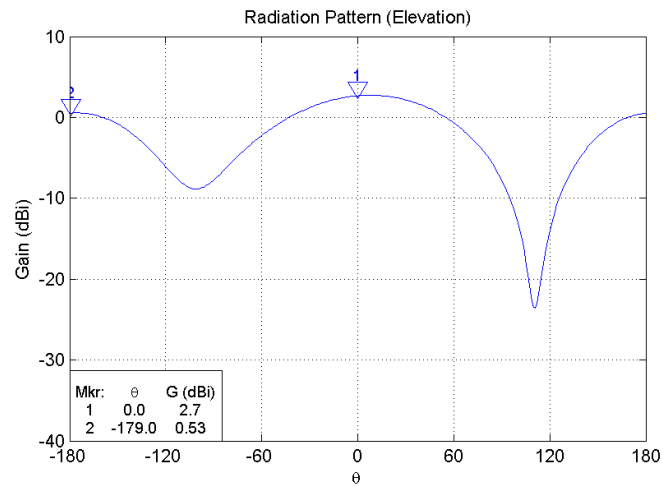


Σχήμα 6.83 Απώλειες ανάκλασης για βελτιστοποιημένη Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$

Στα διαγράμματα ακτινοβολίας που ακολουθούν φαίνεται ότι η διάταξη που προέκυψε από το γενετικό αλγόριθμο παρουσιάζει ένα κύριο λοβό ακτινοβολίας στο επίπεδο xz για  $\theta=0^\circ$  με απολαβή 2.7 dBi.

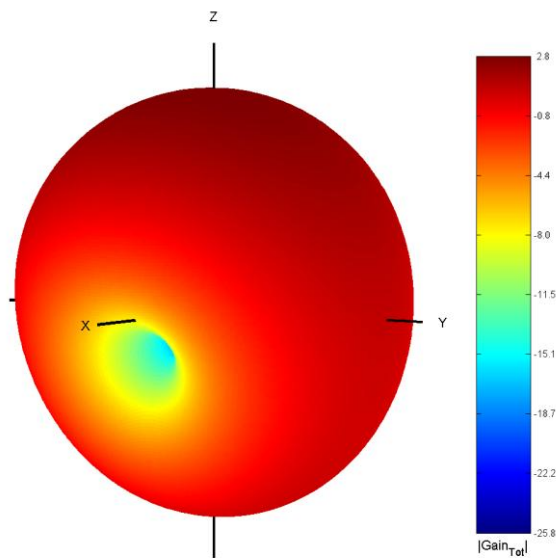


Σχήμα 6.84 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$  στο επίπεδο xz σε πολικές συντεταγμένες



Σχήμα 6.85 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$  στο επίπεδο  $xz$  σε επίπεδη μορφή

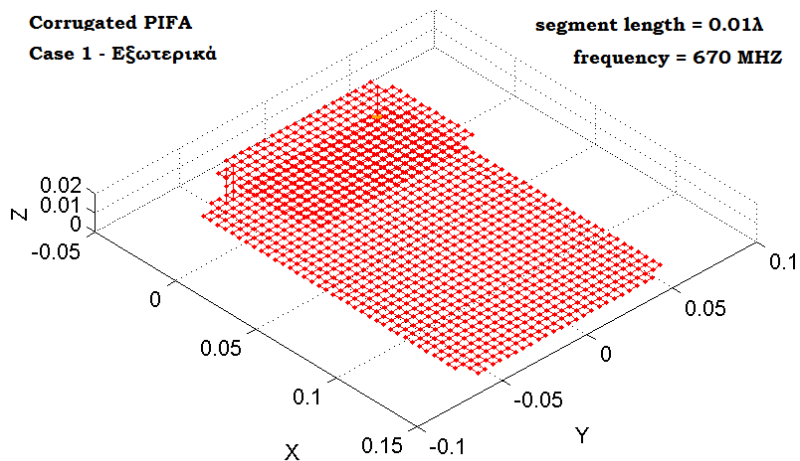
Στο σχήμα 6.86 φαίνεται το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για να είναι περισσότερο ευδιάκριτο πώς αλλάζει το κέρδος της κεραίας στις κάθε κατεύθυνση.



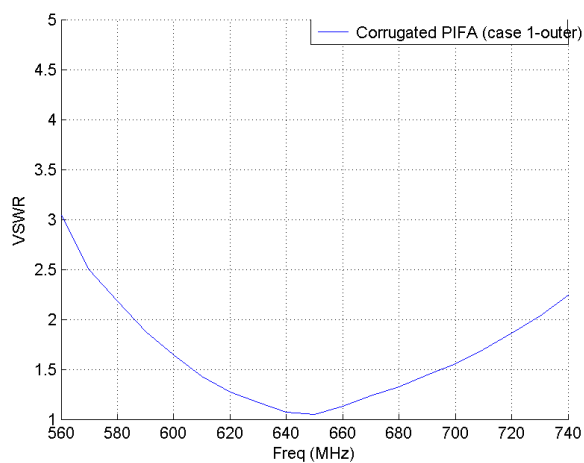
Σχήμα 6.86 Τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας για Normal PIFA με  $segment\ length=0.01\lambda$

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μέσω σχημάτων οι δομές με σχισμές που έχουν σαν βάση τη βελτιστοποιημένη Normal PIFA.

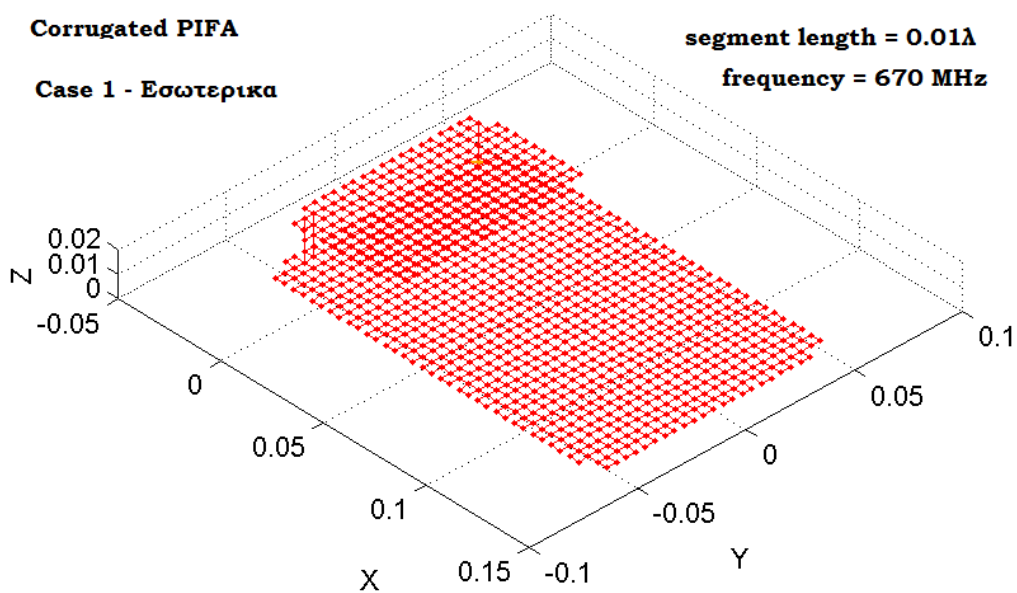




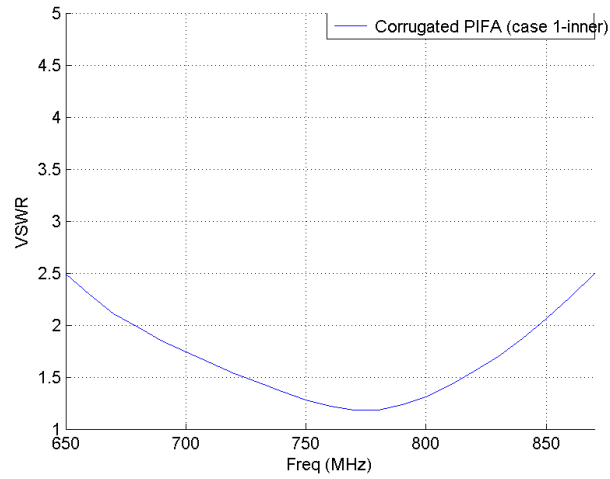
Σχήμα 6.87 Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές οχιμές (περίπτωση 1)



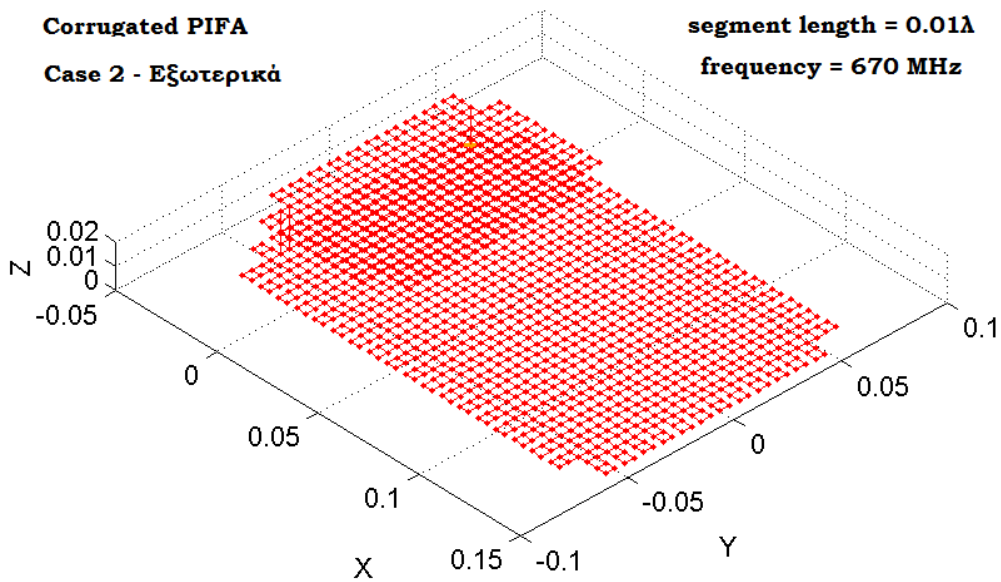
Σχήμα 6.88 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές οχιμές (περίπτωση 1)



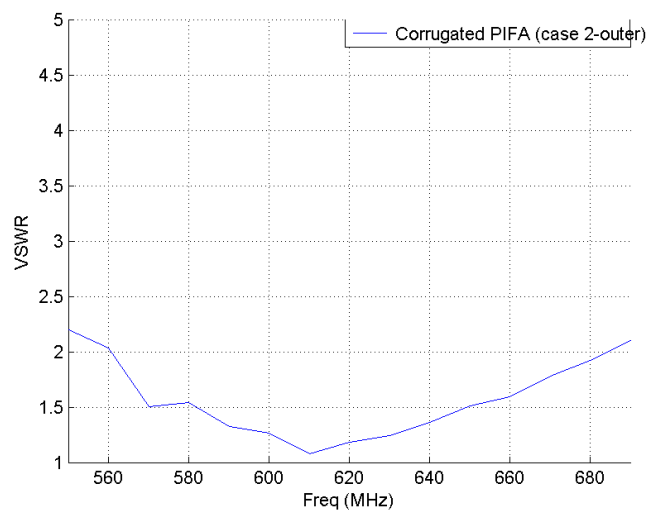
Σχήμα 6.89 Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές οχιμές (περίπτωση 1)



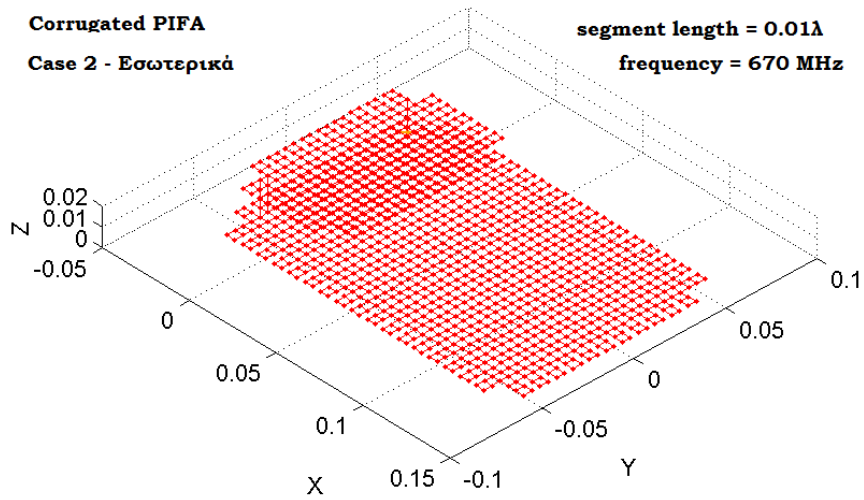
Σχήμα 6.90 VSWR για Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 1)



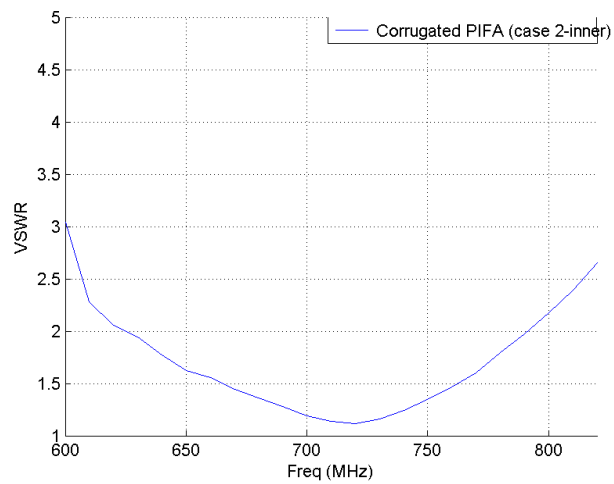
Σχήμα 6.91 Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 2)



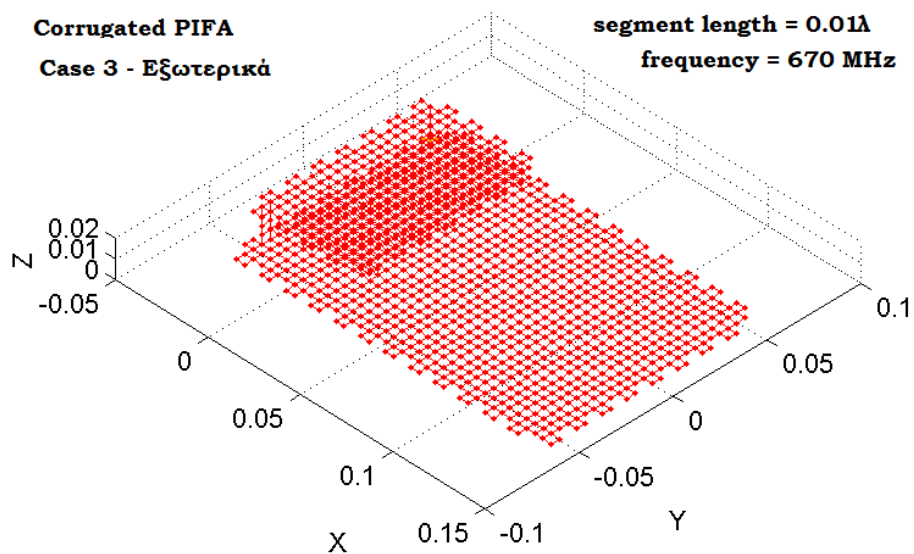
Σχήμα 6.92 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εξωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 2)



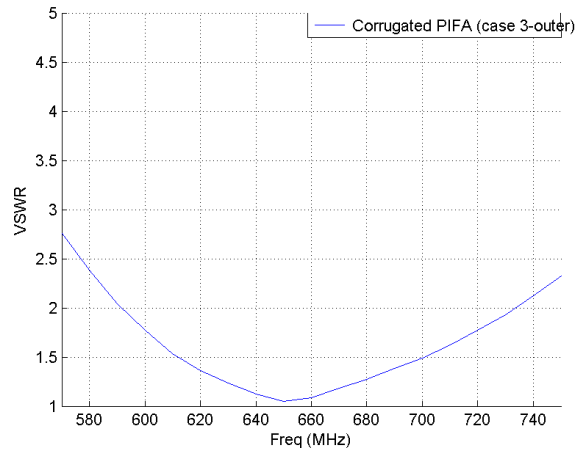
Σχήμα 6.93 Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 2)



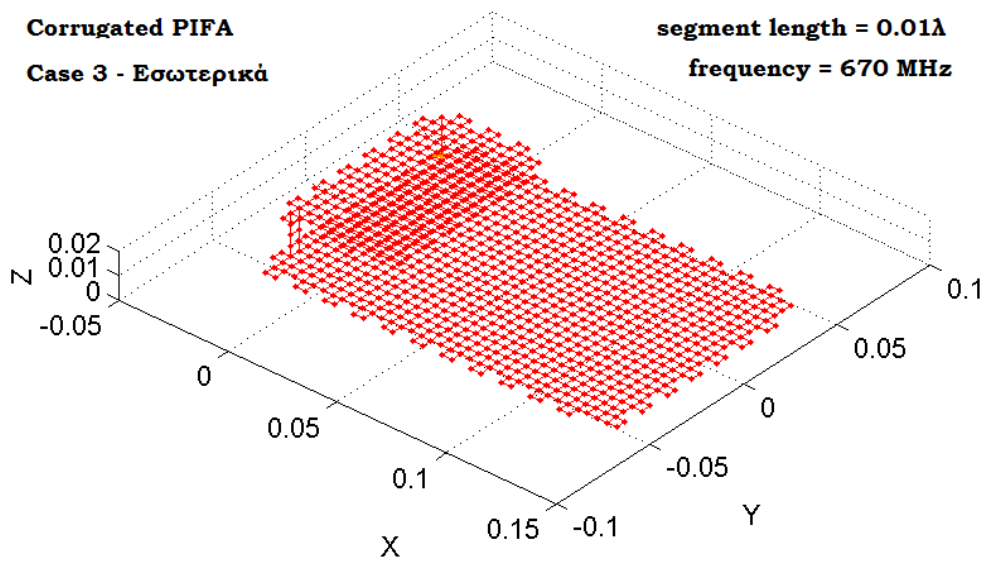
Σχήμα 6.94 VSWR για Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 2)



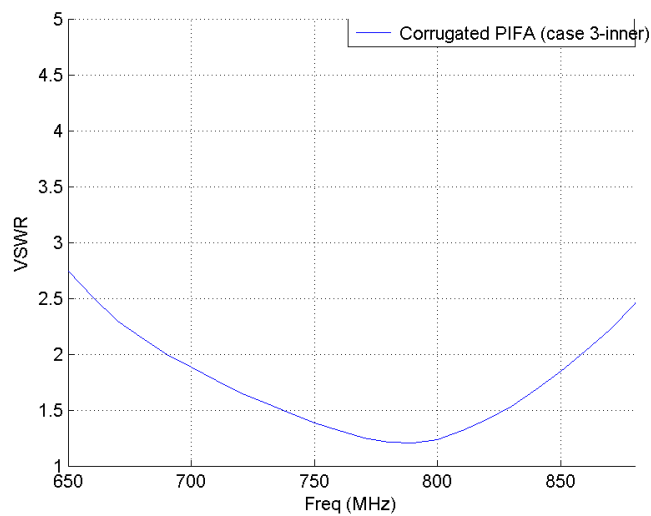
Σχήμα 6.95 Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές ομοιότητες (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.96 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εξωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.97 Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 3)



Σχήμα 6.98 VSWR για Corrugated PIFA 211 με εσωτερικές ομοιομορφίες (περίπτωση 3)

Τα αποτελέσματα για όλες τις παραπάνω δομές συνοψίζονται στον πίνακα 6.16. Εκεί καταγράφονται το ελάχιστο VSWR για κάθε δομή και σε ποια συχνότητα εμφανίζεται αυτό, η απολαβή της κεραίας σε αυτή τη συχνότητα, το εύρος ζώνης, καθώς επίσης και τις συχνότητες που αυτό εκτείνεται.

Πίνακας 6.16 Συγκριτικές τιμές για τις διάφορες δομές που μελετήθηκαν για  $segment\ length = 0.01\lambda$

Κεραία	Ελάχιστο VSWR	Κέρδος [dBi]	Εύρος Ζώνης [MHz]	Συχνότητες Λειτουργίας
<b>Normal PIFA</b>	1.1004 (670 MHz)	2.7	145 MHz	610 – 755 MHz
<b>Corrugated PIFA 111 (εξωτερικά)</b>	1.0461 (650 MHz)	2.6	145 MHz	585 – 730 MHz
<b>Corrugated PIFA 111 (εσωτερικά)</b>	1.1812 (770 MHz)	2.9	170 MHz	680 – 850 MHz
<b>Corrugated PIFA 121 (εξωτερικά)</b>	1.0803 (610 MHz)	2.4	125 MHz	560 – 685 MHz
<b>Corrugated PIFA 121 (εσωτερικά)</b>	1.1131 (720 MHz)	2.8	170 MHz	620 – 790 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εξωτερικά)</b>	1.0501 (650 MHz)	2.6	145 MHz	590 – 735 MHz
<b>Corrugated PIFA 211 (εσωτερικά)</b>	1.2069 (790 MHz)	3	170 MHz	690 – 860 MHz

Σχετικά με την Corrugated PIFA 111 με εξωτερικές οχισμές παρατηρείται μείωση της ελάχιστης τιμής του VSWR, ενώ παράλληλα το μέγεθος του εύρους ζώνης παραμένει σταθερό, απλά είναι μετατοπισμένο προς χαμηλότερες συχνότητες. Η διάταξη αυτή καλύπτει τα κανάλια 35 – 53 της ψηφιακής τηλεόρασης. Η Corrugated PIFA 111 με εσωτερικές οχισμές παρουσιάζει ελάχιστο λόγο στάσιμων κυμάτων στα ίδια επίπεδα με την Normal PIFA, απλά αυτό συμβαίνει σε υψηλότερη συχνότητα. Επίσης, για αυτή τη διάταξη παρατηρείται μια καλή αύξηση στο εύρος ζώνης, το οποίο είναι μετατοπισμένο προς υψηλότερες συχνότητες, καλύπτοντας τη ζώνη 680 – 850. Αυτό το γεγονός είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο, καθώς με αυτή τη διάταξη μπορεί να καλυφθεί το εύρος του ψηφιακού μερίσματος όπως αυτό ορίζεται την Αμερική και την Ασία (698 – 862 MHz), αλλά και στην Ευρώπη (790 – 862 MHz). Επίσης υπάρχει μια αύξηση στην απολαβή της κεραίας αυτής.

Για την Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές οχισμές, φαίνεται πως υπάρχει μια μείωση στο εύρος ζώνης, με καλύτερη προσαρμογή στη συχνότητα των 610 MHz. Επίσης, όπως σε προηγούμενες περιπτώσεις με εξωτερικές οχισμές υπάρχει μια μετατόπιση προς τα κάτω για τις συχνότητες λήψης, ενώ και η απολαβή της διάταξης μειώνεται. Η Corrugated PIFA 121 με εσωτερικές οχισμές, όμως, είναι βελτιωμένη συγκριτικά με το μέγεθος του εύρους ζώνης, καθώς αυτή η κεραία έχει 170 MHz στις συχνότητες 620 – 790 MHz, καλύπτοντας τα κανάλια 39 – 60 της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης. Επίσης, υπάρχει μια μικρή αύξηση στο κέρδος της κεραίας, ενώ το ελάχιστο VSWR είναι παρόμοιο με της Normal PIFA.

Τέλος, αναφορικά με την Corrugated PIFA 211 με εξωτερικά corrugations, εμφανίζεται το ίδιο εύρος ζώνης απλά μετατοπισμένο σε χαμηλότερες συχνότητες (590 – 735 MHz) με κεντρική συχνότητα που εμφανίζεται το ελάχιστο VSWR στα 650 MHz. Η διάταξη αυτή καλύπτει τα κανάλια 36 -53 της ζώνης, ενώ στη συχνότητα προσαρμογής εμφανίζει καλύτερη προσαρμογή, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες ανάκλασης. Για την κεραία Corrugated PIFA 211, υπάρχει αύξηση του εύρους ζώνης, το οποίο φτάνει τα 170 MHz, καλύπτοντας τις συχνότητες 690 – 860 MHz (κανάλια 48 – 69 της ζώνης UHF). Η διάταξη αυτή, λοιπόν είναι ικανή να ικανοποιήσει τις ανάγκες κάλυψης του ψηφιακού μερίσματος τόσο στην Αμερική και Ασία (698 – 860 MHz) όσο και στην Ευρώπη (790 – 860 MHz). Επίσης παρουσιάζει απολαβή 3 dBi, αυξημένη με την αντίστοιχη της Normal PIFA, που κρίνεται ικανοποιητική για σταθερή λήψη.

## 6.5 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση των σχισμών ή πτυχώσεων (Corrugations) για τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται από το πρότυπο DVB-T (470 – 862 MHz). Εξετάστηκαν, αναλυτικά διάφορες περιπτώσεις σχισμών, όπως αναφέρονται αναλυτικά στην ενότητα 6.3.

Ο σκοπός να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κομμάτι του συγκεκριμένου φάσματος συχνοτήτων, εν μέρει ικανοποιήθηκε, καθώς αρκετές δομές από αυτές που προέκυψαν είναι ικανές, όσον αφορά το εύρος ζώνης αλλά και την απολαβή που παρουσιάζουν, να καλύψουν αρκετά κανάλια συχνοτήτων. Επίσης, αναπτύχθηκαν κεραίες (κυρίως οι συμβατικές PIFA), οι οποίες παρουσιάζουν πολύ καλή προσαρμογή γύρω από τη συχνότητα των 670 MHz, καθώς ως προς αυτή έγινε και η βελτιστοποίηση με τους γενετικούς αλγορίθμους.

Ειδική αναφορά αξίζει η τελευταία δομή που προέκυψε (Corrugated PIFA 211 με εσωτερικά corrugations) που περιγράφεται αναλυτικά στον πίνακα 6.16, ενώ η υλοποίησή της καθώς και ο λόγος στάσιμων κυμάτων που εμφανίζει σε συνάρτηση με την συχνότητα φαίνονται στα σχήματα 6.97 και 6.98 αντίστοιχα. Αυτή η κεραία λειτουργεί (εμφανίζει, δηλαδή VSWR μικρότερο της τιμής 2) στις συχνότητες 690 – 860 MHz, που αποτελούν, όπως έχει προαναφερθεί το ψηφιακό μέρισμα για την Αμερική και την Ασία. Οι αντίστοιχες συχνότητες για την Ευρώπη είναι το διάστημα 790 – 862 MHz, το οποίο, επίσης καλύπτεται. Επίσης η συγκεκριμένη κεραία έχει απολαβή 3 dBi, που κρίνεται ικανοποιητική για σταθερή λήψη ενώ και οι διαστάσεις της (16.2 cm × 10.8 cm × 1.8 cm) την καθιστούν ικανή να αποτελέσει τμήμα μιας μικρής συσκευής, όπως laptop, tablet ή ακόμα και αποκωδικοποιητή ψηφιακού σήματος.

## Βιβλιογραφία

- [1] Κόλλια Ελένη, Σχεδίαση και ανάλυση UWB κεραιών με τη χρήση του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης SuperNEC. Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της κεραιάς με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων., Αθήνα, 2010.
- [2] Rosu, Iulian, «PIFA-Planar Inverted F Antenna,» <http://www.qsl.net/va3iul>.
- [3] H.F.AbuTarboush, R.Nilavalan,D.Budimir,H.S.Al-Rawershidy, «Compact Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for WiMAX Application,» *IEEE*, 2009.
- [4] H.F.AbuTaboush, R.Nilavalan,H.S.Al-Raweshidy,D.Budimir, «Design of Planar Inverted-F Antennas (PIFA) for Multiband Wireless Applications,» *IEEE*, 2009.
- [5] Dalia Mohammed Nashaat, Hala A.Elsadek,Hani Ghali, «Single Feed Compact Quad-Band PIFA Antenna for Wireless Communication Applications,» *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*,VOL. 53, August 2005.
- [6] Yong-Sun Shin, Byoung-Nam Kim, Won-Il Kwak, Seong-Ook Park, «IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL.3,» 2004.
- [7] 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,» σε *PIERS*, Marrakesh, 2001.
- [8] «<http://www.radio-electronics.com/info/broadcast/digital-video-broadcasting/what-is-dvb-t-basics-tutorial.php>,» [Ηλεκτρονικό].
- [9] «<http://en.wikipedia.org/wiki/DVB-T>,» [Ηλεκτρονικό].
- [10] Analysis mason, «Δικαιώματα στην κυριότητα του φάσματος των UHF και των 2.6GHz,» 2012.
- [11] Ραμανθυσ Κ. Δερεδάκης, «Ανάλυση και μέτρηση παρεμβολώνστην επιγεια ψηφιακή τηλεόραση από κινητές υπηρεσίες WCDMA, TD-SCDMA,GSM-EDGE,» Αθήνα, 2010.
- [12] Κωστόπουλος Παναγιώτης, «Ενισχυτική Μάθηση σε Συστήματα Γνωστικών Ραδιοεπικοινωνιών,» Αθήνα, 2011.
- [13] R. Waterhouse, Printed Antennas for Wireless Communications, Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [14] C.D.Nikolopoulos, C.N.Capsalis, «The Impact of Corrugations in optimized Planar Inverted F Antennas».
- [15] C.Nikolopoulos, K.Stravoskoufis, C.Capsalis, «A New Small and Low-cost Wideband PIFA with Corrugations,» σε *PIERS*, Moscow, 2012.
- [16] Ali, M. F. Abedin and M., «Modifying the Ground Plane and Its Effects on Planar Inverted-F Antennas (PIFAs) for Mobile Phone Handsets,» *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, pp. 226-229, 2003.
- [17] Jorje Teniente, Ramon Gonzalo,Carlos del-Rio, «Innovative High-Gain Corrugated Horn Antenna Combining Horizontal and Vertical Corrugations,» *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, VOL. 5, 2006.
- [18] Carlos Cordeiro, Kiran Challapali, Dagnachew Birru, «IEEE 802.22: AN Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios,» *JOURNAL OF COMMUNICATIONS*, VOL.1,NO.1, pp. 38-46, April 2006.

